Введение.

За последнюю сотню лет в физике Земли накоплен огромный наблюдательный материал, который продолжает пополняться и в наше время, обнаруживаются новые факты, которые подчас противоречат общепризнанным догмам. В чем же дело, почему в физике Земли нет свежих идей, новых подходов и оригинальных моделей? Более того, эта наука одна из старейших на Земле, так и не имеет ни одного закона, связывающего результаты наблюдений в одну общую, построенную «на первых принципах», физически непротиворечивую концепцию? По-видимому, дело заключается в том, что учебники по физике Земли и читаемые в университетах курсы по этой специальности, предназначены для геологов и геофизиков. Авторы учебников и лекторы университетов, сами учившиеся по таким же учебникам, часто и не задумываются о том, насколько обсуждаемая тема соответствует истине, а не является этой самой догмой. Зачастую авторы учебников излагают материал, особо не выделяя накопленные экспериментальные данные по Земле и трактуя их в рамках своих собственных представлений об её устройстве.

С первых лекций и первых страниц учебников, геологи и геофизики, ни капли не сомневаясь, принимают, что Земля была «склеена» из пылинок, что ядро – железное, что тепловой поток определяется радиоактивным распадом, что плиты движутся по астеносфере «как в море корабли» и т.п. Иначе, всё в этом мире известно и всё давно определено.

В качестве иллюстрации сказанному цитируем одного создателей квантовой механики Макса Борна, который в книге «Моя жизнь и взгляды» - писал: «Я убежден, что такие идеи, как абсолютная определенность, абсолютная точность, конечная и неизменная истина и т.п., являются призраками, которые должны быть изгнаны из науки ... ибо вера в то, что существует только одна истина и что кто-то обладает ею, представляется мне корнем всех бедствий человечества». Решительную борьбу с такими представлениями Борн считал важной задачей науки и, в частности, при изучении физических явлений и процессов.

Приведем ещё одну цитату из другой книги Борна («Размышления и воспоминания физика»). Речь пойдет о подходе к проблеме, развитом в физике и отличающимся от подходов в других науках. Дело в том, что «в сознании бесконечной сложности сущего, с которой физик встречается в каждом эксперименте, он сопротивляется тому, чтобы считать какую-либо теорию окончательной... здоровое чувство подсказывает ему, что догматизм является злейшим врагом естествознания». А. Эйнштейн неоднократно говорил о том, что в науке очень важно отказаться от глубоко укоренившихся, часто некритически повторяемых предрассудков и догм.

Учебник, который читатель держит в руках, написан физиком, и для физиков. Проблемой физики Земли я заинтересовался уже после того, как стал доктором наук. Это позволило мне абсолютно непредвзято взглянуть на проблему именно так, как нас, молодых, учил в 60-х годах известный физик академик Будкер (об этом подробнее в Заключении): «сначала думайте, а потом читайте книги». Вот и я сначала придумал модель расширяющейся Земли (в последствии, я понял, что лучше говорить – «модель горячей Земли»), а затем стал читать книги и статьи. Прошло 30 лет, я написал много книг и статей на эту тему, в течение ряда лет читал этот курс для геофизиков и, в конце концов, понял, что мне необходимо написать учебник именно для физиков. Эта область физики, которой занимались и занимаются исключительно геологи, крайне нуждается во вливании в неё отряда молодых физиков.

Несколько слов о структуре книги. Учебник по физике Земли разбит условно, на шесть разделов. Первый называется «Планета Земля». В него включены такие вопросы: Планета Земля. Параметры, внутреннее устройство Земли, вращение Земли, возраст Земли и, в отличие от общепринятых представлений» - внутреннее устройство и термодинамика «горячей» Земли. Во втором разделе «Образование Солнечной системы» рассмотрены вопросы: место Земли в Солнечной системе, закон Тициуса-Боде, соразмерности и резонансы планет и спутников в Солнечной системе: общность и различия, планеты других звезд. А также: сценарии образования Солнечной системы, результаты астрономических наблюдений, фрактальные свойства и скелинг в физике Земли. В разделе III «сейсмология и вулканизм» рассмотрены вопросы: сейсмология и сейсмические методы, вулканизм Земли, планет и спутников, новая модель землетрясения. Четвертый раздел посвящен «геомагнитному полю», он включает общие представления о геомагнетизме, об электропроводности Земли и модель генерации геомагнитного поля в модели горячей Земли. В разделе V, посвященном «геодинамике», включены такие главы: гравитационное поле Земли, дрейф материков, принцип минимизации гравитационного потенциала и геодиамика горячей Земли. В шестом разделе рассматривается физика явлений, происходящих на поверхности Земли и в атмосфере. Здесь обсуждаются: тепловой поток Земли, геохимические аспекты, химический состав Земли, уровень естественной радиации на Земле, атмосферное электричество, климат и жизнь. Главы, в которых излагается модель горячей Земли, выделены знаком *.

В конце книги приводятся пять Приложений. В них рассматриваются вопросы, не имеющими прямого отношения к физике Земли, но, по моему мнению, имеющими к ней отношение в контексте с основной парадигмой автора – концепцией горячей расширяющейся Земли.

В Заключении перечислены некоторые из задач для физика, требующих решения, а также сформулированы предварительные варианты «законов» физики Земли. Автор ни в коей мере не настаивает на том, что высказанные им мысли являются «истиной в последней инстанции». Это, скорее, следует считать - как приглашение принять участие в разработке так долго копившихся проблем, решение которых позволит, например, ответить на такие актуальные и широко обсуждаемые вопросы:

- в чем состоит физика месторождений полезных ископаемых?
- есть ли вода на Марсе и Луне?
- в чем состоит физика вулкана и землетрясения?
- из чего состоит ядро Земли?
- какова физика геомагнитного поля? (замечу, что эту проблему Эйнштейн относил к одной из пяти важнейших задач физики),
- почему магнитное поле раньше было на Луне, а потом исчезло? и т.п.

Глава 1. Планета Земля. Параметры, внутреннее устройство Земли и её место в Солнечной системе.

В главе 1 собрана общая информация о параметрах Земли, геоконстантах, размерах земного шара, химическом составе земных оболочек, высоте Солнца, продолжительности дня, температуре ядра и мантии, распределении физических параметров (плотности, скоростей сейсмических волн, модулей упругости и т.д.) по радиусу Земли. В главе дается информация об эволюции Земли, о том, что достоверно и что не совсем достоверно известно о Земле. Говорится о некоторых ошибках и заблуждениях в общепринятой модели холодной Земли, о том, как изменялись представления о Земле по мере развития науки.

Земля - планета Солнечной системы.

1.1. *Параметры Земли.*

Геоконстанты

Наибольшее расстояние от Земли до Солнца (афелий, начало 5 июля)	152 000 000 км
Наименьшее расстояние от Земли до Солнца (перигелий, начало 3 января)	147 000 000 км
Среднее расстояние от Земли до Солнца (приближенно)	149 509 000 км
Время прохождения света от Солнца до Земли	8 мин 18 с
Видимый угловой диаметр Солнца	32'
Период обращения Земли вокруг Солнца (тропический год)	365 дней 5 ч 48 м 46 с
Длина земной орбиты	939 120 000 км
Средняя скорость движения Земли по орбите	29,76 км/с
Наклон земной оси к плоскости эклиптики (плоскости орбиты)	66°33'19"
Время полного оборота вокруг своей оси (звездные сутки)	23ч. 56м. 4,1с. ср. солн. врем.
Скорость точки экватора вследствие суточного вращения Земли	465 м/с
Среднее расстояние от Земли до Луны	384 395 км
Масса Луны	$7{,}35 \cdot 10^{22}$ кг

Размеры земного шара (эллипсоида)

Экваториальный радиус	6378 км
Полярный радиус	6357 км
Средний радиус Земли	6371 км
Длина экватора	40076 км
Длина меридиана	40008 км
Поверхность Земли	510 млн.км^2
Поверхность Мирового океана	361 млн.км^2
Поверхность суши	149 млн. км^2
Объем Земли	1083320 млн. км^3
Масса Земли	5,975*10^{24} кг
Средняя плотность Земли	5520кг/м^3
Сжатие земного эллипсоида	1:298,25
Ускорение силы тяжести	
а) на экваторе	9,78049 м/сек^2
б) на полюсе	9,83235 м/сек^2
в) стандартное	9,80665 м/сек^2
Момент инерции отн. оси вращ.	8,104 × 10^{37}кг·м^2

Химический состав земной коры (в %)

Элементы	%
Кислород	46,8
Кремний	27,3
Алюминий	8,7
Железо	5,1
Кальций	3,6
Натрий	2,6
Калий	2,6
Магний	2,1
Прочие	1,2

Параметры Земли

Отношение центробежной силы к ускорению силы тяжести	3.47 10^{-3}
Отношение массы Земли к массе Луны	81.303
Период чандлеровского колебания, сутки	431
Угловая скорость прецессии	50.25 с/год
Период прецессии	25800 лет
Лунно-солнечный момент, вызывающий прецессию	4.14 10 ^{29} дин·см
Лунный приливообразующий момент	3.9 10^{23} дин·см
Масса атмосферы	5.1 10^{21} г
Масса океанов	1.4 10^{24} г
Масса земной коры	2.4 10^{25} г
Масса мантии	4.1 10^{27} г
Масса ядра	1.9 10^{27} г
Полный термический поток	1.0 10^{28} эрг/год
Солнечная постоянная	1.3 10^6 эрг/см^{2}с
Возраст Земли	4.55 10^9 лет
Конец последнего оледенения	11 тыс. лет назад
Плотность: гранита, базальта, осадочных пород, г/см^3	2.67; 2.85; 2.45
Удельная теплоемкость: гранита, базальта, кал/г·град	0.20; 0.22
Теплопроводность: гранита, базальта, кал/град·см·с	710^{-3}; 510^{-3}
Градиент температуры в поверхностном слое	2.010^{-4} град/см
Магнитный дипольный момент Земли	8 10^{25} ед. СГСМ

Полуденная высота центра Солнца над горизонтом на разных широтах в дни равноденствий и солнцестояний

Широта	21.03 - весеннее равноденствие	22.06 -летнее солнцестояние	23.09 - осеннее равноденствие	22.12 - зимнее солнцестояние
90°	0	23,5	0	- 23,5*
85°	5	28,5	5	- 18,5
80°	10	33,5	10	- 13,5
75°	15	38,5	15	- 8,5
70°	20	43,5	20	- 3,5
68°	22	45,5	22	- 1,5
66,5°	23,5	47,0	23,5	0,0

* "Минус" означает, что Солнце стоит ниже горизонта.

Продолжительность дня на разных широтах в Северном полушарии

Широта	Самый длинный день (лето)	Самый короткий день (зима)
0°	12 ч 00 мин	12 ч 00 мин
10°	12 " 35 "	11 " 25 "
30°	13 " 56 "	10 " 04 "
40°	14 " 51 "	9 " 09 "
50°	16 " 09 "	7 " 51 "
66,5°	24 " 00 "	0 " 00 "

Оценки значений температуры в ядре и мантии.

Область	Изменение температуры, К	Температура, К
Поверхность	–	273
Литосфера	1300±100	–
Основание литосферы	–	1600±100
Адиабата в верхней мантии	150±20	–
Переход оливин–шпинель	90±30	–
Сейсмическая граница на глубине 410 км	–	1800±200
Адиабата в переходной зоне мантии	120±30	–
Переход рингвудит–перовскит	–70±30	2000±250
ТПС в переходной зоне	500±500	–
Основание переходной зоны	–	1900–2900
Адиабата в нижней мантии	700±200	–
ТПС в зоне *D″*	800±700	–
Граница ядро–мантия (ЯМГ)	–	3900±600
Адиабата во внешнем ядре	1000±400	–
Граница внешнее–внутреннее ядро	–	4900±900
Центр Земли	–	5000±1000

Фундаментальные характеристики Земли. Земной радиус, по оценке Машимова (1996), уменьшается в настоящее время со скоростью 1 см в год, полярное сжатие уменьшается на 1×10^{-9} в год, а центр инерции смещается в юго-западном направлении на 2 см в год. Изучение фундаментальных характеристик Земли показывают, что:

1. По данным повторных гравиметрических наблюдений, сила тяжести увеличивается со скоростью $dg/dt \approx 4$ мкГал в год. Оценка dg/dt по изменению GM и уровенного потенциала геоида W_o, дает величину несколько меньшую: 3 мкГал/год.

2. Уменьшение объема Земли $1/V \times (dV/dt) \approx -0.2\times10^{-10}$ год$^{-1}$. При этом объем ложа океана уменьшается со скоростью 0.03 км^3/год.

3. Произведение гравитационной постоянной на массу Земли (GM) постоянно с точностью, не хуже 10^{-11} год$^{-1}$.

4. Динамический параметр J_2, определенный по наблюдениям векового возмущения расстояния перигея орбиты ИСЗ, равен 10^{-10} год$^{-1}$.

5. Каждый год на Земле происходит более 1 млн. землетрясений с магнитудой M ≥ 3. Общая выделяющаяся энергия 10^{26} эрг в год. Землетрясения, как и вулканы, меняют «лик Земли» и её динамические характеристики: тензор инерции и геоид. ***Динамика Земли главным образом связана с изменением параметров геоида.***

6. Основные интегральные характеристики, определяющие динамику Земли, это полярное сжатие α, экваториальное сжатие α_e и долгота λ_o большой полуоси экваториального эллипса геоида. Вековые изменения этих параметров: $d\alpha/dt = -0.22\times10^{-9}$ год$^{-1}$, $d\alpha_e/dt = 3.6\times10^{-9}$ год$^{-1}$, $d\lambda_o/dt = -0.3'$ год$^{-1}$. Современные данные: $\alpha = 0.0033528132$; $\alpha_e = 0.0000108728$; $\lambda_o = -14°\ 54'$.

7. Наблюдаемое уменьшение моментов инерции (не более 0.16×10^{-6} год$^{-1}$) соответствует уменьшению объема геоида.

PREM – Preliminary Reference Earth Model (предварительная модель Земли).

Физические параметры модели Земли PREM для глубин 0–220 км.

Радиус, км	Глубина, км	Плотность, г/см^3	v_{PV}, км/с	v_{PH}, км/с	v_{SV}, км/с	v_{SH}, км/с	η	Q_μ	Q_K
6151.0	220.0	3.3595	7.8005	8.0486	4.4411	4.4363	0.9765	80	57822
6291.0	80.0	3.3747	7.9591	8.1501	4.4089	4.5619	0.9221	80	57822
6291.0	80.0	3.3747	7.9591	8.1501	4.4088	4.5619	0.9221	600	57822
6346.6	24.4	3.3808	8.0221	8.1904	4.3960	4.6118	0.9005	600	57822
6346.6	24.4	2.9000	6.8000	6.8000	3.9000	3.9000	1.0000	600	57822
6356.0	15.0	2.9000	6.8000	6.8000	3.9000	3.9000	1.0000	600	57822
6356.0	15.0	2.6000	5.8000	5.8000	3.2000	3.2000	1.0000	600	57822
6368	3.0	2.6000	5.8000	5.8000	3.2000	3.2000	1.0000	600	57822
6368	3.0	1.0200	1.4500	1.4500	0	0	1.0000	0	57822
6371	0	1.0200	1.4500	1.4500	0	0	1.0000	0	57822

A, кбар	C, кбар	L, кбар	N, кбар	F, кбар	v_P, км/с	v_S, км/с	Давление, кбар
2176	2044	663	661	831	7.9897	4.4189	71.1
2242	2138	656	702	857	8.0769	4.4695	24.5
2242	2138	656	702	857	8.0769	4.4695	24.5
2268	2176	653	719	866	8.1106	4.4909	6.0
1341	1341	441	441	459	6.8000	3.9000	6.0
1341	1341	441	441	459	6.8000	3.9000	3.3
875	875	266	266	342	5.8000	3.2000	3.3
875	875	266	266	342	6.8000	3.2000	0.3
21	21	0	0	21	1.4500	0	0.3
21	21	0	0	21	1.4500	0	0.0

Физические параметры модели Земли PREM для глубин 220–6371 км.

Уровень	Радиус, км	Глубина, км	Плотность, г/см^3	V_P, км/с	V_S, км/с	Q_μ	Q_K	Q_P
1	0	6371.0	13.08	11.26	3.66	85	1328	431
2	1221.5	5149.5	12.76	11.02	3.5	85	1328	445
3	1221.5	5149.5	12.16	10.35	0	0	57822	57822
4	3480.0	2891.0	9.90	8.06	0	0	57822	57822
5	3480.0	2891.0	5.56	13.71	7.26	312	57822	826
6	3630.0	2741.0	5.49	13.68	7.26	312	57822	822
7	5600.0	771.0	4.44	11.06	6.24	312	57822	730
8	5701.0	670.0	4.38	10.75	5.94	312	57822	759
9	5701.0	670.0	3.99	10.26	5.57	143	57822	362
10	5771.0	600.0	3.97	10.15	5.51	143	57822	362
11	5971.0	400.0	3.72	9.13	4.93	143	57822	366
12	5971.0	400.0	3.54	8.90	4.76	143	47822	372
13	6151.0	220.0	3.43	8.55	4.64	143	57822	362

Уровень	Ф, км^2/с^2	K_S, кбар	μ, кбар	σ	Давление, кбар	dK_S/dP	η_B	Ускорение см /с^2
1	108.90	14253	1761	0.440	3638.5	2.33	0.99	0
2	105.25	13434	1567	0.443	3288.5	2.34	1.00	440.0
3	107.24	13047	0	0.500	3288.5	3.75	1.03	440.0
4	65.04	6441	0	0.500	1357.5	3.57	0.98	1068.2
5	117.78	6556	2938	0.305	1357.5	1.64	0.99	1068.2
6	116.76	6412	2899	0.309	1269.7	1.64	1.01	1048.2
7	70.52	3133	1730	0.266	282.9	3.33 3.84 2.98	0.97	999.8
8	68.47	2999	1548	0.279	238.3	3.03	0.98	1001.4
9	64.03	2556	1239	0.291	238.3	2.40	0.37	1001.4
10	62.61	2489	1210	0.290	210.4	2.37	0.37	1000.3
11	50.99	1899	906	0.294	133.5	8.09 7.26	1.98 1.73	996.8
12	48.97	1735	806	0.298	133.5	3.37	0.83	996.8
13	44.50	1529	741	0.291	71.1	3.23	0.78	990.4

Что достоверно известно о Земле? Откроем любой учебник по физике Земли, или популярную книгу на эту тему, и в каждой из них встретим одни и те же рассуждения о том, что Земля состоит из железного ядра, силикатной мантии и земной коры: континентальной и океанической (рис. 1-1). Ядро Земли состоит из двух оболочек: центрального твердого кристаллического ядра, которое находится внутри расплавленного железного внешнего ядра.

В жидком внешнем ядре происходит генерация геомагнитного поля, которое, - по структуре силовых линий, можно уподобить большому железному магниту, расположенному вдоль оси вращения планеты таким образом, что на северном географическом полюсе находится южный магнитный полюс, а на южном географическом полюсе – северный, магнитный (рис.1-2). Названы они так по аналогии с железным магнитом, у которого силовые линии выходят из «северного полюса» и «входят» – в «южный», хотя принято считать полюс на севере – северным, а на юге – южным магнитным. Известно, что время от времени геомагнитное поле меняет свою ориентацию и магнитные полюса меняются местами. Это явление получило название:

«инверсия геомагнитного поля». Принято считать, что в мантии Земли происходит глобальная конвекция, которая приводит в движение материки и плиты. Считается, что плиты «рождаются» в океане, - в области срединно-океанических хребтов (СОХ), - в зонах т.н. спрединга. Затем, плиты движутся по поверхности Земли и как бы «ныряют» в мантию в зонах, получивших название: зоны «субдукции». Наука, постулирующая этот механизм, называется «тектоника литосферных плит». Известно, что на Земле существует тепловой поток, величина которого регистрируется по вертикальному градиенту температуры, причем изменения его по поверхности Земли не очень значительны. Принято считать, что причина, вызывающая тепловой поток на Земле, это распад радиоактивных элементов, сосредоточенных в гранитах земной коры. Надо сказать, что тепловой поток обнаружен и на Луне, и на других планетах, причем, на Луне его величина примерно в 30 раз меньше земного. Земля вращается, причем на ранних этапах эволюции она вращалась быстрее.

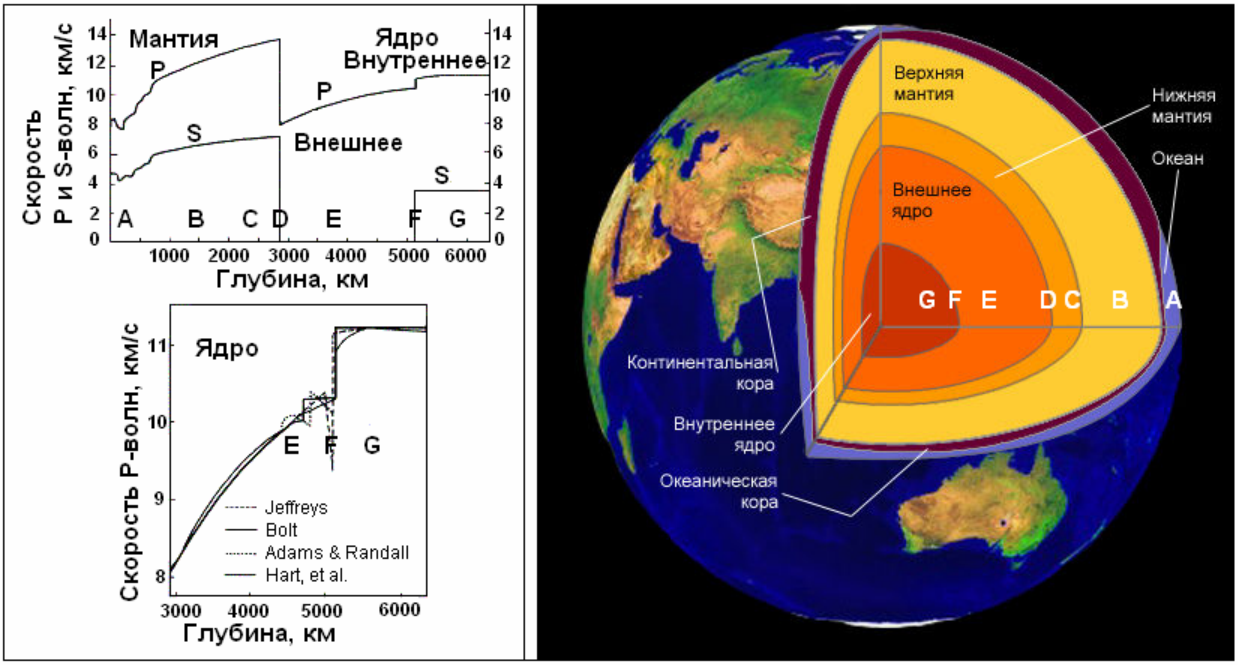


Рис. 1-1. Устройство Земли (распределение скоростей сейсмических волн) по данным сейсмологии.

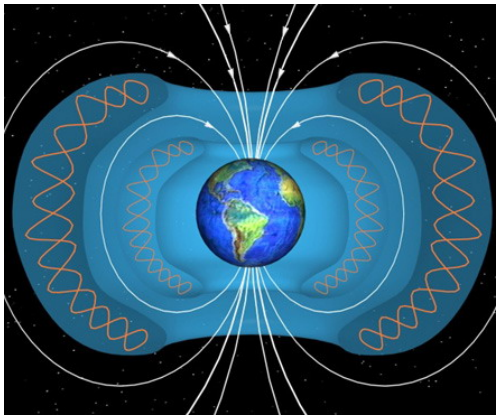


Рис. 1-2. Магнитное поле Земли

На Земле происходят землетрясения и извержения вулканов. Причем и те, и другие, в большей части (80%), - располагаются в т.н. «огненном кольце» вдоль побережья Тихого океана. Принято считать, что Земля образовалась 4.5 млрд. лет тому назад, время

формирования Земли из протопланетного облака составляло 100 млн. лет, а механизм образования – состоял в слипании мельчайших пылинок, т.н. «планетозималей». Надо сказать, что при этом Земля не нагревалась, так как выделяющееся при слипании пылинок тепло успевало отводиться в космос за счет излучения. И, наконец, на Земле «властвует» принцип актуализма: «всегда было как сейчас».

Если внимательнее познакомиться с основами науки, называемой «физика Земли», то можно убедиться в том, что в этой науке практически нет теоретически предсказанных и экспериментально подтвержденных законов, как это обычно имеет место в других разделах физики. Конечно, известны наблюдаемые зависимости, такие как, например, закон планетарных расстояний Тициуса-Боде, законы Гуттенберга-Рихтера и Омори в сейсмологии и др., но в чем состоит и на чем базируется физика выявленных закономерностей, - остается неизвестным. Обратимся к основному постулату плитной тектоники. Суть его заключается в том, что, сколько вещества Земли было образовано в зонах спрединга, то ровно столько должно быть поглощено в зонах субдукции. Причиной действия этого постулата может быть только одна, - это постоянство радиуса Земли. Именно это и следует из принципа актуализма, однако на вопрос «почему радиус должен быть постоянным», - ответа нет.

«Твёрдая» Земля. О строении, составе и свойствах «твёрдой» Земли имеются преимущественно предположительные сведения, поскольку непосредственному наблюдению доступна лишь самая верхняя часть земной коры. Все данные о более глубоких недрах планеты получены за счёт разнообразных косвенных (главным образом геофизических) методов исследования. Наиболее достоверны из них - сейсмические методы, основанные на изучении путей и скорости распространения в Земле упругих колебаний (сейсмических волн). С их помощью удалось установить разделение «твёрдой» Земли на отдельные сферы и составить представление о внутреннем строении Земли.

Основные данные о геосферах «твёрдой» Земли.

Геосферы	Подразделения геосфер	Буквенное обозначение	Глубина нижней границы, км.	Объём, 10^{18} м^3	Масса, 10^{21} кг
Земная кора	осадочный слой	A	до 20	1,0	2,5
	«гранитный» слой		до 40	3,6	10
	«базальтовый» слой		до 70	5,6	16
Мантия	Верхняя мантия субстрат	B	50-100	180,1	610
	слой Гуттенберга (астеносфера)		около 400		
	слой Голицына	C	около 900	205,7	856
	Нижняя мантия	D	2900	510,8	2547
Ядро	Внешнее ядро	E	около 4800	166,6	1828
		F	около 5100		
	Внутреннее ядро	G	6371	8,6	106

Строение «твёрдой» Земли. Верхняя сфера «твёрдой» Земли - земная кора (A) - самая неоднородная и сложно построенная. Из нескольких типов земной коры преобладающее распространение имеют материковая и океаническая; в строении первой различают три слоя: верхний -- осадочный (от 0 до 20 км), средний, называемый условно «гранитным» (от 10 до 40 км), и нижний, т. н. «базальтовый» (от 10 до 70 км), отделяющийся от «гранитного» поверхностью Конрада.

Под океанами осадочный слой на обширных площадях имеет толщину в несколько сотен метров. «Гранитный» слой, как правило, отсутствует, вместо него наблюдается т. н. «второй» слой неясной природы, толщиной около 1-2,5 км. Мощность «базальтового» слоя под океанами - около 5 км. Кроме основных типов коры, встречается несколько типов «промежуточного» строения, в том числе кора субконтинентальная (под некоторыми архипелагами) и субокеаническая (в глубоководных впадинах окраинных и внутриконтинентальных морей). Субконтинентальная кора характеризуется нечётким разделением «гранитного» и «базальтового» слоев, которые объединяются под названием гранитно-базальтового. Кора субокеаническая близка к океанической, отличаясь от неё большей мощностью в целом и осадочного слоя в частности. С помощью сейсмических методов четко устанавливается поверхность раздела, отделяющая земную кору от нижележащей мантии. Мантия состоит из трёх слоев (B, C и D) и простирается от поверхности Мохоровичича до глубины 2900 км, где она граничит с ядром Земли. Слои B и C образуют верхнюю мантию (толщиной 850--900 км), слой D - нижнюю мантию (около 2000 км). Верхнюю часть слоя B, залегающую непосредственно под корой, называется субстратом; кора вместе с субстратом составляет литосферу. Нижнюю часть верхней мантии называют именем открывшего её свойства сейсмолога Б. Гуттенберга. Скорость распространения сейсмических волн в пределах слоя Гуттенберга несколько меньше, чем в выше- и нижележащих слоях, что связывают с повышенной текучестью его вещества. Отсюда - второе название слоя Гуттенберга - астеносфера (слабая сфера). Этот слой является сейсмическим волноводом, поскольку сейсмический «луч» (путь волны) долгое время идёт вдоль него. Лежащий ниже слой C (слой Голицына) выделен как зона быстрого нарастания с глубиной скоростей сейсмических волн (продольных от 8 до 11,3 км/сек, поперечных от 4,9 до 6,3 км/сек). Земное ядро имеет средний радиус около 3,5 тыс. км и делится на внешнее ядро (слой E) и субъядро (слой G) с радиусом около 1,3 тыс. км. Их разделяет переходная зона (слой F) толщиной около 300 км, которую относят обычно к внешнему ядру. На границе ядра наблюдается скачкообразное падение скорости продольных волн (от 13,6 до 8,1 км/сек). Внутри ядра она возрастает, увеличиваясь скачком до 11,2 км/сек., вблизи границы субъядра. В субъядре сейсмические волны распространяются почти с неизменной скоростью.

Физические характеристики и химический состав «твёрдой» Земли. С глубиной в Земле изменяются значения плотности, давления, силы тяжести, упругих свойств вещества, вязкости и температуры. Средняя плотность земной коры в целом - 2,8 т/м^3. Средняя плотность осадочного слоя коры 2,4 - 2,5 т/м^3, «гранитного» - 2,7 т/м^3, «базальтового» - 2,9 т/м^3. На границе земной коры и мантии (поверхность Мохоровичича) плотность увеличивается скачком от значений 2,9-3,0 т/м^3 до 3,1-3,5 т/м^3. Далее она плавно растет, достигая у подошвы слоя Гуттенберга 3,6 т/м^3 у подошвы слоя Голицына 4,5 т/м^3 и у границы ядра 5,6 т/м^3. В ядре плотность скачком поднимается до 10,0 т/м^3, а далее плавно возрастает до 12,5 т/м^3 в центре Земли.

Ускорение силы тяжести в Земле не изменяется скачком. До глубины 2500 км оно отклоняется от значения 10 м/сек^2 менее чем на 2%, на границе ядра равно 10,7 м/сек^2 и далее плавно убывает до нуля в центре Земли. По данным о плотности и ускорении силы тяжести вычисляется давление, которое непрерывно растёт с глубиной. У подошвы материковой коры оно близко к 1 Гн/м^2 (10^9Н/м^2), у подошвы слоя B - 14 Гн/м^2, слоя C - 35 Гн/м^2, на границе ядра - 136 Гн/м^2, в центре Земли - 361 Гн/м^2. Зная плотность и скорости

сейсмических волн, вычисляют величины, характеризующие упругие свойства материала Земли. Их ход в зависимости от глубины показан на втором графике.

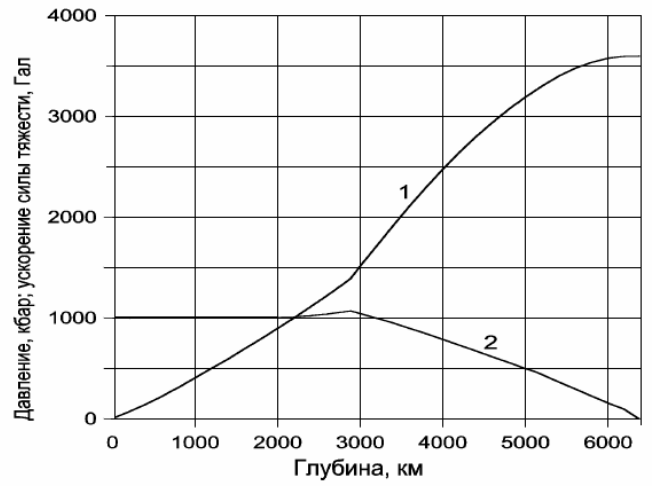


Рис.1-3. Давление (1) и сила тяжести (2) в Земле.

В земной коре и верхней мантии температура повышается с глубиной. Из мантии к поверхности «твёрдой» Земли идёт тепловой поток, в несколько тыс. раз меньший поступающего от Солнца (в среднем около 0,06 Вт/м^2 или около $2{,}5\cdot10^{13}$ Вт на всю поверхность Земли). В мантии температура везде ниже температуры полного расплавления слагающего её материала. Под материковой корой она предполагается близкой к 600 -700 °С. В слое Гуттенберга температура, по-видимому, близка к точке плавления (1500 - 1800 °С). Оценка температур для более глубоких слоев мантии и ядра Земли носит весьма предположительный характер. По-видимому, в ядре она не превышает 4000--5000 °С.

Вязкость материала мантии выше и ниже границ астеносферы, видимо, не менее 10^{23}Пз; вязкость астеносферы сильно понижена (10^{19} - 10^{21} Пз). Считается, что благодаря этому в астеносфере происходит медленное перетекание масс в горизонтальном направлении под влиянием неравномерной нагрузки со стороны земной коры (восстановление изостатического равновесия). Вязкость внешнего ядра на много порядков - меньше вязкости мантии.

В верхней мантии до глубины 700 км отмечаются очаги землетрясений, что указывает на значительную прочность слагающего её материала; отсутствие более глубоких сейсмических очагов объясняется либо малой прочностью вещества, либо отсутствием достаточно сильных механических напряжений.

Электропроводность в верхней части слоя В очень низка (порядка 10^{-2} Ом$^{-1}$(м$^{-1}$); в слое Гуттенберга она повышена, что связывают с ростом температуры. В слое Голицына она постепенно увеличивается приблизительно до 10 - 100 Ом$^{-1}$*м$^{-1}$, а в нижней мантии, по-видимому, возрастает ещё на порядок. В ядре Земли электропроводность очень высока, что указывает на металлические свойства его вещества.

Из современных космогонических гипотез вытекает, что химический состав планет, их спутников и метеоритов должен быть близок к составу Солнца. Сопоставляя известные химические анализы земных и лунных пород, метеоритов, спектральные анализы Солнца и учитывая данные о плотности и др. физических свойствах материала в недрах Земли, можно в общих чертах охарактеризовать состав Земли в целом и состав её различных геосфер.

В Таблице приводится общий химический состав Земли согласно подсчётам американского геохимика Б. Мейсона. При этом предполагается, что ядро состоит из железо-никелевого сплава, подобного металлической фазе хондритов. Относительно состава земного ядра существуют две гипотезы. Согласно первой - ядро состоит из железа

с примесью (18-20 %) кремния (или иного, сравнительно лёгкого материала); согласно второй - внешнее ядро слагается силикатом, который под влиянием огромного давления и высокой температуры перешёл в металлическое состояние; субъядро может быть железным или силикатным.

Химический состав Земли

Химический элемент	Содержание в весовых процентах	Химический элемент	Содержание в весовых процентах
Железо	34,63	Натрий	0,57
Кислород	29,53	Хром	0,26
Кремний	15,20	Марганец	0,22
Магний	12,70	Кобальт	0,13
Никель	2,39	Фосфор	0,10
Сера	1,93	Калий	0,07
Кальций	1,13	Титан	0,05
Алюминий	1,09		

В составе Земли преобладают (как по массе, так и по числу атомов) железо, кислород, кремний и магний. В сумме они составляют более 90% массы Земли. Земная кора почти наполовину состоит из кислорода и более чем на четверть из кремния. Значительная доля принадлежит также алюминию, магнию, кальцию, натрию и калию. Кислород, кремний, алюминий дают наиболее распространённые в коре соединения - кремнезём (SiO_2) и глинозём ($A1_2O_3$).

Мантия состоит преимущественно из тяжёлых минералов, богатых магнием и железом. Они образуют соединения с SiO_2 (силикаты). В субстрате, по-видимому, больше всего форстерита ($MgSiO_4$), глубже постепенно возрастает доля фаялита (Fe_2SiO_4). Предполагается, что в нижней мантии под влиянием очень высокого давления эти минералы разложились на окислы (SiO_2, MgO, FeO).

Агрегатное состояние вещества земных недр обусловлено наличием высоких температур и давлений. Материал мантии был бы расплавлен, если бы не высокое давление, вследствие которого вся мантия находится в твёрдом кристаллическом состоянии, за исключением, вероятно, астеносферы, где влияние близкой к точке плавления температуры сказывается сильнее, чем действие давления. Полагают, что здесь вещество мантии находится либо в аморфном, либо частично в расплавленном состоянии. В слое Голицына, по мере роста давления с глубиной, по-видимому, происходит перестройка кристаллических решёток минералов в сторону более плотной упаковки атомов, чем объясняется быстрый рост с глубиной плотности и скоростей сейсмических волн.

Внешнее ядро, очевидно, находится в жидком (расплавленном) состоянии, поскольку поперечные сейсмические волны, не способные распространяться в жидкости, через него не проходят. С существованием жидкого внешнего ядра связывают происхождение магнитного поля Земли. Внутреннее ядро (субъядро), по-видимому, твёрдое (продольные волны, подходя к границе субъядра, возбуждают в нём поперечные волны).

Атмосфера.

Атмосфера — газовая оболочка Земли, имеющая практически неизменную массу, которая составляет около $5{,}157\text{-}10^{15}$ т (для сравнения масса Земли составляет $5{,}98\text{-}10^{21}$ т).

До высоты примерно 60—80 км атмосфера находится, в хорошо перемешанном состоянии с практически постоянным составом; здесь выполняются законы локального термодинамического равновесия. Выше эти законы нарушаются. По этой причине обычно употребляемое универсальное понятие температуры на этих высотах теряет смысл. Для высот более 80—100 км обычно говорят о кинетической температуре.

Слои атмосферы. В атмосфере различают ряд слоев: *тропосферу* и *стратосферу*, разделенную переходным слоем, называемым *тропопаузой*, *мезосферу*, отделяемую от стратосферы *стратопаузой*, *ионосферу* и *термосферу*, отделяемую от мезосферы *мезопаузой*. Внешняя часть термосферы называется *магнитосферой*. В ней частицы газов (ионы) удерживаются не столько земным притяжением, сколько магнитным полем Земли. Кроме того, атмосферу делят на нижнюю атмосферу (тропосфера и тропопауза), среднюю атмосферу (стратосфера, мезосфера и мезопауза) и верхнюю атмосферу.

Тропосфера простирается от поверхности Земли до высоты примерно 16,3 км в тропиках (30° с. ш. и 30° ю. ш.) и до высоты 8,5—10 км вне этой зоны. В среднем повсюду в тропосфере температура убывает с высотой с вертикальным градиентом 6,5 °С на 1 км.
В тропосфере происходят основные процессы преобразования энергии Солнца в кинетическую энергию атмосферных движений, в скрытое тепло водяного пара. Здесь протекают основные фазовые переходы влаги, формируются облака и осадки. В тропосфере возникают крупномасштабные вихри - циклоны и антициклоны, - происходит непрерывный круговорот воды – испарение - конденсация пара - формирование осадков - формирование поверхностного стока рек и подземного стока.

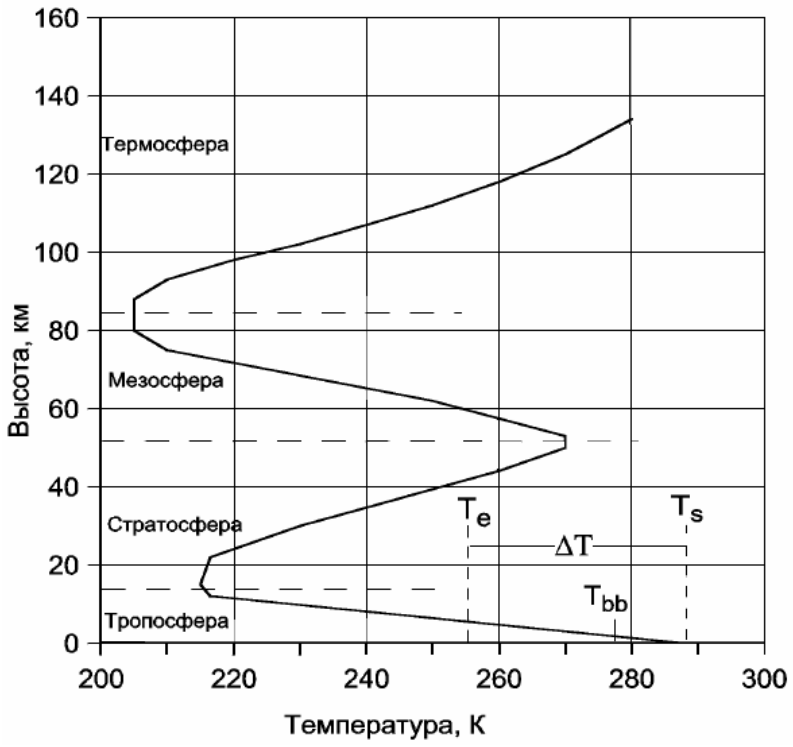


Рис. 1-4. Распределение температуры в атмосфере Земли.

Нижний пограничный слой атмосферы толщиной 1,0—1,5 км (в тропической зоне несколько больше) называют планетарным пограничным слоем (ППС), для которого определяющим фактором является турбулентное трение. В ППС происходит обмен импульсом, теплом и влагой между подстилающей поверхностью (поверхностью суши и поверхностью океана) и атмосферой. Наиболее активно эти процессы протекают в нижней части ППС, толщиной около 30—50 м. Этот слой называют приземным (приводным) слоем. Переходный слой - тропопауза отделяет тропосферу от стратосферы, в которой

температура изменяется до высоты примерно 34—35 км. Здесь наблюдается большая устойчивость, которая допускает только очень слабые вертикальные движения и перемешивание, что важно, в частности, для распределения в стратосфере малых газовых примесей. Стратосфера обычно очень суха: на высоте 20 км над тропиками концентрация водяного пара составляет всего 2 млн$^{-1}$ (по объему), а над полярными широтами - около 5 млн$^{-1}$. Выше 35 км температура заметно повышается до высоты 50 км, где она - порядка 270 К.

Над стратопаузой расположена мезосфера, в которой температура понижается с высотой и достигает 160 К в ее верхней части. Это способствует конденсации водяного пара и образованию на высоте около 80 км так называемых мезосферных (серебристых) облаков. В мезосфере уже может быть повышенная ионизация - возникать так называемый *D-слой ионосферы*, довольно изменчивый со временем дня и сезоном, и зависящий сильно от активности Солнца (на высотах 70—90 км).

Мезопауза, расположенная на высоте примерно 85 км, отделяет мезосферу от простирающейся выше термосферы, в которой температура начинает резко возрастать с высотой до 2000 К в периоды большой солнечной активности и до1060 К при малой активности (ночью соответственно до 1300 и 730 К).

Термическую проводимость атмосферы характеризует коэффициент термической проводимости. Наибольшей термической проводимостью обладает тропосфера и ее нижние слои, наименьшей (в пределах деятельного слоя атмосферы) - тропопауза и нижняя стратосфера. Поскольку скорость звука определяется температурой, ее распределение с высотой также различно.

В термосфере, на высоте более 100 км, существенно меняется состав воздуха: распадаются все молекулы H_2O и CO_2 и значительная доля молекулы O_2 диссоциирует на атомы О. В этом слое усиливается ионизация частиц газов и возникает так называемый *слой ионосферы E*, а на еще больших высотах *слой F*. Движение частиц тут зависит и от приливных сил, создаваемых притяжением Солнца и Луны, в особенности в низких широтах.

Высота, км	Давление, гПа	Температура, К	Плотность кг/м^3	Молек. масса
0	$1.01\cdot10^{3}$	288	$1.23\cdot10^{0}$	28.96
5	$5.4\cdot10^{2}$	256	$7.36\cdot10^{-1}$	28.96
10	$2.65\cdot10^{2}$	223	$4.14\cdot10^{-1}$	28.96
20	$5.53\cdot10^{1}$	217	$8.89\cdot10^{-2}$	28.96
40	$2.87\cdot10^{0}$	250	$4.00\cdot10^{-2}$	28.96
60	$2.2\cdot10^{-1}$	247	$3.10\cdot10^{-4}$	28.96
80	$1.05\cdot10^{-2}$	199	$1.85\cdot10^{-5}$	28.96
100	$3.2\cdot10^{-4}$	195	$5.60\cdot10^{-7}$	28.40
150	$4.54\cdot10^{-6}$	634	$1.08\cdot10^{-9}$	24.10
200	$8.47\cdot10^{-7}$	855	$2.59\cdot10^{-10}$	21.30
300	$8.77\cdot10^{-8}$	976	$1.92\cdot10^{-11}$	17.73
400	$1.45\cdot10^{-8}$	996	$2.80\cdot10^{-12}$	15.98
500	$3.02\cdot10^{-9}$	999	$5.22\cdot10^{-13}$	14.33
600	$8.21\cdot10^{-10}$	1000	$1.14\cdot10^{-13}$	11.51

Для высот более 100 км дается кинетическая температура.

В термосфере метеоры в ней создают усиленную ионизацию и в то же время, распадаясь, образуют метеорную пыль, потоки солнечных протонов и электронов

вызывают полярные сияния и возмущения магнитного поля Земли, а также «внезапные ионосферные возмущения», нарушающие на Земле дальнюю радиосвязь.
Средние значения основных метеорологических величин на различных высотах приведены в таблице.

Мировой океан - глобальное связанное тело морской воды, окружающее континенты и острова. Почти три четверти (71 %) поверхности Земли покрыто мировым океаном.
Континенты и большие архипелаги разделяют мировой океан на пять больших частей (океаны):
- Атлантический океан
- Индийский океан
- Северный Ледовитый океан
- Тихий океан
- Южный океан

В России обычно не принято выделять Южный Ледовитый океан, однако в 2000 году Международный гидрографический союз принял разделение на пять перечисленных выше океанов: Атлантический, Индийский, Тихий, Южный и Северный Ледовитые. Аргументы в пользу такого решения состоят в том, что в южной части Атлантического, Индийского и Тихого океанов границы между ними весьма условны. В то же время воды, прилегающие к Антарктиде, имеют свою специфику, а также объединены Антарктическим циркумполярным течением.

История изучения.

Первыми исследователями океана были мореплаватели. Во время эпохи географических открытий были изучены очертания континентов, океанов и островов. Были созданы первые карты мира. В XVII и XVIII веках очертания береговой линии были детализированы, и карта мира приобрела современный вид. Однако глубины океана были изучены очень слабо.

Во второй половине XX века началось интенсивное изучение глубин океана. Методом эхолокации были составлены детальные карты глубин океана, были открыты основные формы рельефа океанического дна. Эти данные, объединённые с результатами геофизических и геологических исследований, привели в конце 60-х годов к созданию теории тектоники плит. Тектóника плит - современная геологическая теория о движении литосферы. Для изучения строения океанической коры была организована международная программа по бурению океанического дна. Одним из основных результатов программы стало подтверждение теории.

География океанов.

Глубочайшей точкой океана является Марианская впадина, находящаяся в Тихом океане вблизи Северных Марианских островов. Её максимальная глубина — 11022 м. Она была исследована в 1951 году британской подводной лодкой «Челленджер II», в честь которой самая глубокая часть впадины получила название «Глубина Челленджера».

Отклонения геоида (EGM96) ***от идеализированной фигуры Земли*** (эллипсоида WGS84). Поверхность Мирового океана - не всюду гладкая, например, на севере Индийского океана - понижена на ~100 метров, а на западе Тихого - поднята на ~ 80 метров.

Воды Мирового океана составляют основную часть гидросферы Земли - океаносферу. На воды океана приходится более 96 % (1338 млн. куб. км.) воды Земли. Объем пресных вод, поступающих в океан с речным стоком и осадками, не превышает 0,5 миллионов кубических километров, что соответствует слою воды на поверхности океана толщиной около 1,25 м. Это обуславливает постоянство солевого состава вод океана и

незначительные изменения их плотности. Единство океана как водной массы обеспечивается ее непрерывным движением, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. В океане, как и в атмосфере, нет резких природных границ, все они более или менее постепенны. Здесь осуществляется глобальный механизм трансформации энергии и обмена веществ, который поддерживается неравномерным нагревом солнечной радиации поверхностных вод и атмосферы.

Рельеф дна.

Большая часть дна океанов представляет собой ровные поверхности (рис. 1-5), так называемые абиссальные равнины. Их средняя глубина - 5 км. В центральных частях всех океанов расположены линейные поднятия на 1 - 2 км - срединно-океанические хребты, которые связаны в единую сеть. Хребты разделены трансформными разломами на сегменты, проявляющиеся в рельефе низкими возвышенностями, перпендикулярными хребтам.

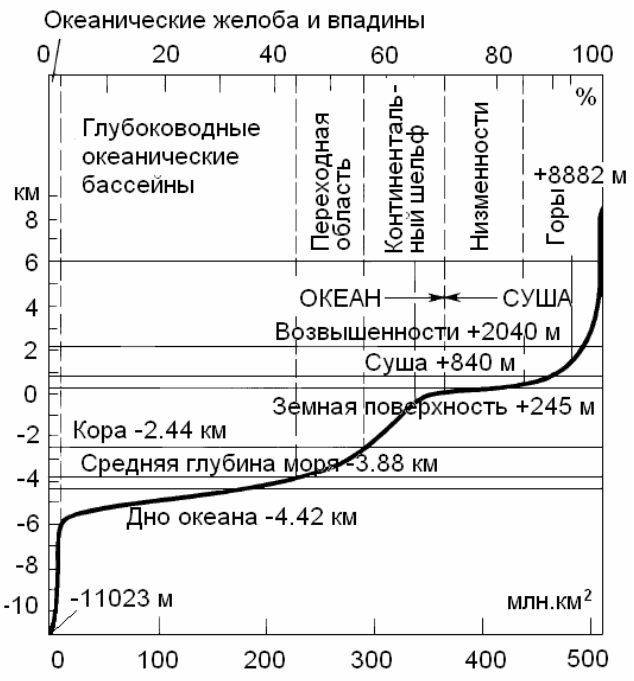


Рис. 1-5. Рельеф дна океанов и суши.

На абиссальных равнинах расположено множество одиночных гор, часть из которых выступает над поверхностью воды в виде островов. Большинство этих гор - потухшие или действующие вулканы. Под тяжестью горы океаническая кора прогибается и гора медленно погружается в воду. На ней образуется коралловый риф, который надстраивает вершину, в результате формируется кольцевидный коралловый остров - атолл.

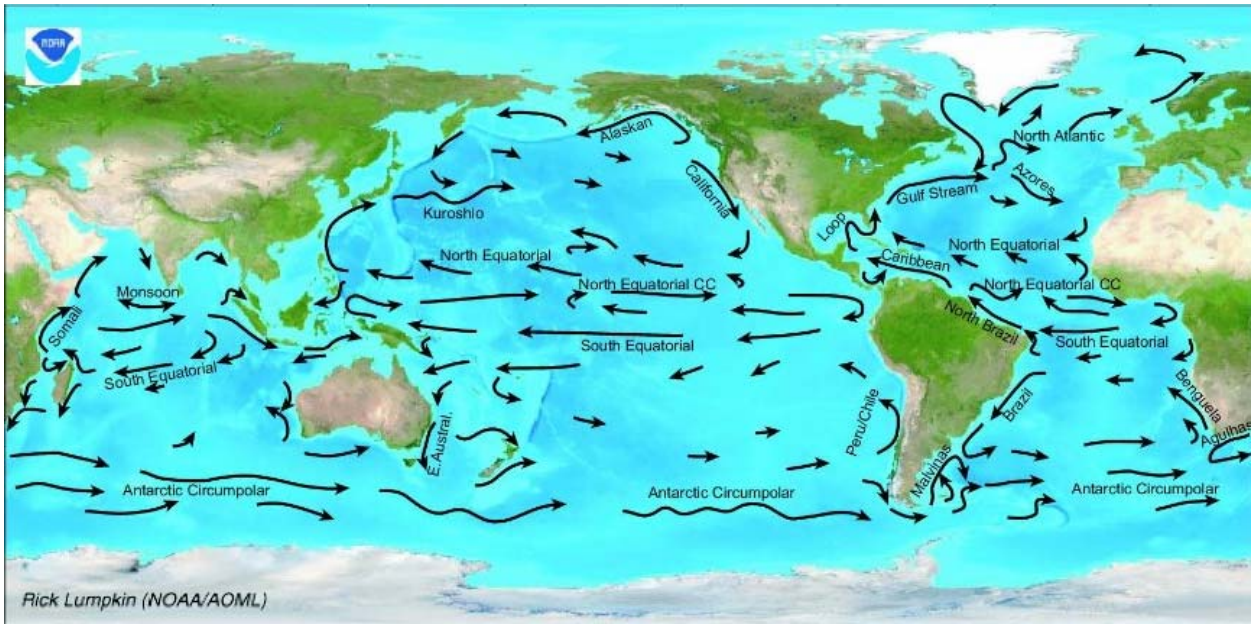
Если окраина континента пассивная, то между ним и океаном расположен шельф — подводная часть континента, и континентальный склон, плавно переходящий в абиссальную равнину. Перед зонами субдукции, там, где океаническая кора погружается под континенты, расположены глубоководные желоба - самые глубокие части океанов.

Морские течения - постоянные или периодические потоки в толще мирового океана и морей. Различают постоянные, периодические и неправильные течения; поверхностные и подводные, теплые и холодные течения. В зависимости от причины течения выделяются ветровые и плотностные течения.

Ветровые течения определяются направлением преобладающих ветров. Это всегда поверхностные течения, они образуются под совокупным влиянием сил трения, турбулентной вязкости, градиента давления, отклоняющей силы вращения Земли и др. К

числу сильнейших ветровых течений относятся Северное и Южное Пассатные течения, течение Западных Ветров и др. Теория ветровых течений была разработана шведом В. Экманом, русскими учёными В. Б. Штокманом и Н. С. Линейкиным, американцем Г. Стоммелом.

Морские течения — перемещения больших масс океанской воды - вызывают серьёзные изменения в климате многих стран.



Морские течения.

Климат.

Океан играет огромную роль в формировании климата Земли. Под действием солнечной радиации вода испаряется и переносится на континенты, где выпадает в виде различных атмосферных осадков. Океанические течения переносят нагретые или охлаждённые воды в другие широты и в значительной мере ответственны за распределение тепла по планете.

Вода обладает огромной теплоёмкостью, поэтому температура океана меняется гораздо медленнее, чем температура воздуха или суши. Близкие к океану районы имеют меньшие суточные и сезонные колебания температуры.

Происхождение Мирового океана является предметом идущих уже сотни лет споров. Считается, что в архее океан был горячим. Благодаря высокому парциальному давлению углекислого газа в атмосфере, достигавшему 5 бар, его воды были насыщены угольной кислотой H_2CO_3 и характеризовались кислой реакцией (pH ≈ 3-5). В этой воде было растворено большое количество различных металлов, в особенности железа в форме хлорида $FeCl_2$.

Деятельность фотосинтезирующих бактерий привела к появлению в атмосфере кислорода. Он поглощался океаном и расходовался на окисление растворенного в воде железа

Происхождение современных океанов связано с образованием срединно-океанических хребтов, разрастанием океанического дна и «маркировкой» этого процесса полосовыми магнитными аномалиями (рис.1-6). Возраст океанической коры определяется по возрасту полосовой магнитной аномалии. Под СОХ образуется астеносфера, глубина которой h связана с возрастом океанической коры зависимостью: $h \sim \sqrt{t}$.

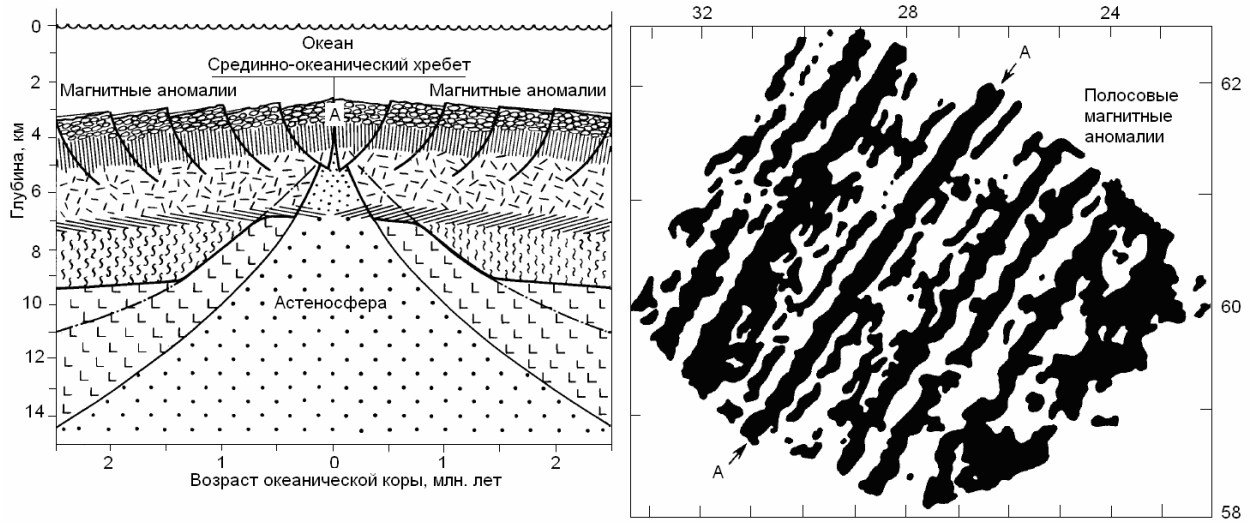


Рис. 1-6. Срединно-океанический хребет (СОХ) и полосовые магнитные аномалии. Ось АА - СОХ.

1. 2. Общепринятая модель эволюции Земли.

http://www.liveinternet.ru/users/3030706/post95179018/

Согласно современным научным предположениям около пяти миллиардов лет назад в газопылевом облаке, пронизанном магнитными силовыми линиями, образовалось сгущение - протосолнце, которое медленно сжималось. Другая часть облака с массой примерно в десять раз меньшей медленно вращалась вокруг него. В результате столкновений атомов, молекул и частиц пыли туманность постепенно сплющивалась и разогревалась. Так вокруг протосолнца образовался протяженный вращающийся диск, пронизанный магнитными силовыми линиями. В значительной его части происходило интенсивное конвективно-турбулентное перемешивание вещества. Это благоприятствовало быстрому перераспределению энергии, освобождающейся при гравитационном сжатии облака. В результате этого газопылевой диск существенно охлаждался.

Под действием светового давления легкие химические элементы водород и гелий "выметались" из близких окрестностей Солнца. И, наоборот, попадая на пылинки, световые лучи тормозили их движение вокруг Солнца. При этом пылевые частицы теряли свой орбитальный момент количества движения и приближались к Солнцу. Такой механизм торможения срабатывает даже в случае, если размеры частицы достигают нескольких метров. В конечном итоге это и привело к существенному различию в химическом составе планет, их разделению на две группы.

После достижения "критической" плотности пылевой диск распался на отдельные сгущения.

Далее в результате взаимных столкновений происходило слипание отдельных пылинок и образование твердых тел, для которых американский геолог Т. Чемберлин еще в 1901 году ввел название "планетезимали". По оценкам некоторых учёных превращение системы сгущений пыли в рой твердых тел продолжалось всего 100 000 лет на расстоянии Земли от Солнца и около 1 000 000 лет на расстоянии Юпитера. При этом масса планетезималей в области планет земной группы была значительно меньше, чем в области планет-гигантов. Все это время протосолнце проявляло очень высокую активность. При мощных вспышках оно выбрасывало потоки заряженных частиц, которые, при движении вдоль магнитных силовых линий, переносили момент количества движения от Солнца к протопланетному облаку. Кроме того, благодаря столкновениям высокоэнергичных легких частиц (протонов и нейтронов) с веществом протопланетного облака, происходили определенные ядерные реакции. Именно таким путем и образовался большой избыток

легких химических элементов - лития, бериллия и бора, которых в земной коре и метеоритах значительно больше, чем в атмосфере Солнца.

В результате взаимных столкновений планетезималий происходил рост одних и дробление других. Со временем орбиты крупнейших из них приближались к круговым, а сами они превращались в зародыши планет, объединяя все окружающее вещество. Расчеты показывают, что рост Земли до современных размеров продолжался всего 100 миллионов лет.

Выпадение отдельных сгущений на Землю и ее сжатие привели к постепенному разогреву ее недр. На момент сформирования Земли температура в ее центре не превышала 800 К, на поверхности 300 К, а на глубине 300-500 км около 1500 К. Со временем все большую роль здесь играли процессы радиоактивного распада, при которых выделялось значительное количество энергии. В результате этого отдельные области земных недр разогрелись до температуры плавления превышающей 4000 ^{o}C.

В дальнейшем после остывания примерно до 3000 ^{o}C тяжелые элементы сконденсировались, перейдя в жидкое состояние; при этом образовалось земное ядро из железа с примесью никеля. Более легкие металлы "всплыли наверх", т. е. в наружные слои, и образовали более холодную и большую по размерам "мантию". Этот начальный этап формирования земной коры продолжался около 1 миллиарда лет.

Затем, когда температуры упали приблизительно до 1000 ^{o}C, стала формироваться тонкая твердая, но подвижная земная кора. Благодаря слагающим ее древнейшим "горным породам" на Земле сохранилась "летопись" последующих событий, происходивших в течение ее долгой эволюции. В период между 3,7 и 2,2 миллиарда лет назад земная кора охладилась до температуры кипения воды. Теперь уже водяной пар мог конденсироваться из первоначальной атмосферы, которая содержала также аммиак, метан и двуокись углерода. В то время как на экваторе вода кипела, на полюсах мог идти дождь. "Вторичная" атмосфера, богатая кислородом, смогла установиться только по прошествии еще 0,5 - 2 миллиарда лет

Поскольку тогда еще не существовало защитного озонного слоя, интенсивное ультрафиолетовое излучение Солнца стимулировало протекание химических реакций. Происходили сильные извержения вулканов. Формировались океаны и континенты. В течение последнего миллиарда лет континенты стали "дрейфовать", а магнитные полюса - "блуждать". Было время, когда в Гренландии росли магнолии, кораллы встречались в арктических морях, а ледники покрывали пространства Бразилии и Конго.

В последние 500 миллионов лет Северный магнитный полюс, никогда не удалявшийся от географического полюса (оси вращения Земли), двигаясь по какой-то неправильной траектории, сместился из своего прежнего положения в Тихом океане приблизительно в его современное местоположение, мало изменившееся за последние 60 миллионов лет (?).

Временами происходили также непонятные изменения магнитной полярности (северная - на южную) (?). Возможно, они были как-то связаны с изменениями в характере течения вещества в жидком железном ядре Земли.

Приблизительно 500 миллионов лет назад три континента, называемые сейчас Северной Америкой, Европой и Азией, располагались вдоль экватора, тогда как четвертый гигантский континент находился в Южном полушарии и позднее превратился в Южную Америку, Африку, Австралию, Индию и Антарктиду. Первую группу материковых масс геологи назвали Лавразией, а вторую - Гондваной. Еще через 400 миллионов лет эти две группы слились в единый "суперконтинент", называемый теперь Пангеей. В то время столкновение Африки и Северной Америки привело к вздыманию Аппалачских гор, имевших 14-километровую высоту (?); теперь это старые и разрушенные горы. То была "эра земноводных", предшествовавшая появлению рептилий

и динозавров. Еще через 200 миллионов лет суперконтинент начал раскалываться, разделяясь на северную и южную части.

В течение последних 130 миллионов лет Африка три раза сталкивалась с Европой и "отскакивала" от нее, что привело к образованию Альпийских гор, вулканов и возникновению сильных землетрясений. Южная Америка начала отделяться от Африки, вероятно, 100 миллионов лет назад и соединилась с Северной Америкой лишь приблизительно 4 миллиона лет назад (?). Атлантический океан теперь расширяется, а Тихий сужается.

На ранней стадии своего развития протоземля была окружена облаком небольших спутников, радиусы которых достигали 100 км. Со временем из них на расстоянии около 10 земных радиусов (60 000 км) сформировалась Луна (?). Одновременно началось ее медленное удаление от Земли, которое продолжается и теперь. Оно сопровождается уменьшением скорости вращения Земли вокруг своей оси.

Вообще же современные научные представления о внутреннем строении Земли опираются на четыре считающиеся бесспорными тезиса: внутреннее ядро радиусом около 1300 км, в котором вещество, по всем данным, находится в твердом состоянии; внешнее ядро, радиус которого равен примерно 3400 км; здесь в слое толщиной около 2100 км, окружающем внутреннее ядро, вещество находится в жидком состоянии; оболочка или мантия толщиной около 2900 км и кора, толщина которой равна 4-8 км под океанами и 30-80 км под материками. Кора и мантия разделены поверхностью Мохоровичича, на которой плотность вещества земных недр резко возрастает от 3,3 до 5,2 г/см^3.

О прочем же можно говорить с той или иной степенью вероятности. Взять, к примеру, температуру в глубинных недрах Земли. Давно подмечено, что по мере спуска в шахты через каждые 33 метра температура повышается на 1^o. Зная радиус Земли, нетрудно подсчитать, что в таком случае температура в самом ее центре должна достигать 60 000 К. У ученых эта цифра вызывает большие сомнения (хотя получена она вполне научными методами), и они снижают ее в 10-20 раз.

Такие же расхождения существуют в представлениях о плотности и давлении в центре Земли, и о распределении химических элементов и т.п. Да и господствующая концепция первоначального огненно-жидкого ядра Земли, хотя и подтверждается наглядно вулканической деятельностью, не дает вразумительного ответа на вопросы, как это огненное ядро в свое время возникло, и почему Земля быстро не остыла в соответствии с законами термодинамики.

Приведенная здесь схема развития Земли (аналогично формировались и другие планеты) - лишь одна из возможных гипотез, детально разъясняющих, как именно планеты и Солнце образовались из одного газопылевого облака и что сами планеты сформировались из роя холодных и твердых тел.

Касаясь возникновения жизни на Земле в 1978г М. Харт, анализируя влияние астрономических факторов на возникновение жизни на Земле, ввел понятие *зоны обитаемости* в зависимости от удаления от центральной звезды. По его оценкам приближение Земли на 5% к Солнцу создаст условия, аналогичные венерианским, а удаление от Солнца на 5% приведет к глобальному оледенению планеты. Через 15 лет Ж. Ласкар (Бюро долгот, Франция) показал, что к этим условиям необходимо добавить требование стабилизации инсоляции - потока солнечного тепла на единицу поверхности. Количество тепла, передаваемого высоким широтам, является важнейшим климатическим фактором, который управляет ростом полярных шапок и наступлением ледниковых периодов.

Тем не менее, природа нашей собственной Солнечной системы по-прежнему остается для нас загадкой. Традиционное объяснение происхождения планет, согласно

которому планеты образовались в процессе конденсации облаков космической пыли и газа, имеет под собой довольно шаткий фундамент, так как уравнения, описывающие взаимодействие газа в этих облаках, до сих пор не решены. В этой связи В. Мак-Рей, профессор университета в Суссексе, бывший президент Королевского Астрономического общества, пишет: "Проблема происхождения Солнечной системы продолжает оставаться, пожалуй, самой значительной из всех нерешенных проблем астрономии".

Кроме того, систематизировав факты, были обнаружены некоторые закономерности: почему природные процессы на Земле происходят циклически и каков механизм этой цикличности? Главная идея, отстаиваемая возникшей в 60-е годы 20-го столетия - астрогеологии, заключается в том, что вся структура рельефа земной поверхности и геологического строения земной коры сформирована и обусловлена неравномерностями многообразных движений планеты, происходящих в поле силы тяжести. Главные из этих движений - вращение вокруг оси. Кроме этого - движение по орбите вокруг Солнца, а также периодичность приливных волн, охватывающих не только гидросферу, но и твердую Землю. Все они - создают в теле планеты сложное неравномерное поле напряжений, которое и вызывает, по мнению сторонников этой концепции, все многообразие тектонических движений и деформаций, т.е. эволюция Земли подчиняется воздействию внешних по отношению к Земле сил, - и эти силы воздействуют на неё как на космическое тело, движущееся по определенным законам. В конце XlX в. французский ученый, иностранный член Петербургской АН М.А. Бертран эмпирически впервые выделил ряд геологических циклов: каледонский, герцинский и альпийский. Они охватывают три основные эпохи горообразования за последние 550 млн. лет, приведшие к созданию на Земле трех самостоятельных систем складчатых структур. Продолжительность каждого цикла Бертрана - около 170 млн. лет. Впоследствии немецкий геолог Х. Штилле выделил внутри каждого из этих циклов фазы тектономагматической активности.

Не остаются постоянными также напряженность и полярность геомагнитного поля: существуют интервалы длительного сохранения его знака (суперхроны – около 30-40 млн. лет), быстро изменяющиеся полярности - инверсии (примерно 1-2 млн. лет), а также ещё более короткие - экскурсы. Несмотря на то, что во времени магнитное поле Земли меняется неравномерно, периоды его крупных изменений совпадают с циклами экстатических (вызванных процессами в самом морском бассейне) колебаний уровня океана, а также глобальных вариаций тектономагматической активности земных недр.

Вместе с тем в истории планеты специалисты установили смену холодных климатических периодов более теплыми и отметили корреляцию климатических циклов с геологическими – вулканизмом, горообразованиями др.

Периодичность природных процессов – объективный факт. Что же управляет периодичностью и является первопричиной? Существует несколько концепций, среди которых:

1) Модель «тепловой машины». Из неё следует, что тепло, выделяемое при распаде радиоактивных элементов внутри Земли, разогревая недра, создает там тепловую и гравитационную конвекцию перераспределения масс. Последняя проявляется в геологических процессах на поверхности, а они, в свою очередь, влияют на климат и условия обитания органического мира, но совершенно не описывает орбитальное движение планеты, тектонику литосферных плит. Открытым остается вопрос и о механизме генерации геомагнитного поля, и причинах цикличности различных его

параметров. А происходит это потому, что совершенно игнорируются влияния на них системы Земля-Луна.

2) Модель приливной эволюции Земля-Луна-Солнце соответствует общим закономерностям движений тел Солнечной системы, а также объясняет цикличность поверхностных и глубинных земных процессов. Следовательно, размер орбиты Земля-Луна изменяется циклически, значит, в определенные интервалы времени спутник находился от нашей планеты дальше или ближе. Если ближе – угол наклона экватора к эклиптике меньше современного – наступает похолодание; если дальше – угол наклона больше – потепление.

Периоды, разделяющие последовательные оледенения, составляют 200-250 млн. лет. Приняв эту величину за продолжительность цикла и зная скорость вращения Земли и орбитальную скорость Луны, а также величину изменения кинетической энергии вращения, можно оценить диапазоны следующих изменений: расстояние Земля-Луна; угол наклона экватора к эклиптике, продолжительность суток. Внутренняя структура земных недр также связана с циклическими изменениями скорости вращения Земли и угла наклона к экватору.

Численное моделирование поведения системы Земля–Луна на интервале 20 млн. лет в прошлое и 10 млн. лет в будущее, - показало, что наклон оси вращения Земли колеблется около среднего значения 23.3° с амплитудой 1.3° . Это может вызвать на широте 65° колебания инсоляции - на 20%. Такие изменения потока солнечного тепла, в принципе, могут вызывать существенные климатические изменения, например, оледенения.

Перераспределение воздушных и водных масс, рост или уменьшение ледникового покрова в высоких широтах ведут к изменению динамического сжатия Земли. А это ведет к изменению скорости прецессии оси вращения Земли. Напомним, что прецессия вызывается притяжением экваториального избытка массы Земли Луной и Солнцем и возмущениями гелиоцентрического движения Земли со стороны планет. В современную эпоху скорость прецессии составляет 50.4712" в год.

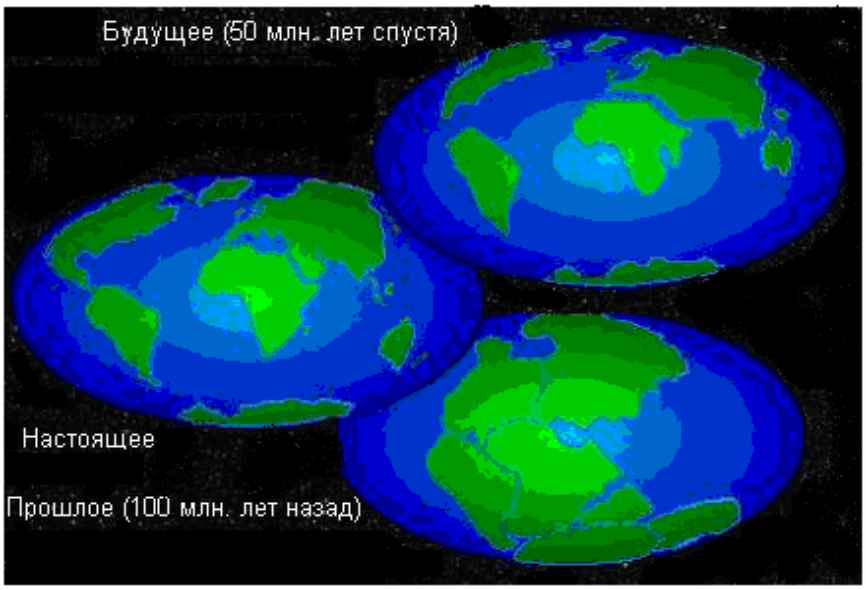


Рис. 1-7. Модель эволюции Земли.

3) Модель "галактических нырков". В журнале Nature в 2005 году, говорилось, что число разновидностей земных организмов заметно снижается каждые 62 миллиона лет, и эта закономерность прослеживается на протяжении, по крайней мере, последних 542 миллионов лет. Было замечено, что эта временная шкала практически совпадает с 64

миллионами лет, которые Солнечной системе требуются на преодоление вертикального отрезка - то есть диска Галактики - туда и обратно. Выясняется, что большинство глобальных биологических катастроф приходится на те периоды, когда Солнечная система находилась в крайней северной точке цикла, а эта точка расположена приблизительно на 230 световых лет выше галактической плоскости. По-видимому, в подобных обстоятельствах в атмосферу Земли проникает больше галактических космических лучей, которые и приводят к массовым вымираниям живых организмов. "Когда Солнце проходит сквозь галактическую плоскость, поток космических лучей растет, а когда оно оказывается ниже этой плоскости, он уменьшается", - поясняет Михаил Медведев из Канзасского университета в Лоренсе (США). Периоды высоких "приливов" внегалактических космических лучей и наблюдаемые провалы в биологической вариативности настолько хорошо накладываются друг на друга, что шанс на простое совпадение оказывается исчезающе мал - один на 10 миллионов.

1. 3. О некоторых ошибках и заблуждениях общепринятой модели холодной Земли.

Современная модель описана во всех книгах и статьях, имеющих отношение к физике Земли. Практически все авторы повторяют одно и тоже, встретить работу, в которой бы критиковались основные положения модели, (в противоположность предыдущему параграфу) – это редчайший случай. Естественно, в настоящее время каждому явлению или процессу, происходящим в недрах Земли, найдено объяснение. Казалось бы, ясно и нет проблем. Оказывается, что не так всё гладко…

Если рассмотреть проблему устройства Земли, других планет и спутников Солнечной системы, и сопоставить модель с огромным накопленным наблюдательным материалом, то вся кажущаяся стройность такой науки, как «физика Земли», рассыпается как пресловутый «карточный домик».

Геодинамика. Рассмотрим некоторые, наиболее яркие «несогласия» между т.н. «теорией Земли» и реально наблюдаемыми фактами…

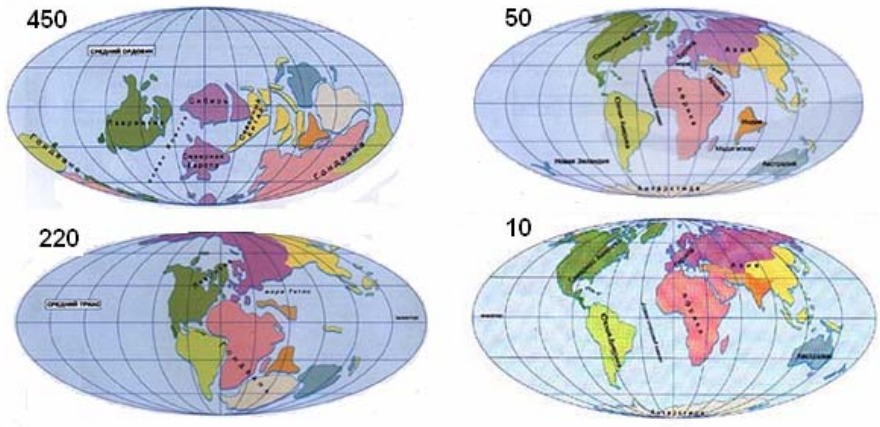


Рис.1-8. Разрыв Гондваны и этапы раздвижения материков: цифры в млн. лет.

Начнем с наиболее неправдоподобного примера, касающегося основного постулата тектоники плит. Как известно, Вегенер в 1915 обнаружил, что береговые линии некоторых материков удивительно совпадают друг с другом, что если материки приблизить один к другому, то они сомкнутся. Вегенер высказал идею, что все современные материки раньше представляли собой некий единый материк. Этот материк (Гондвана, Пангея) потом раскололся и его «остатки» - современные материки отодвинулись друг от друга, за счет работы спрединга и глобальной конвекции в мантии. Этот рисунок, (рис. 1-8) - фигурирует во всех книгах и даже в школьных учебниках. Легко показать, что это ошибка и заблуждение. Впервые это продемонстрировал Мезервей (Meservey, 1969) на страницах

журнала Science. С тех пор прошло 40 лет, но я не встретил ни одного опровержения идеи Мезервея. Геологи на этот факт - не обратили внимание.

На рис. 1-9-a изображена ситуация, аналогичная приведенной на рис.1-8 (220). Рисунок 1-9-b показывает невозможность такой ситуации на Земле современного радиуса. Именно в этом состоит парадокс Мезервея. Рассмотрим суть парадокса чуть подробнее.

На рис. 1-8 показана схема разделения материков (рис. 1-7). Эта схема никогда не подвергается сомнению, более того, она помещена в школьные учебники. Кажется совершенно невозможным, чтобы то, что изображено на рис. 1-8, оказалось ошибкой. И, тем не менее, это действительно так.

Суть идеи Мезервея состоит в том, что “соединение” материков в Гондвану, в которой Африка, Южная и Северная Америки, Австралия и Антарктида образуют единый праматерик, невозможно на земном шаре, имеющем радиус, равный современному. Мезервей обратил внимание на то, что материки, расположенные по берегам Тихого океана, не могли 200 млн. лет тому назад (по данным магнитной стратиграфии) находиться друг от друга на расстояниях, больших, чем в настоящее время (рис. 1-9). Для того чтобы образовать Гондвану (рис. 1-9-a), этим материкам пришлось бы двигаться вдоль по направлениям, показанным на рисунке 1-9-b, увеличив примерно вдвое площадь поверхности Тихого океана, что противоречит палеореконструкциям. Как показано многими авторами, материки можно «уложить» один к другому практически без зазоров на шаре радиусом, точно равным радиусу внешнего ядра Земли (рис. 1-9-c). Для убедительного доказательства этого факта, доктор Фогель (Vogel, 1994) изготовил прозрачный глобус, внутри которого на шаре, эквивалентном шару внешнего ядра, располагались те же самые материки, что и на самом глобусе. Глобус Фогеля демонстрирует, как изменялось положение материков, от начального, в момент образования Земли – до современного. Такую картину можно наблюдать на сайте: http://www.youtube.com/watch?v=7kL7qDeI05U

Наши рассуждения по поводу геодинамики и дрейфа материков приводят к однозначному выводу. Регистрируемый дрейф материков возможен только на расширяющейся Земле. Эта проблема будет рассмотрена подробнее в главе 17.

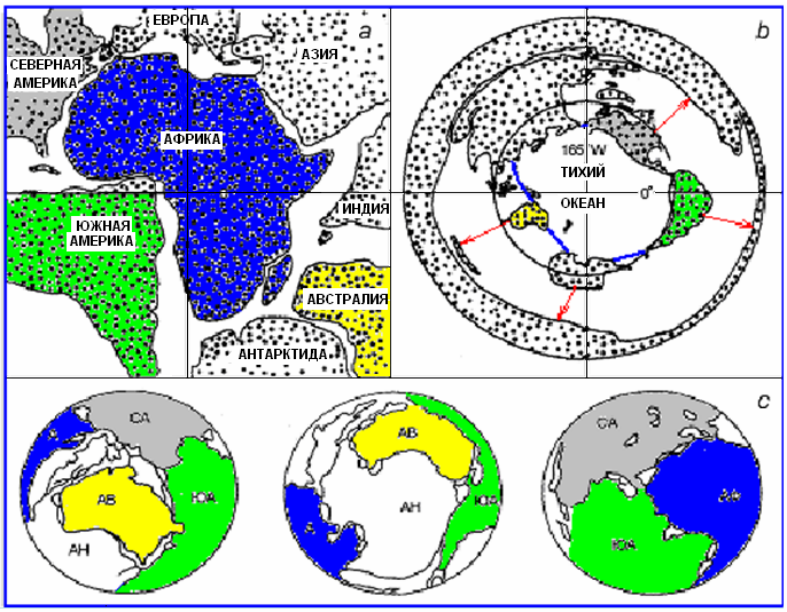


Рис. 1-9. Вверху слева – соединение материков в Гондвану; справа – интерпретация этого факта Мезервеем. Внизу: расположение материков на внешнем ядре Земли.

Океаны. Ещё один важный вывод, следующий из рис. 1-9, состоит в том, что расширение Земли непосредственно связано с образованием и увеличением объёма современных океанов. Данные по времени и скорости образования океанов основываются на использовании методов магнитной стратиграфии. Суть метода состоит в том, что современная океаническая кора формировалась за счет деятельности вулканических магматических процессов в так называемых срединно-океанических хребтах (СОХ). Раскаленная магма, - изливаясь из СОХ и остывая, «запоминала» полярность существовавшего в это время геомагнитного поля, формируя, таким образом, - полосовые магнитные аномалии (как правило, направленные параллельно СОХ) на океаническом дне. Каждая магнитная аномалия образовалась в «свое» время и имеет свой порядковый номер в общей номенклатуре аномалий. Зная номер полосовой магнитной аномалии можно определить возраст океанического дна в данной точке. Этот метод используется для изучения механизмов образования океанов.

В течение «последних» примерно 200 млн. лет эволюции Земли на ней произошли гигантские по масштабу изменения, равных которым не было за весь предыдущий период её развития. Произошло образование современных океанов и разделение материков. Надо заметить, что это не означает, что до этого периода на Земле не было океанов. Конечно, нет, более того, в эволюции Земли были периоды, когда практически вся её поверхность была под водой. Однако в последнем случае резкое увеличение впадины океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Рудич (1984) приходит к выводу, что увеличение впадины океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Он обращает внимание на то, что *с позиций мобилистских концепций, невозможно объяснить крупное приращение объема Мирового океана,* т.к. мобилистские гипотезы исключают возможность заметного изменения объема Мирового океана в течение последних 160 млн. лет.

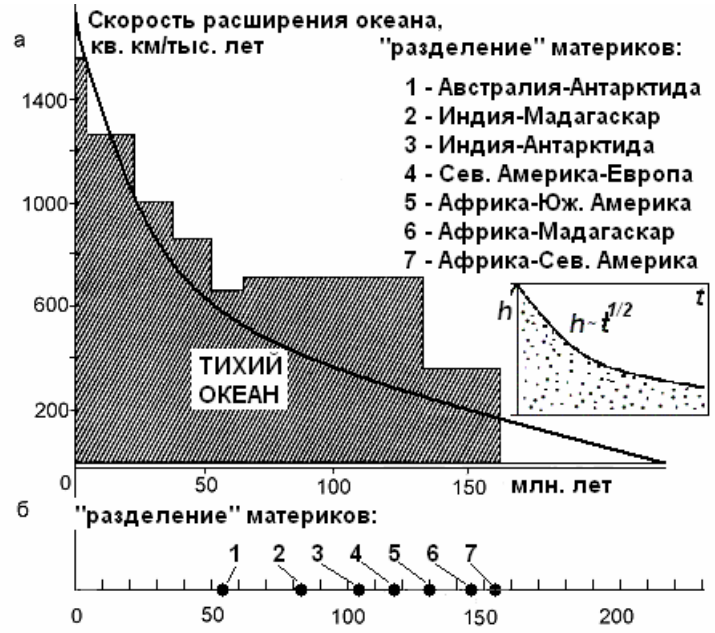


Рис. 1-10. Скорость расширения океанов (на примере Тихого океана) – а. Время разделения Пангеи на материки – б. На вставке – зависимость глубины астеносферы от времени образования океанического дна в районе СОХ.

Рисунок 1-10 показывает, как происходило расширение океанов. Здесь приведены данные только по Тихому океану. Аналогичный вид имеют данные по скорости расширения Атлантического, Индийского и Северного Ледовитого океанов. Различие только в цифрах. Сплошная линия (на рис. 1-10) линия служит некоторым усреднением скорости. Она практически совпадает с кривой зависимости глубины астеносферы h от возраста океанического дна t: $h \sim t^{1/2}$ (на вставке, рис. 1-6). Кстати, последняя зависимость не получила объяснения в рамках современного мобилизма. На этом же рисунке показаны даты (в млн. лет), когда началось разделение материков. Данные по расширению дна океанов и разделению материков получены с помощью методов, развитых в магнитной стратиграфии, заметим, – весьма объективных.

Может ли ядро Земли быть железным? Принято считать, что ядро Земли железное, внутреннее – в кристаллическом состоянии, внешнее – жидкое. В некоторых работах авторы считают, что железо должно быть с примесью никеля, в других – частично в окисленном состоянии (ядро заржавело!), но это не принципиально. Плотность железа и скорость продольных сейсмических волн при температуре и давлении, характерным для внутреннего ядра Земли действительно примерно соответствуют этим параметрам (рис. 1-11). Однако, как было экспериментально определено совсем недавно, скорость сдвиговых (S) волн в железе возрастает при повышении давления и температуры аналогично тому, как это происходит с продольными (P) волнами. Короче, коэффициент Пуассона (σ) железа остается неизменным и равным $\sigma = 0.28$ в широком диапазоне температур и давлений, вплоть до параметров, характерных для G-ядра. (Коэффициент Пуассона определяется отношением объемных модулей сжатия, иначе, отношением скоростей сейсмических волн). Недавно была измерена скорость сдвиговых волн, проходящих через внутреннее ядро Земли. Полученные данные позволили более точно оценить коэффициент Пуассона внутреннего ядра ($\sigma = 0.44$), который оказался значительно выше, чем у железа. Можно было бы перечислить и ряд других соображений о невозможности существования железного ядра в общепринятой его модели.

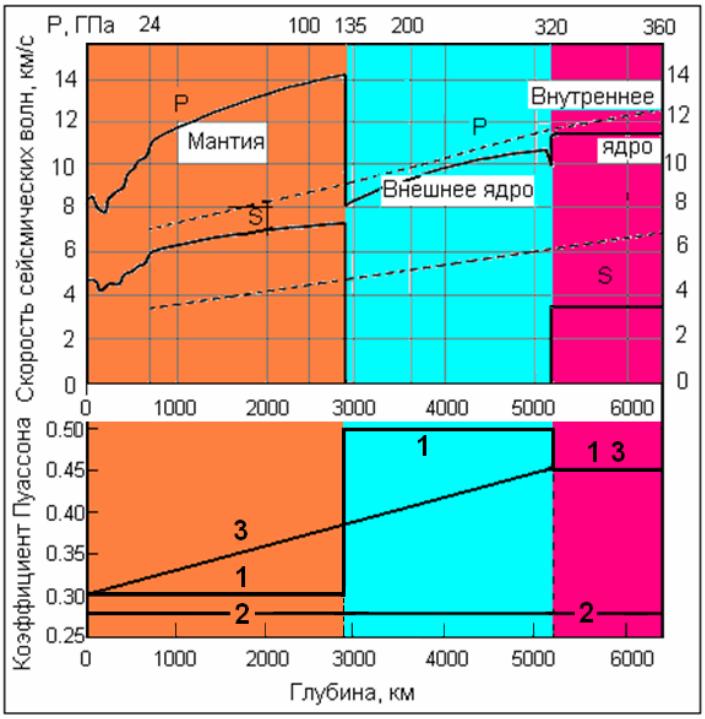


Рис. 1-11. Распределение скоростей сейсмических волн по радиусу Земли (вверху). Штриховые линии – распределение скоростей упругих волн в железе от внешнего давления на монокристалл железа. Глубина соответствует литостатическому давлению.

Внизу – коэффициент Пуассона: 1 – в Земле, 2 – в железе (по экспериментальным данным Мао и др.), 3 – в железе (по данным ударных экспериментов Брауна и Мак-Куина).

Может сложиться впечатление, что такой принципиально важный вывод о том, что ядро не может быть железным, базируется не на очень убедительном аргументе. В подтверждение этого вывода, приведем дополнительные аргументы, для чего рассмотрим известные данные о вязкости вещества ядра, а также некоторые временные параметры геомагнитного поля, такие как инверсии, экскурсы, джерки и, связанная с этими явлениями, - величина электропроводности внешнего ядра (глава 13).

Прежде чем коснуться проблемы генерации геомагнитного поля, заметим, как указывается во многих учебниках по геомагнетизму, что А.Эйнштейн считал эту проблему наиболее важной среди пяти других наиважнейших проблем физики. По всей видимости, есть основание считать, что эта проблема ещё не решена. К такому выводу можно прийти, если учесть, что современные представления о природе геомагнетизма, базирующиеся на идее магнитного динамо, не способны найти объяснение перечисленным выше данным. Согласно модели динамо, вязкость расплавленного железа должна быть примерно такой, как у воды, а электропроводность, такой как у железа. Вязкость вещества жидкого железа, оцененная по астрономическим данным, - на порядки выше, чем принимаемые значения в модели динамо. И ещё, если бы электропроводность вещества внешнего ядра была такой как у железа, то временные вариации магнитогидродинамических процессов в ядре не должны быть меньше чем 10^5 лет. С учетом величины электропроводности и местоположения источника генерации, различные авторы называют минимальное время переполюсовки (инверсии) поля порядка 5000 лет. Реально, наблюдаемое время вековых вариаций геомагнитного поля значительно (на два порядка) меньше, что противоречит общепринятой схеме генерации. Дело в том, что при принятой в модели генерации геомагнитного поля электропроводность жидкого железа внешнего ядра ограничивает длительность быстрых процессов, происходящих в ядре величиной в 100 тыс. лет. Более того, сам факт смены полярности поля не следует из модели динамо. Здесь можно добавить, что магнитное поле существует у многих планет, не имеющих железного ядра (Юпитер, Сатурн и др.), или существовало ранее, например, у Луны и Марса.

В настоящее время безусловное предпочтение отдается гипотезе железного ядра. Согласно этой гипотезе, внешнее ядро состоит из расплавленного железа, а внутреннее – из твердого. Отметим, что Б. Гуттенберг еще 40 лет назад написал слова, которые не потеряли своей актуальности и в наше время: “Будущие наблюдения и теоретические исследования вещества, составляющего ядро, при давлениях 1.5-3.5 млн. атм. И температурах в несколько тысяч градусов Цельсия, могут привести к изменению прежних взглядов” (Гуттенберг, 1963, стр. 142).

Какие же возражения можно привести против идеи железного ядра? Перечислим некоторые из них:

- Плотность внутреннего (G, по Буллену) ядра ниже, чем плотность железа при условиях, существующих в области внутреннего ядра.
- Скорость S-волн в G-ядре очень мала и, если бы там было железо, то она должна бы быть около 6 км/с.
- Скорость P-волн практически не возрастает к центру Земли (см. рис. 1-2), оставаясь постоянной вдоль радиуса ($v_p^2 = dp/d\rho$, что не характерно для конденсированного вещества, а соответствует состоянию сжимаемого газа, т.к. скорость звука в газе практически не зависит от p и ρ, которые однозначно связаны друг с другом.
- Практическое совпадение измеренной величины скорости S-волн с вычисленной по модели Земли и уравнению Адамса и Вильямсона означает, что внешнее (E) ядро и

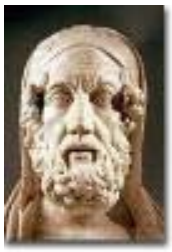
внутреннее (G), состоят из одного вещества. Однако вязкость вещества внешнего ядра, оцененная по астрономическим данным, значительно (на несколько порядков) больше, чем измеренная в лабораторных условиях вязкость расплавленного железа.
- Принятая, в соответствии с моделью динамо, электропроводность вещества ядра Земли находится в противоречии с наблюдаемыми временами вариаций геомагнитного поля.
- Внутреннее ядро не может быть кристаллической фазой вещества внешнего ядра, т.к. такой экзотермический процесс кристаллизации без отвода тепла из центра Земли термодинамически не возможен.

Земля открытая диссипативная, самоорганизующаяся структура, включающая два фазовых перехода: конденсацию и кристаллизацию. В системе, на фазовых переходах происходит постоянный рост энтропии. Энтропия центральной части Земли, где, согласно нашей модели, находится вещество в газообразном, плазменном состоянии, должна быть самой большой, и она должна скачком уменьшаться в области фазовых переходов, по мере увеличения радиуса Земли при перемещении от центра к периферии. Этому очевидному правилу из необратимой термодинамики противоречит модель кристаллизации внутреннего ядра внутри расплавленного железного внешнего ядра.

Чтобы железо было твердым, необходимо, чтобы температура внутреннего ядра была бы ниже, чем температура внешнего, что представляется абсурдным даже разработчикам модели холодной Земли. Поэтому в принятой холодной модели используется адиабата Пуассона. Это неверно, т.к. адиабата Пуассона характеризует только идеальный газ, участвующий в бездиссипативных процессах, что не может быть применено для Земли. В оценках температурного хода в недрах Земли необходимо пользоваться адиабатой Гюгонио, и т.п.

1. 4. Как изменялись представления о Земле по мере развития науки.

Ранние гипотезы. Проблему внутреннего устройства Земли по праву можно считать одной из древнейших и наиболее актуальных для человечества. Естественно, еще самые древние мыслители задумывались над тем, как устроена Земля и изобретали на эту тему подчас совершенно невероятные, на наш взгляд, модели. Согласно **Гомеру** [900 лет до н.э.], Земля представляла собой выпуклое блюдо, окруженное Океаном. Впервые о том, что Земля шар, стали говорить в древней Греции примерно 600 лет до н.э. Аристотель [350 лет до н.э.] знал точные размеры Земли. Оценкой размеров Земли занимались арабы, а так же в Египте и Китае. Со времен Аристарха [300 лет до н.э.] ведется дискуссия о суточном вращении Земли. Впервые идея о сплюснутости Земли была высказана географом Страбоном в 5 г. до н.э. Внутреннее устройство Земли всегда интересовало древних ученых. Наблюдения за вулканами и ростом температуры при спуске в шахты, привели их к выводу о том, что недра Земли горячие.



Модель горячей Земли была высказана впервые **Рене Декартом** в книге "Начала философии". Согласно Декарту, Земля состоит из шести оболочек. Внутри находится огненное ядро, имеющее ту же природу, что и Солнце. Ядро окружено плотным веществом, не встречающимся на Земле, затем следует земная кора, в которой образуются металлы. Поверхностная каменная оболочка частично скрыта водой. Шестая оболочка, это воздух. Землетрясения и вулканизм, по Декарту, обязаны как действию “центрального огня”, так и обрушениям каменной оболочки. Представления Декарта о Земле, состоящей из оболочек и центрального ядра, не утратили актуальности до наших дней.

Исследования Г.Лейбница, изложенные им в сочинении “Протогеа” [1639], принято считать развитием идей Декарта. Земля, по Лейбницу, образовалась из огненного расплава, а затем на её поверхности выделились шлаки. Рельеф Земли, у Лейбница, формировался за счет влияния центрального ядра и обрушений поверхности. Г. Лейбница, как и Р. Декарта, принято считать “плутонистами”.

О внутреннем, огненном ядре писал англичанин Т. Бернет. Земля, по его модели [1689], была горячей и состояла из четырех оболочек. Нетрудно и здесь видеть влияние Декарта. Огненное ядро у Земли предполагали: англичанин В.Уайстон [1789], француз В. Мелле [1748], датчанин Н. Стенон [1669] и другие. Всех их можно считать последователями Декарта - плутонистами. Идею горячей расплавленной Земли поддерживали англичанин Р. Гук [1705], у которого причиной землетрясений и горообразования был подземный огонь. По представлениям итальянца А. Моро [1751], центральная часть Земли огненно-жидкая и она окружена каменной оболочкой. Моро считают плутонистом и прямым предшественником Л. Буха и А. Гумбольта.

В 1672 г. Рише обнаружил, что часы, верно отсчитывающие секунды в Париже (49° E), отстают приблизительно на 2.5 мин в сутки, в Кайенне (5° E), где он был вынужден укоротить маятник. Примерно в это же время, один из членов Парижской академии предположил, что на экваторе тело весит меньше, чем на полюсах.

И. Ньютон, услышав об открытии Рише, высоко оценил его и в 1682 г. предпринял попытку установить состояние недр на основании расчетов степени сжатия Земли. Он пришел к выводу о первоначально расплавленной Земле, на том основании, что она представляет собой фигуру вращения, несколько сплюснутую у полюсов. Работа Ньютона обогатила науку новыми данными, как по величине сжатия Земли, так и по теории тяготения. В 1690 г. Гюйгенс, оценивая величину сжатия Земли, получил уравнение её поверхности. На основе выведенных французским математиком А. Клеро уравнений, оказалось возможным определить сжатие земного сфероида. В 1735 г. Клеро, Буге и др. французские исследователи предприняли экспедиции к Северному Полярному кругу в Лапландию и к экватору в Перу, и получили доказательство того, что поверхность Земли имеет сплюснутую форму. В 1755 г. Эйлер впервые дал ясное описание гидростатического равновесия Земли. Заметный вклад в теоретическую геофизику внесли работы английских ученых Стирлинга [1735], Маклорена [1742] и Симпсона [1743]. После публикации в 1743 г. во Франции работы Клеро по теории фигуры Земли, теоретические исследования были продолжены. д’Аламбер [1717-1783], Кулон [1736-1806], Лагранж [1736-1813], Лаплас [1749-1827], Лежандр [1752-1833], Био [1777-1862], Пуассон [1781-1840] и Коши [1789-1857] продолжили теоретические исследования.

Французский естествоиспытатель Ж.Л. Бюфон, немецкий философ **И. Кант** и французский астроном, математик и физик **П.С. Лаплас** разделяли идею горячей Земли и связывали ее внутреннее строение с проблемой одновременного происхождения Земли и Солнечной системы. Планеты, в их построениях, либо отделялись от Солнца, либо образовались одновременно с ним из одного и того же вещества. Этих ученых объединяет общность подхода к проблеме и то, что все они были плутонистами.

Отметим работы по внутреннему строению Земли замечательного русского ученого М.В. Ломоносова: “О слоях земных” [1763] и “Слово о рождении металлов от трясения Земли” [1757]. Процессы горообразования и причину землетрясений он видел в том, что “..сила, поднявшая такую тягость, ничему приписана быть не может, как господствующему жару в земной утробе”.

Нептунисты и плутонисты. Конец XVIII века в истории геологии проходил под знаком борьбы двух течений - нептунизма и плутонизма. Нептунисты считали, что особенности поверхности Земли обязаны действию воды, не интересуясь при этом внутренним устройством Земли, внутренними силами и источниками энергии. Надо полагать, к таким выводам можно прийти, изучая осадочные породы и учитывая их практически повсеместное расположение на земной поверхности, а так же то, что 2/3 Земли покрыто Океаном. В противоположность нептунистам, плутонистов больше интересовало

внутреннее устройство Земли, причины образования гор, землетрясений, вулканов и т.п. Основоположником плутонизма, как учения, считают шотландца **Д. Геттона**, изложившего свои взгляды в книге “Теория Земли” [1788]. В основе его представлений, главенствующая роль отводится действию силы подземного огня. Земля, по Геттону, постепенно эволюционировала, хотя скорость её эволюции, на разных этапах, - существенно различалась.

По мнению плутонистов, наличие огненно-жидких недр Земли приводило к появлению радиальных сил, которые, в свою очередь, воздействовали на каменную оболочку, вызывая появление поднятий и гор. Гипотеза поднятия, таким образом, следовала из плутонических представлений о Земле. Эта гипотеза была развита в трудах немецких геологов Л. Буха и А. Гумбольта. Например, согласно представлениям Гумбольта, земная кора на ранней стадии эволюции Земли была тоньше, её прорывали более мощные, чем теперь, вулканические силы, заливая поверхность Земли расплавленным магматическим веществом.

Основоположник контракционной гипотезы француз Эли-де-Бомон считал, что земная кора окружает расплавленное ядро. В процессе его охлаждения, кора сморщивалась, а огненно-жидкие массы вытекали наружу. Эта гипотеза стала называться контракционной. Её развивал в своей книге “Лик Земли” австрийский геолог Э. Зюсс [1885]. Известным сторонником контракционной гипотезы был немецкий геолог К.А. Циттель [1873]. Земля, по его мнению, перешла из газообразного состояния в огненно-жидкое, а затем покрылась твердой корой. Он считал, что по мере охлаждения и утолщения земной коры, вулканические извержения становились всё реже и реже.

По мере развития науки, представления об огненно-жидком состоянии внутренности Земли усложнялись. В частности, ряд исследователей, и среди них американец Дж. Дэна [1873], считали, что охлаждение и отвердевание Земли идет как с поверхности, так и изнутри - со стороны её ядра, оставляя в средней части вязкий слой. Гипотезу контракции в конце XIX века стали дополнять (или заменять) гипотезой изостатического выравнивания, разработанной практически одновременно Д. Праттом, Д.Эри, Ч. Деттоном.

Представления о внутреннем строении Земли развивали не только геологи. Заметное участие в этой деятельности принимали астрономы и физики, причем, довольно часто их взгляды и выводы оказывались несовместимыми с геологическими исследованиями. Физики, в зависимости от изначально принятых ими моделей образования, эволюции и внутреннего устройства Земли, приходили подчас к противоречивым и взаимно исключающим выводам. Наряду с гипотезой “флюидизма”, т.е. жидкого состояния недр Земли, они принимали гипотезы о их твердом, вязком и даже газообразном состоянии. К флюидистам в свое время относили: физика и астронома Д.Ф. Араго, математика **Ж. Фурье,** астронома Л. Кордье, физика А. Перре. В частности, Перре пришел к оригинальному выводу относительно связи землетрясений с лунными приливами, которая, по его мнению, должна указывать на жидкое состояние недр Земли.

Он выдвинул три закона, названных в его честь законами Перре. Долгое время многие сейсмологи полагали, что эти законы отражают реальную ситуацию. Справедливость законов Перре была подвергнута сомнению: как было показано нашими исследованиями, четкой зависимости сейсмичности Земли от фазы Луны, - реально не наблюдается.

Земля – горячая или холодная? Надо сказать, что ученые в своих исследованиях внутреннего устройства Земли, приходили к совершенно противоположным выводам относительно того, в каком состоянии находится вещество в центре Земли.

Некоторые из них полагали, что земные недра представляют собой твердое вещество. Сторонников этой гипотезы называли "регидистами". К их числу относят, например, русского профессора А.А. Иовского [1828], немецкого ученого Ф. Мора [1868] и крупнейшего геолога, англичанина Ч.Лайеля, который в противовес теории катастроф, развил учение о медленном и непрерывном изменении земной поверхности под влиянием постоянных геологических факторов. Он отрицал представление о раскаленных недрах Земли, приписывая внутренний источник тепла протеканию химических реакций [1866]. Аналогичных взглядов придерживались французский физик **С.Д. Пуассон** [1837], английские физики В. Гопкинс [1839] и В.Томсон [1867]. По их мнению, Земля должна быть абсолютно твердой, по крайней мере, на глубину не, менее 2000 км.

Английский астроном Д. Дарвин [1880], на основе разработанной им теории приливов, оценки величины нутации и изучении статистики землетрясений, пришел к выводу о вязком, но вместе с тем и твердом, состоянии глубинных масс. Он одним из первых использовал свойства сейсмических волн для исследования внутреннего строения Земли.

Ряд ученых полагали, что ядро Земли настолько нагрето, что находится в газообразном и, вместе с тем, в твердом состоянии. По мнению немецкого геофизика Цёпритца [1882], газообразное вещество, из которого состоит земное ядро, имеет такую же плотность, как абсолютно твердое тело, обладая при этом свойствами газов. Вокруг газообразного (и твердого) ядра, по утверждению Цёпритца, располагается оболочка диссоциированных газов, затем переходная оболочка от газов к жидкости, потом расплавленная масса и твердая кора. К сходным представлениям пришли шведский физик С. Аррениус [1900], русские геологи Ф.Ю. Левинсон-Лессинг [1902] и И.Д. Лукашевич [1908].

Однако в этом споре победила идея холодной модели Земли. Во многом эта «победа» была предопределена работами нашего соотечественника академика **О.Ю.Шмидта.** В качестве основы своей модели образования холодной Земли Шмидт использовал явление захвата Солнцем роя частиц, двигавшихся в одной плоскости (плоскости экватора) и имевших различные начальные моменты количества движения. В модели Шмидт учитывал удельные моменты, т.е. моменты, деленные на массу захваченных частиц. Он, в частности, задался вопросом, "... все ли значения моментов равновероятны или, скажем, большие менее вероятны, или наоборот? Этого мы наперёд, не знаем. Если бы был задан какой-нибудь закон распределения моментов, какая-нибудь дифференциальная функция распределения, то мы могли бы применить некоторые критерии для того, чтобы сравнить эту функцию распределения с фактическими данными. Правда мы не имеем роя в прежнем виде, но мы имеем результат его склеивания (подчеркнуто мной) - планеты, а момент, как известно, при этом сохраняется ...".

Гипотеза Шмидта, несмотря на то, что в ней неплохо совпадали рассчитанные расстояния от планет до Солнца (закон Тициуса-Боде) с наблюдаемыми расстояниями, не

объясняла целый ряд особенностей Солнечной системы. Среди них: совпадение направления вращения Солнца и планет, совпадение плоскостей орбит планет с плоскостью экватора Солнца, одинаковый характер распределения планет и спутников Юпитера, Сатурна и Урана по расстояниям, неясность механизма образования планет и спутников из роя холодных частиц (склеивания?) и т.д. По мнению астронома С.К. Всехсвятского, гипотеза Шмидта не могла предсказать ни одной ранее известной особенности Солнечной системы, что косвенно говорит о неубедительности её основных положений. Более того, эта гипотеза типично катастрофическая, а, следовательно, вероятность захвата звездой постороннего облака частиц ничтожно мала. Как известно в наше время (но не во времена Шмидта), очень многие звезды имеют планетные системы, что говорит скорее об определенном порядке при образовании подобных систем, но совсем не о катастрофизме. Исследования возможного механизма образования Солнечной системы, проведенные сравнительно недавно (позже Шмидта), теперь базируются в большей степени на гипотезе Канта-Лапласа, чем на катастрофических моделях.

Роль сейсмологии. В 1912 г. Гейгер и **Гутенберг**, анализируя годографы сейсмических

волн, решили, что состав мантии плавно (не скачком) меняется с глубиной. В 1914 г. Гутенберг, изучая записи землетрясений с эпицентральными расстояниями более 80° от сейсмостанции Геттинген, обнаружил, что на глубине 2900 км скорость продольных волн уменьшается от 13.5 км/с до 8.5 км/с и что радиус ядра равен приблизительно 3500 км. В 1936 г. датчанка-сейсмолог **Ингре Леман** выдвинула предположение, что ядро состоит из двух частей: внешней и

внутренней, и что скорость сейсмических волн во внутреннем ядре больше, чем во внешнем.

Гутенберг и Рихтер сделали попытку определить радиус границы между этими двумя частями ядра [1938] и нашли, что переход от внешнего ядра к внутреннему начинается на расстоянии примерно 1500 км от центра Земли и охватывает зону протяженностью около 300 км. **Джеффрис** установил [1939], что в слое между внешним и внутренним ядром скорость волн уменьшается и что в подошве этого слоя, относящегося к внешнему ядру,

на границе с внутренним ядром имеет место разрыв скорости (рис. 1-2). В 1957 г. Гутенбрг, анализируя прохождение волн различной длины волны через переходную зону, показал, что ядро внутреннее и внешнее состоит из одного и того же вещества, находящегося в различных фазах. К. Буллен предложил выделить и обозначить оболочки Земли [1953], используя границы отражений сейсмических волн. Эта классификация существует и в наше время.

Вопрос о том, твердое или жидкое внутреннее G-ядро, до недавних пор оставался не ясным. Единственная до недавнего времени публикация о регистрации PKJKP-волн, проходящих через внутреннее ядро, и показывающих его жесткость (Julian et al., 1972), ни разу не была подтверждена и поэтому в течение четверти века оставалась сомнительной. Несмотря на эти неудачи, принято считать, что внутреннее ядро - твердое. Основным аргументом в пользу такого вывода является попытка объяснить увеличение скорости P-волн на границе внутреннего ядра. Как известно, внешнее ядро жидкое, скорость распространения P-волн в нем: $v_p = (K/\rho)^{1/2}$. Плотность внутреннего ядра не может быть меньше чем внешнего, модуль сжатия K тоже не может увеличиться. Так как принято считать G-ядро состоящим из кристаллического железа, а скорость P-волн: $v_p = [(K + 4/3\mu)/\rho]^{1/2}$, где μ модуль сдвига, то этот подход позволял оценить скорость S-волн во внутреннем ядре (v_s = 3.56 км/с). Знание скоростей волн

позволяет оценить величины плотности земных оболочек. Заметим, что “наши знания о составе нижних слоев мантии и внутреннего ядра основываются главным образом на данных об их плотности” (Браун и Массет, 1984, стр. 52).

Совсем недавно ситуация резко изменилась. Был найден, наконец, “святой грааль сейсмологии”: т.е. экспериментально обнаружена волна, проходящая через внутреннее ядро, как сдвиговая (PKJKP). Авторы этой работы идентифицировали PKJKP-волну, распространяющуюся через внутреннее ядро Земли с периодом колебаний 2-10 секунд, возникшую в результате глубокофокусного землетрясения Flores Sea 1996 года. Эта PKJKP-волна была зарегистрирована на 8 станциях Французской сейсмической сети. Полученный результат свидетельствует о наличии жесткости у внутреннего ядра, которая ранее была выведена только из рассмотренных нами выше косвенных свидетельств. Авторы оценили скорость распространения PKJKP-волн, которая оказалась равной v_s = 3.65 км/с. Кроме этого, они объяснили результат, полученный группой (Julian et al., 1972) по регистрации ими волны со скоростью 2.95 км/с. Оказалось, что это было поверхностное отражение pPKJKP-волны. Французы считают, что большая величина коэффициента Пуассона (0.44) может быть объяснена нормальной кристаллической структурой внутреннего ядра без того, чтобы привлекать идею частичного плавления, якобы возникающего из-за громадного давления в центре Земли.

Одним из последних достижений в области изучения внутреннего ядра явилось обнаружение на его границе цилиндрической анизотропии и супервращения. Сейсмическая волна, касающаяся внутреннего ядра в области экватора, приходит на 2-4 с раньше, чем аналогичная волна, касающаяся внутреннего ядра в области полюсов. Аналогичные результаты получены при анализе спектров собственных колебаний внутреннего ядра, после сильного землетрясения.

Железное ядро. В любом, даже самом кратком обзоре об эволюции представлений, касающихся внутреннего строения Земли, нельзя обойти вниманием спор ученых, который не окончился ещё и в наши дни, это спор о химическом составе ядра Земли, спор о том, железное оно или не железное.

Идея железного ядра имеет очень давнюю историю. С момента открытия земного магнетизма и магнетизма железа, это сопоставление представлялось очевидным. Немецкий геолог Г. Штеффенс [1801] пришел к аналогичному выводу на основе

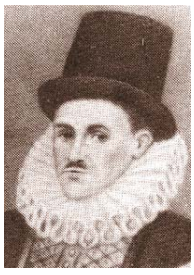
магнитных наблюдений. Идея, связывающая магнетизм Земли и магнетизм железа, развивалась немцами К. Шмидером [1802] и К. Гоффом [1824]. С другой стороны, учеными высказывалась и вторая предпосылка: плотность внутренних слоев Земли (так же как и железа) значительно превосходит плотность земной коры, которая, в свою очередь, существенно ниже средней плотности Земли. Третья предпосылка состоит в следующем. Русский ученый Э.Ф. Хладни [1794], французские геологи А. Добре [1866] и С. Менье [1896], а так же известный русский химик **Д.И. Менделеев** [1877], на основании аналогии химического состава Земли и метеоритов, пришли к выводу о том, что ядро Земли, так же как и метеориты, состоит из никелистого железа. Впоследствии это предположение было развито в научную гипотезу, ставшую господствующей с начала XX века и до наших дней. По поводу связи химического состава ядра Земли и метеоритов, имеет смысл привести слова Б. Гутенберга: “Преобладающее мнение, что главным элементом в ядре является железо, иногда основывается на его обилии в метеоритах. Однако здесь надо опасаться порочного круга: 1) метеориты, которые первоначально были частями планеты, часто содержат железо, и поэтому можно думать, что оно является главной компонентой Земли; 2) поскольку средний состав всех известных нам метеоритов приблизительно соответствует составу

Земли (включая железное ядро), то можно считать, что они прежде являлись частями планеты".

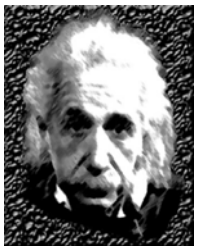
Критика идеи железного ядра. Однако не всегда, и не всех устраивала эта гипотеза. Её первую предпосылку опровергли после того, как было оценено распределение температуры по земному радиусу, с одной стороны, и определена температура Кюри магнитных материалов, в частности железа, с другой. В качестве альтернативы второй предпосылки, В.Н.Лодочников предлагал свою модель, согласно которой увеличение плотности пород с глубиной возможно за счет изменения их структуры (например, удельный вес минералов, состоящих из углерода: антрацита - 1.7; графита - 2.25; алмаза - 3.5). Возражением против довода о сходстве состава Земли с составом метеоритов явилась оригинальная гипотеза Лодочникова [1939] о происхождении метеоритов. По его мнению, метеориты, это продукты извержения земных вулканов (сейчас можно было бы добавить: и не только земных, а вулканов других планет и их спутников). Действительно, если метеориты не являются обломками внутренних частей какой-то планеты, то нельзя проводить аналогию между их составом и составом ядра Земли.

С похожей гипотезой относительно изменения плотности вещества с глубиной выступил финский ученый В. Рамзей [1948]. Он утверждал, что ядро состоит из вещества, слагающего мантию, но находящегося в металлических фазах, и что прежде чем атомы главных элементов (кислорода, кремния, магния и железа) совершенно разрушатся, могут существовать другие фазовые переходы. Венгр Эдьед [1957] предложил гипотезу, отличную от гипотезы Рамзея. Он так же полагал, что Земля "состоит из трех фаз одной и той же однородной ультраосновной силикатной массы. Во внутреннем ядре структура материала подобна решетке, которая не подвержена влиянию давления внутри Земли. Состояние вещества, слагающего внешнее ядро, соответствует следующей фазе сверхвысокого давления, где жесткость пренебрежимо мала по сравнению с другими упругими модулями, так что наблюдаются только продольные волны" (Гутенберг, 1963). Интересную гипотезу рассмотрели Кун и Ритман [1941], в которой они предположили, что в ядре содержатся заметные количества водорода, оставшегося от первичной материи, из которой образовалась Земля.

Магнитное поле. В 1600 году **Гилберт** английский физик, придворный врач королевы Елизаветы впервые выдвинул предположение, что Земля является большим магнитом, и, намагнитив железный шар, показал, что он действует на магнитную стрелку так же, как и Земля. Он предположил, что магнитные полюсы Земли совпадают с полюсами географическими. Гилберт установил, что многие тела, подобно янтарю, обладают свойством притягивать лёгкие предметы после натирания. Он исследовал эти свойства и назвал их электрическими (по-гречески янтарь — электрон), впервые введя этот термин в науку. Гилберт первым в Англии выступил с критикой учения Аристотеля и в защиту учения Н. Коперника.



Гаусс более 150 лет тому назад доказал, что источник генерации геомагнитного поля находится в её недрах. После того как обнаружили, что точка Кюри для железа достигается в нижних слоях земной коры, потребовалась другая гипотеза геомагнетизма. Одним из первых был Эльзассер, который сначала [1939] предложил идею генерации геомагнитного поля за счет термоэлектрических токов в ядре, а позже [1947] он высказал предположение о том, что источником магнитного поля являются медленные движения в земном ядре, которые могут возбуждать электрические токи, подобно тому, как это происходит в динамо-машине. Независимо от Эльзассера, с аналогичной гипотезой выступил известный физик теоретик из России Я.Б. Френкель [1948]. Идею магнитного динамо развивали Буллард [1948], Ранкорн [1954], Вестин [1954]



и др. Эта идея, вытеснив все альтернативные, завоевала абсолютное преимущество в физике Земли. Однако, несмотря на победное шествие в течение 50 последних лет, ясного понимания процессов генерации геомагнитного поля нет до сих пор. В последнее время все чаще и чаще у различных специалистов возникают мысли о несостоятельности этой идеи. А ведь проблема генерации геомагнитного поля поставлена под «номером один» в физике Земли и составляла, по мнению **А.Эйнштейна**, одну из трех главных задач современной физики.

Тектонические гипотезы. С начала XX века появились различные тектонические гипотезы, которые обычно сосредоточивали внимание исследователя на какой-либо одной стороне развития Земли. Однако не нужно забывать, что любая "разумная" гипотеза, охватывающая всего одну сторону многоликой Земли, основывалась на определенных представлениях о её образовании, эволюции и внутреннем строении. Поэтому и тектонические гипотезы вносили определенный вклад в науку о строении Земли.

Выше мы упоминали о контракционной гипотезе, которая в начале XX века, которая в начале XX века стала терять свой приоритет. Это было вызвано тем обстоятельством, что представления о сжимаемости земной коры, расположенной вокруг огненно-жидкого ядра, оказались несовместимыми с железным ядром, радиоактивным разогревом и сейсмическими данными. В это время возникла идея перемещения, дрейфа материков, сначала у англичанина Ф.Тейлора [1910], а затем эта гипотеза была развита **А. Вегенером** [1915], который основывался на совпадении очертаний береговых линий Африки и Южной Америки, резком различии по высоте океанов и материков и концепции изостазии

Теорию спрединга морского дна предложил А. Холмс в 1929 г., а в 1939 г. Д. Гривс ещё ближе подошел к главной идее тектоники плит. Он утверждал, что горные сооружения и сейсмические пояса, окаймляющие Тихий океан, создаются конвективными течениями, которые поднимаются в центре бассейна и опускаются на его окраине. Триумф плитной тектоники начался после публикации в 1962 г. статьи Г. Хесса об истории океанических бассейнов, посвященной спредингу морского дна. Надо отдать должное авторам книги по тектонике плит, которые считает, что "тектоника плит не закрыла науки о Земле из-за того, что все проблемы решены. Наоборот, она дала надежную основу для исследований по многим новым направлениям" (Кокс, Харт, 1989. стр. 15).

Гипотеза расширяющейся Земли. К тектоническим гипотезам относится и гипотеза расширения Земли. Как будет следовать из текста этой книги, модель горячей Земли в геологическом аспекте адекватна модели расширяющейся и пульсирующей Земли. Эта идея была высказана ещё в 1889 г. русским ученым И.О. Ярковским. Модель в современном виде берет начало от работ **О.С. Хильденберга** [1933]. Идея расширяющейся Земли нашла наиболее полное и законченное развитие в трудах австралийского геолога **С. Кери** (Carey, 1976). В развитие этой идеи существенный вклад внесли

геологи Б. Линденман [1929], М. Боголепов [1922], Д.К.Е. Халм [1935], Л. Эдьед [1956], Х. Оуэн [1973] и др. Однако все авторы, и в том числе С. Кери, не могли найти причин, согласно которым Земля может расширяться. Заканчивая свою замечательную книгу, Кери написал: "Я знаю, что Земля расширяется, но я не знаю почему". Разные авторы задумывались над этой проблемой и многие из них приходили в своих предположениях к весьма

экзотическим (и неверным) идеям. Возможные аспекты физики расширения Земли рассмотрены В.Ф. Блиновым (1984). Он полагал, что все схемы расширения и возможные причины можно рассмотреть применительно к формуле гравитационного ускорения в центрально-симметричном поле тяготения:

$$g = GM/R^2.$$

Блинов полагает, что параметры в этой формуле связаны с изменением земного радиуса R.

Он выделяет три возможных причины изменения R: Первая связана с увеличением массы со временем. Это направление основано Ярковским, оно развивалось Хильденбергом, И.В.Кирилловым, В.Б.Нейманом, самим Блиновым и др. Этому направлению отдавал предпочтение и Кери. В этой модели, Земля аккумулирует энергию (возможно, энергию гравитационных волн), которая преобразуется в её недрах в массу, посредством реализации выражения из специальной теории относительности Эйнштейна: $E = mc^2$. Эта идея пришлась по душе многим геологам, в частности, на кафедре геофизики МГУ. По поводу этой идеи мне пришлось выступить с критикой. Второе направление связано с уменьшением гравитационной постоянной G со временем. В свое время с этой идеей выступил известный физик, Нобелевский лауреат **П. Дирак**. Это направление было поддержано Л. Эдьедом, Р. Дике, Д.Д. Иваненко, М.У. Сагитовым и др. Однако, астрономические наблюдения, проведенные различными обсерваториями в течение многих лет, - однозначно показали, что ни G, ни GM не изменялись в течение времени наблюдений с точностью, не хуже 10^{-11}.

Третье направление представлено теми работами, в которых увеличение радиуса происходит за счет разуплотнения вещества. Как будет ясно в дальнейшем, это направление является базовым и в нашей модели горячей Земли. Эта идея наименее экзотическая из трех, перечисленных нами. Более того, имеется масса лабораторных экспериментов, в которых при введении в вещество удельной энергии, большей, чем две теплоты испарения, оно испаряется и при наличии сжимающих сил может быть сжато до плотности, значительно превышающей плотность исходного вещества. Так, например, в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу на осколок бутылочного стекла были направлены одновременно с 12 сторон мощные лазерные пучки. Вещество испарилось, и было сжато возникшей ударной волной до плотности ≈ 100 г/см^3. Затем, вещество стало адиабатически расширяться, охлаждаться и при этом конденсироваться и кристаллизоваться.

Рис. 1-12. Модель расширения Земли по Кэрри.

Надо заметить, что практически все разработчики модели расширяющейся Земли стремились “уложить” континенты один к другому таким образом, чтобы не оставалось “зазора” между ними. Рис. 1-9-с демонстрирует один из таких вариантов, предложенный в книге Гораи (1984). Наибольшего успеха в этом деле достиг немецкий инженер из Потсдама К. Фогель, создавший прозрачный глобус, на внешней поверхности которого были расположены материки, а внутри размещался еще один шар, меньшего диаметра, на

котором материки занимали положения, примерно так же, как это изображено на рис.1-9-с . Профессором Британского музея натуральной истории Х.Оуэном был создан атлас, в котором представлено расположение материков в различные эпохи и т.п. В каждой из моделей расширения авторы придерживались некой общей схемы, изображенной на рис. 1-12 и заимствованной мной из книги Кери. Этот рисунок отражает тот факт, что материки в процессе расширения Земли не претерпели существенных изменений, а само расширение обязано образованию океанов, заполнивших пространство между ними.

Мне кажется, что ни один из разработчиков идеи расширяющейся Земли не был полностью удовлетворен своими моделями. Дело в том, что современные наблюдения за дрейфом материков и плит, а также многочисленные тензометрические измерения в шахтах показывают, что Земля в настоящее время скорее сжимается, чем расширяется. По оценке **П.Н.Кропоткина** (1984), только 5% современной Земли подвержено растяжению в зонах спрединга, остальные 95% находятся под влиянием сжимающих усилий. Все геологи-практики неоднократно фиксировали, что на Земле в прошлом имели место, как процессы глобального растяжения земной коры, так и её сжатия. Таким образом, идея контракции-сжатия и идея расширения Земли требовали объединения.

Пульсирующая гипотеза возникла, как попытка примирить наблюдаемые на поверхности Земли следствия процессов сжатия и расширения. Она была высказана в тридцатых годах американскими геологами В.Бухером и А.В.Грабау и детально разработана русскими академиками М.А.Усовым, **В.А.Обручевым** и др. Тем не менее, идеи, основанные на модели горячей Земли, по ряду причин не получили достойного развития и, более того, были отвергнуты. Абсолютное и бесспорное преимущество получила модель холодной Земли

Литература

Блинов В.Ф. Основные направления исследований расширяющейся Земли. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.

Браун Д., Массет А. Недоступная Земля. М.: Мир. 1984. 262 с.

Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра. 1984. 110 с.

Гутенберг Б. Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 263 с.

Машимов М.М. Геодинамические аспекты изучения изменений фундаментальных характеристик Земли во времени. Геодезия и картография. № 9. 1996. С.24-28.

Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра. 1984. 250 с.

Brown J.M., McQueen R.G. Phase transitions, Gruneisen parameter and elasticity for shocked iron between 77 GPa and 400 Gpa. J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 7485-7494.

Carey S.W. The Expanding Earth. Elseiver. Amsterdam. 1976. 488 p.

Mao H., Shu J., Shen G., Hemley R.J., Li B., Singh A.K. Elasticity and rheology of iron above 220 GPa and the nature of the Earth's inner core. Nature 1998. V. 396. P. 741-743

Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth. Science. 1969. V. 166. P. 609-621.

Vogel K Global models of the expanding Earth (In: Barone M, Selleri F Ed.: Frontiers of Fundamental Physics) (Plenum Press: New York, 1994).

Глава 10. Физика землетрясения.

В главе 10 рассматривается ударно-волновая модель землетрясения. Выход ударной волны на поверхность Земли. Распространение ударной волны от очага до поверхности. Модель акустического сверхизлучения. Формирование ударной волны. Акустическая модель. Эксперименты по туннелированию и запутанности в геологических образцах. Сейсмическая активность и водород. Акустическое сверхизлучение и образование ударной волны – как редукция волновой функции. Квантовомеханическая запутанность и телепортация – в Приложении 1.

10. 1. ***Ударно-волновая модель землетрясения. Выход ударной волны на поверхность Земли.***

В сейсмологии этот вопрос обычно не обсуждается. Ударные волны, как правило, рассматриваются в физике энергии высокой плотности, в частности, в таких вопросах, как кумуляция энергии и образование кумулятивных струй, физика взрыва и образование кратеров при ударе высокоскоростных тел, пробивании преград и т.п. Как будет показано ниже, этот вопрос актуален и для сейсмологии, по крайней мере, в таком её разделе, как процессы, происходящие в эпицентре сильного землетрясения. Физика ударных волн рассмотрена в Приложении 3.

Физика землетрясения, несмотря на то, что эта проблема стоит перед человечеством более 100 лет, до сих пор она так и остается не ясной. В чем же состоит причина и почему эта очень важная проблема, над решением которой работает огромное количество университетов, институтов и компаний во всем мире, не продвинулась ни на шаг за те сто лет, которые прошли с первой научной концепции упругой отдачи, высказанной Рейдом в 1906 после разрушительного землетрясения в Сан-Франциско.

Дело, по-видимому, заключается в том, что физика землетрясения всё это время рассматривалось только в рамках механики сплошной среды и теории упругости. Сильные движения грунта, сопутствующие землетрясению, объясняются обычно присутствием сейсмотектонических деформаций (Гольдин, Кучай, 2008), хотя из всех опубликованных работ неясно, каким образом можно с этих позиций объяснить весь комплекс явлений, сопровождающих сильное землетрясение. К этим явлениям относятся: разрывы поверхности; отколы; волны на поверхности, когда среда ведет себя как вязкая жидкость; разуплотнение грунта, возникновение водяных фонтанов, грифонов и пр.

Оказывается, что все они находят логичное объяснение, если предположить, что само землетрясение представляет собой ударную волну (Кузнецов, 1990, 1992, 2001, 2008). В этом случае физику землетрясения можно условно разбить на три части: первая – это механизм образования ударной волны (УВ) в литосфере на глубине гипоцентра; вторая – прохождение УВ от гипоцентра до поверхности Земли и, третья, - выход УВ на поверхность Земли сопровождающийся всем комплексом явлений, о которых идет речь.

В наших исследованиях ударно-волновой модели землетрясения, в отличие, например, от работы (Гольдин, Кучай, 2008), под гипоцентром понимается совсем не некая условная точка, а, скорее огромное пространство, на котором возникает ударная волна. Некоторые авторы оговариваются, что очаг землетрясения сводится к точке для очень слабых землетрясений. Возможно, это справедливо, но уж совсем неправильно распространять этот подход при анализе, например, такого сильного землетрясения как Чуйское (Алтайское) 27.09.2003. Тем более, находить причину возникновения землетрясения в особенностях компонент тензора сейсмотектонических деформаций в районе точки, соответствующей эпицентру землетрясения.

Есть ли основания для того, чтобы вообще рассматривать идею ударной волны, как механизм землетрясения? Их достаточно много, к примеру, назовем две из них: первая связана с анализом сигнала, зарегистрированного на Новосибирской сейсмостанции, а

вторая – мнение профессора С.Б. Смирнова (1992), строителя, специалиста по разрушению зданий во время землетрясения.

Величина смещения грунта во время главного толчка Чуйского землетрясения на Новосибирской сейсмостанции, составляет примерно 50 мкм. Зная величину смещения, можно попытаться оценить деформацию ε, производимую приходящей волной: $\varepsilon \approx (1 - 5)\cdot 10^{-3}$ из следующих ниже соображений. Величина напряжения σ грунта, соответствующая ε = 0.1, составляет примерно 500 бар и эта величина изменяется линейно с изменением ε: σ ~ ε. Эта закономерность дает основание оценить $\sigma = p \approx 5$ бар при $\varepsilon \approx 10^{-3}$. По-видимому, реальная величина σ ещё меньше, однако эти оценки показывают (при различных способах их получения) один порядок величин напряжения в волне. Скорость распространения волны, амплитуда которой составляет 5 бар от очага Алтайского землетрясения (в приближении, что волна плоская) до сейсмостанции Новосибирск, расположенной примерно в 650 км от очага равна 3.6 км/с. Это намного больше, чем местная (в грунте) скорость звука (≈ 400 м/с). Возникает вопрос, какая волна (ударная или нет) приходит к сейсмостанции, расположенной так далеко (650 км) от очага землетрясения? Волна такой амплитуды ударной вроде быть не должна. Однако, если производная $d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$, волну можно считать ударной вне зависимости от величины σ (Зельдович, Райзер, 1966). В нашем случае это условие выполняется. В книге (Зельдович, Райзер, 1966) сказано, что если условие $d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$ не выполняется, - волну можно считать плоской волной сжатия, которая распространяется в упруго-пластической среде.

В качестве второго основания, сошлемся на мнение Смирнова, обосновавшего концепцию ударно-волнового сейсмического разрушения (Смирнов, 1992). Автор учел многочисленные наблюдения сейсмических разрушений зданий, которые показывают, что разрушения происходят сразу после первых наиболее мощных поперечных толчков. Результатом таких толчков, которые, конечно же, не успевают раскачать здание, т.е. вызвать в нем появление опасных сил инерции, является почти мгновенный срез колонн или стен здания, вследствие чего происходит разрушение здания до попадания его в резонанс. Для того чтобы объяснить эти факты, автор приходит к мнению, что такие разрушения могут производиться *только ударной волной*. Свою концепцию автор обосновывает расчетами и многочисленными примерами из практики сейсмических разрушений.

Оценки параметров волны, приведшей к весьма заметным колебаниям почвы в районе Новосибирска в 4 балла при Чуйском землетрясении 27.09.2003, а также работа Смирнова, - свидетельствуют в пользу предлагаемой нами ударно-волновой модели землетрясения. Мы отметили только два примера, в действительность подобных причин считать именно так, - значительно больше.

Как отмечалось выше, с точки зрения ударно-волновой модели землетрясения, его можно рассматривать как последовательность таких механизмов:

1) возникновение упругих напряжений в литосфере и мгновенный сброс этих напряжений путем формирования ударной волны,

2) транспортировка ударной волны по литосфере, взаимодействие её со средой, приводящее к генерации сейсмических волн, распространяющихся по всему объему Земли и, наконец,

3) выход ударной волны (УВ) на поверхность Земли и формирование т.н. сильных движений грунта.

Материал в этой главе изложен в обратном порядке: сначала обсуждается выход УВ на поверхность, затем, - вопросы транспортировки УВ от очага к поверхности и, наконец, - вопросы формирования УВ в очаге землетрясения. Такой порядок вызван тем, что теория явления выхода УВ на поверхность хорошо развита (Зельдович, Райзер, 1966; Забабахин, 1997; Станюкович, 1971), что позволило найти непротиворечивое объяснение всем известным особенностям таких движений поверхности. Два других механизма (1 и 2) – сложнее и менее проработанные, они будут обсуждаться позже, после третьего.

Массовая скорость. В ударно-волновой модели землетрясения используется важная особенность УВ, заключающаяся в том, что прохождение волны по сплошной среде сопровождается «течением» вещества этой среды за фронтом ударной волны с массовой скоростью *u,* которая зависит от интенсивности ударной волны, т.е. от величины $\Delta\sigma$ (или *p*) на её фронте.

Сравним общепринятую модель землетрясения с нашей ударно-волновой и покажем, что движение среды с массовой скоростью *u* вслед за ударной волной, это то же самое движение со скоростью, которая в strike-slip модели называется slip-velocity.

Как известно во многих работах по физике очага сильных землетрясений, произошедших в последнее время, фиксируется и обсуждается подвижка в области очага (slip) и изменение этой подвижки во время основного удара (slip-velocity). В книге Аки и Ричардс (1983) спонтанное распространение сдвиговой трещины описывается формулой:

$$w(\xi_0,\eta_0) \approx -\frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}}\int\frac{d\xi}{\sqrt{\xi_0-\xi}}\int\frac{p(\xi,\eta)d\eta}{\sqrt{\eta_0-\eta}},$$

$w(\xi_o,\eta_o)$ – подвижка трещины в координатах ξ,η; μ - модуль сдвига; $\xi(\xi,\ \eta)$ – траектория движения кончика трещины; $p(\xi,\eta)$ – величина сброшенного напряжения.
Интегрирование этой формулы приводит к формуле для подвижки:

$$w(\xi_0,\eta_0) \approx -\frac{\beta p_0 t}{\mu},\quad \beta=\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$ – скорость сдвиговых волн (V_S), *t* – текущее время процесса.

Положим: $w/t = u$ - скорость распространения трещины: $u = V_S\ p_o\ /\mu$, подставляя значение μ, получаем: $u = p_o/V_S\rho$, или $p_o = uV_S\rho$ - связь между скоростью распространения трещины, величиной сброшенного напряжения и акустическими параметрами среды. Для параметров среды, соответствующих Нортриджскому землетрясению (u = 1 м/с), величина p_o совпадает с $\Delta\sigma$ = 100 бар.

Как известно в физике ударных волн, величина сжатия среды Δp после прохождения по ней ударной волны, оценивается (Зельдович, Райзер, 1966):

$$\Delta p = u\rho c,$$

где *u*, как и раньше, медленная массовая скорость течения среды за фронтом ударной волны, $\rho\ c$ – акустическое сопротивление среды. Если принять: u = 1 м/с, а ρc = 3 г/см^3 × 5 км/с, то окажется, что величина Δp порядка 150 бар. Совпадение этих оценок не случайно и, по-видимому, говорит в пользу того, что мы рассматриваем одно и то же физическое явление с точки зрения различных моделей. Действительно, и в модели землетрясения, основанной на теории упругости, и в нашей ударно-волновой модели, конечным результатом действия механизма землетрясения является возникновение на поверхности Земли подвижек и течений сплошной среды, приводящих к образованию разрывов, разломов и т.п., т.е., собственно, к «трясению земли». Близость оценок величин скоростей slip в модели Рейда и массовой скорости, следующей из ударно-волновой модели, может говорить о том, что наша модель, адекватна физическому механизму землетрясения.

Ранее мы отмечали, что ударная волна вызывает возникновение разрыва поверхности. Конечно, это совсем не тот разрыв, который, следуя модели Рейда, распространяется с глубины 700 км до поверхности Земли. Это локальный разрыв, время образования которого порядка длительности фронта ударной волны, а, в пределе, - длительности её импульса.

Заметим, что Аки и Ричардс, обсуждая проблему землетрясения как сейсмического источника, не замыкаются только на проблеме образования трещины, которая, по их мнению, определяет одну из характеристик источника - разрыв. Они одновременно обсуждают и объемный тип источника, который связан с возникновением деформации и не имеет прямой связи с разрывом. Этот подход созвучен ударно-волновой модели

землетрясения, в которой ударная волна, проходя по очагу от гипоцентра до эпицентра, рассеивается (расщепляется) на неоднородностях среды, генерирует объемные волны, а, выходя на поверхность Земли, приводит к разрыву и разуплотнению поверхности.

***Основные соотношения для ударных волн* (*УВ*).** Закон сохранения массы:

$$\rho_o D = \rho_n (D - u_n) \text{ или } u_n + \varepsilon D = 0,$$

где ρ_n – плотность вещества на фронте волны, ρ_o - невозмущенная плотность, D – скорость распространения фронта волны, u_n - скорость течения среды за фронтом ударной волны.
Закон сохранения импульса:

$$- \sigma_n = p_n - p_o = \rho_o u_n D,$$

где p_o – начальное давление среды (до прохождения ударной волны), p_n - давление на фронте ударной волны.
Уравнение сохранения энергии имеет классический вид:

$$E_n - E_o = 1/2(p_n - p_n)(v_o - v_n),$$

где E_o и E_n – внутренняя энергия до фронта ударной волны и за её фронтом, v_o и v_n, соответственно, - удельные объемы ($v = 1/\rho$).
В неподвижной среде ($u_o = 0$) соотношения скоростей на фронте ударной волны представляются в виде:

$$D = [\rho / \rho_o (p - p_o) / (\rho - \rho_o)]^{1/2},$$
$$u = [1/ \rho \rho_o (p - p_o)(\rho - \rho_o)]^{1/2}. \quad (10.1)$$

Уравнения (10.1) справедливы для сухого грунта. Если грунт водонасыщенный, то D и u, после подстановки уравнения состояния водонасыщенного грунта в виде:

$$\rho = \rho_o \{\alpha_1 (p/p_o)^{-1/k_1} + \alpha_2 [k_2(p - p_o)/\rho_2 c^2_2 + 1]^{-1/k_2} + \alpha_3 [k_3(p - p_o)/\rho_3 c^2_3 + 1]^{-1/k_3}\}^{-1},$$

где α_1, α_2, α_3 – содержание компонент (по объему): воздуха, воды и твердого грунта, соответственно, ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0$), k_1, k_2, k_3 - показатели изоэнтропы соответствующих компонентов; будут определяться следующим образом:

$$D^2 = (p - p_o)/\rho_o \{1 - \alpha_1 (p/p_o)^{-1/k_1} - \alpha_2 [k_2(p - p_o)/\rho_2 c^2_2 + 1]^{-1/k_2}$$
$$- \alpha_3 [k_3(p - p_o)/\rho_3 c^2_3 + 1]^{-1/k_3}\}^{-1};$$

$$u^2 = (p - p_o)/\rho_o \{1 - \alpha_1 (p/p_o)^{-1/k_1} - \alpha_2 [k_2(p - p_o)/\rho_2 c^2_2 + 1]^{-1/k_2}$$
$$- \alpha_3 [k_3(p - p_o)/\rho_3 c^2_3 + 1]^{-1/k_3}\}.$$

Пористость грунта, иначе, суммарная концентрация воздуха и воды ($\alpha_1 + \alpha_2$) являются определяющими при оценке величин скоростей D и u. Увеличение концентрации защемленного воздуха снижает величину скорости ударной волны D и приводит к увеличению массовой скорости течения грунта u.

Экспериментально неоднократно отмечалось, что при прохождении УВ через среду происходит «размыв» её фронта (толщиной l). Принято считать, что этот эффект связан с переходом среды в квазижидкое состояние, характеризующееся наличием у среды динамической вязкости. Например, в пресованном порошке соли NaCl, при прохождении ударной волны ($u = 10^3$ м/с, $l = 10^{-3}$ м, $\tau = 10^{-6}$ с) размыв фронта соответствовал вязкости $\eta = 10^4 - 10^5$ Пз. Вязкость сплошного материала каменной соли имеет порядок $10^{14} - 10^{15}$ Пз, что на десять порядков меньше вязкости, наблюдаемой в ударных экспериментах. Можно оценить величину вязкости по параметрам колебательного неустойчивого характера сильных движений почвы при Нортриджском землетрясении 1994 г. При этом вертикальный размер пространства, на котором наблюдался колебательный процесс в эпицентре землетрясения: $a \approx 1$ м, величина напряжения в главном толчке землетрясения: $\sigma \approx 100$ бар, а скорость колебаний частиц грунта v достигала 1 м/с. Знание этих параметров позволяет оценить величину вязкости «жидкой» среды: $\eta = \sigma a/v \approx 10^5 - 10^6$ Пз. Полученные оценки вязкости показывает, что вещество грунта в момент землетрясения в его эпицентре находится в «квазижидком» состоянии. (Речь идет о том, что в такой среде в момент её нагружения во время удара, величина деформации в

зависимости «напряжение-деформация», находится в нелинейной области). Это обстоятельство позволяет воспользоваться формулами Эйлера, Навье-Стокса и Пуазейля для течения жидкости, соответственно:

$$dv/dt = F - 1/\rho\ grad\ p,$$
$$dv/dt = F - 1/\rho\ grad\ p + \chi dv,$$
$$v = \int_S u\ dS,$$

где F – внешняя сила, $\chi = \eta/\rho$ - кинематическая вязкость.

Скорости волн. Воспользуемся подходом, развитым для оценки скоростей перемещений частиц упругой среды под действием силы, приложенной в очаге землетрясения. Этот подход был предложен Кейлис-Бороком и развит Матуямой. Скорость перемещения в горизонтальной плоскости:

$$u = 1/4\pi\rho\ [\partial^2/\partial x^2\ (\varphi - \psi) + \nabla^2\psi],$$

где φ и ψ сферические волны вида: $\varphi = (1/r)\ F\ [t - (r/V_P)]$; $\psi = (1/r)\ F\ [t - (r/V_S)]$. Эти волны распространяются на расстояние r со скоростями V_P и V_S, соответственно. Функция $F(t)$ связана с силой $f(t)$: $f(t) = d^2F(t)/dt^2$. Развитый Матуямой подход имеет значение для нашей ударно-волновой модели в том плане, что речь идет не прямо о P- и S-волнах, а о волнах, имеющих скорости, близкие к скоростям распространения P- и S-волн. Ударная волна, в твердом теле распространяется в зависимости он её интенсивности со скоростью: D, причем: $V_S \le D \le V_P$.

По-видимому, некоторые авторы допускают ошибку, утверждая, что воздействие на грунт именно S-волны - приводит к разрушениям в гипоцентре землетрясения. Согласно представлений Матуямы, правильнее говорить о волнах, двигающихся со скоростями, близкими (или равными) скоростям P- и S-волн. Как известно из физики ударных волн, сильная ударная волна распространяется со скоростью D, близкой к скорости P– волны. Соответственно, чем слабее ударная волна, тем меньше её скорость распространения, и, в пределе, она может быть равной скорости распространения S-волны: $D \to V_S$. (Утверждение, что ударная волна сжатия, по мере распространения, вырождается в P-волну, – не совсем верно. Правильнее считать, что ударная волна, распространяясь в твердой среде, рассеивается на её неоднородностях и расщепляется на P- и S-волны).

Особенности распространения ударных волн в грунтах. Приведем некоторые данные по особенностям распространения ударных (взрывных) волн в грунтах. При камуфлетном (подземном) взрыве наблюдается так называемое геометрическое подобие (скейлинг) по корню кубическому из энергии взрыва E. Данные по многим параметрам движения среды при взрыве удается свести к универсальным зависимостям, если использовать в качестве линейного масштаба комбинацию $(E/\rho c^2)^{1/3}$. Большое количество проведенных экспериментов по изучению давления в ударной волне от расстояния и количества взрывчатого вещества подтверждает зависимость:

$$p = p_o(C^{1/3}/R),$$

где p_o – начальное давление в атм., R – расстояние от взрыва то точки измерения в метрах, C – вес взрывчатого вещества в кг.

Для широкого набора различных грунтов, как водонасыщенных, так и сухих, используется следующая формула:

$$p = K(C^{1/3}/R)^{\mu},$$

здесь K и μ- коэффициенты, величины которых приведены в Таблице 10.1.

Для того чтобы перейти от веса взрывчатого вещества к энергии и применить формулу в нашей ситуации, воспользуемся соотношением между энергией и весом тротила.

Известно, что удельная кинетическая энергия тротила равна 4 кДж/г. Положим, что сейсмическая энергия и энергии взрывчатых веществ эквивалентны. (Это не совсем точно, т.к. кпд источника не близок к 100%) Энергия землетрясения с магнитудой M = 7.5 равна 10^{23} эрг, (10^{13} кДж), что эквивалентно 10^{12} г (одна мегатонна) тротила, тогда параметр $C^{1/3} \approx 10^3$ кг$^{-1/3}$ Давление p в очаге (на фронте ударной волны) Чуйского землетрясения (M = 7.5), по-видимому, может достигать 1 кбар. Для сравнения, давление на фронте УВ (в нашей интерпретации) при Нортриджском землетрясении M = 6.7, E = 10^{22} эрг, могло достигать 100 бар. Давление на фронте ударной волны (волны сжатия) на расстоянии 650 км от очага, в Новосибирске, если принять самые высокие значения коэффициента K из Таблицы 10.1, оказывается порядка 1 бара. Очевидно, что эта оценка, по-видимому, наиболее высокая из всех возможных. Если, к примеру, параметр K будет меньше, а μ - больше, то давление p будет меньше чем 1 бар (1 атмосфера) на несколько порядков.

Как мы отмечали выше, величина смещения грунта во время главного толчка Чуйского землетрясения на Новосибирской сейсмостанции составляет примерно 50 микрон. Зная величину смещения, мы оценили деформацию $\varepsilon \approx (1 - 5)10^{-3}$. Величина напряжения σ водонасыщенного грунта, соответствующая $\varepsilon = 0.1$, составляет примерно 500 бар и эта величина возрастает линейно с ростом ε: $\sigma \sim \varepsilon$. Эта закономерность дает основание оценить $\sigma = p \approx 5$ бар при $\varepsilon \approx 10^{-3}$. Скорость звука в таком грунте ≈ 400 м/с. Скорость распространения волны, амплитуда которой составляет 5 бар от очага Алтайского землетрясения до сейсмостанции Новосибирск, расположенной примерно в 650 км от очага равна 3.6 км/с. Возникает вопрос, ударная ли волна приходит к сейсмостанции? Так как производная $d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$, волну можно считать ударной вне зависимости от величины σ.

Таблица 10.1

Характеристика грунта	K	μ
Водонасыщенный песок с $\alpha = 0$	600	1.05
Водонасыщенный песок с $\alpha = 5\ 10^{-4}$	450	1.5
Водонасыщенный песок с $\alpha = 10^{-2}$	250	2.0
Водонасыщенный песок с $\alpha = 4\ 10^{-2}$	45	2.5
Неводонасыщенный песок с $\rho = 1.6 – 1.7$ г/см^3	15	2.8
Неводонасыщенный песок с $\rho = 1.5 – 1.6$ г/см^3	7.5	3.0
Неводонасыщенный песок с $\rho = 1.4 – 1.5$ г/см^3	2.5	3.5

Выход ударной волны на поверхность Земли. Рассмотрим пример, когда УВ подходит снизу к дневной («свободной») поверхности (“падает”) - под некоторым углом α. Из сейсмических наблюдений этот угол, соответствующий направлению “главного удара” (main shock) землетрясения, находится в пределах 40-50° к горизонту. Например, при Спитакском землетрясении (1988, Армения) угол равен примерно 50°, а при Нортриджском (1994, США, Калифорния) - 40° и т.п. Наша модель позволяет определить область (эпицентр) разрушений такого землетрясения: Расстояние вдоль направления распространения УВ равно ≈ Δx, а поперек направления – равно линейному размеру очага. Например, в Нортридже длительность импульса УВ (в нашей интерпретации) составляла ≈ 8 с, что при скорости распространения УВ ≈ 5 - 6 км/с, определяет область разрушений $\Delta x \approx$ (30 - 40) км. Причем, что характерно для землетрясений с косым падением УВ, эпицентр землетрясения (как проекция гипоцентра), как правило, не совпадает с областью максимальных разрушений. В качестве подтверждающего примера можно привести диаграмму разрушений землетрясения в Нортридже, где эпицентр находится в стороне от области максимальных разрушений (Harp, Jibson, 1996). Аналогичная ситуация наблюдалась и в Спитаке, и во многих других землетрясениях.

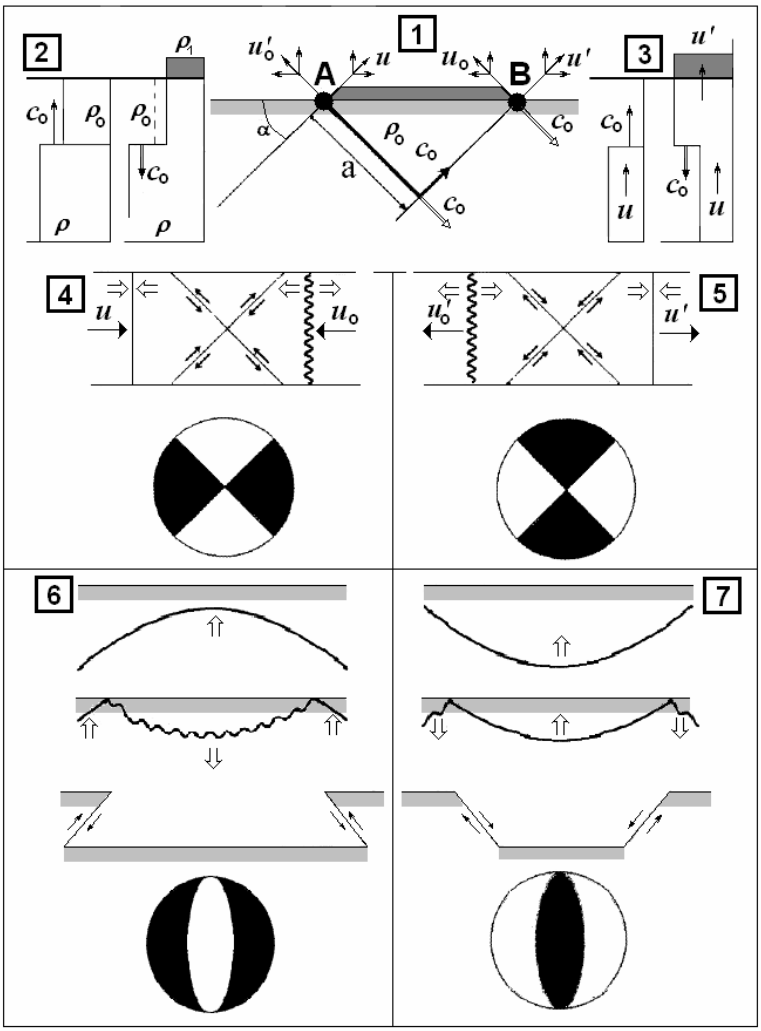


Рис. 10-1. Выход фронта плоской ударной волны (шириной **a**) на поверхность Земли под углом α к линии горизонта [1 – 5]. Выход на поверхность сферической ударной волны [6, 7]. Пояснения в тексте.

Акцентируем внимание на процессах, сопровождающих выход не слишком сильной ударной волны на поверхность (см. рис. 10-1). Выход ударной волны под углом α к линии горизонта изображен на рис. 10-1-1. Здесь фронт ударной волны, шириной a, двигающийся со скоростью c_o, подходит под углом α к земной поверхности, вещество которой обладает плотностью ρ. Распространение ударной волны сопровождается сравнительно медленным движением сплошной среды с массовой скоростью u. Ударная волна отражается на участке AB и уходит вниз со скоростью c_o. При отражении возникает быстро затухающая волна разгрузки (разрежения, растяжения), движение которой сопровождается перемещением вещества со скоростью u_o. Действие на грунт силы, связанной с перемещением массы с вертикальными (вверх) компонентами этих скоростей приводят к разуплотнению, расширению грунта и подъему его относительно начального уровня на высоту порядка метра, как это, например, наблюдалось во время Чуйского (Геодаков и др., 2003) и Нортриджского землетрясений (Shen et al., 1996).

На участке AB за счет отражения ударной волны, может возникнуть система сил, направленных друг навстречу другу соответственно тому, как направлены горизонтальные компоненты массовых скоростей: $u - u_o$ (рис. 10-1-4), либо $u' - u_o'$ (рис. 10-1-5). Ниже этих рисунков показаны диаграммы первых вступлений (разломные диаграммы), соответствующие ситуациям, изображенным выше.

На рис. 10-1-2 изображено распределение плотности до (слева) и после выхода нормально падающей ударной волны (справа). Видно, что после выхода ударной волны и отражения волны от поверхности, вещество с плотностью ρ_1 (меньшей ρ_o) находится выше начального уровня. Аналогичная картина представлена на рис. 10-1-3, где изображены скорости в нормально падающей ударной волне со скоростью c_o и массовые скорости u и $u' \approx 2u$ до выхода ударной волны на поверхность (слева) и после её выхода на поверхность. На рисунках 10-1-6 и 10-1-7 показаны схемы прихода к свободной поверхности сферической ударной волны: выпуклой (6) и вогнутой (7) и формирование отраженной волны разгрузки. Ниже, под каждой из схем приведены диаграммы первых вступлений. Темные секторы на всех диаграммах рис. 10-1 означают области сжатия, светлые – растяжения. Комбинируя из четырех приведенных диаграмм, можно получить любую из наблюдаемых в природе диаграмм. В нашей модели форма диаграммы определяется исключительно формой фронта ударной волны, которая, в свою очередь, определяется местными условиями её возникновения и прохождения по среде. Отсюда следует, что выход ударной волны сопровождается переносом вещества и наблюдаемым неоднократно вспучиванием почвы. Кроме этого, начальная форма ударной волны определяет форму разломных диаграмм (диаграмм первых вступлений).

Различие в скоростях распространения ударных волн по глубине и вдоль поверхности, вызывает возникновение растягивающих и сжимающих усилий разных знаков, приводящих к появлению разломов и разрывов земной поверхности. Соответственно, фазы вступления поверхностных волн, возникающих при образовании разрывов и фиксируемые сейсмостанциями, “повторяют” фазы направлений растяжения-сжатия, определяемых (как, например, в Нортридже) по величине доплеровского изменения стабильной частоты радиосигналов со спутников (система GPS).

Взаимодействие ударных волн на поверхности. Рассмотрим волновую картину процессов формирования ударной волны в недрах Земли, движение её к дневной поверхности, возникновение волн разгрузки (растяжения) и взаимодействие этих волн. Воспользуемся приемом из практики изучения ударных волн и изобразим рассматриваемые процессы на xt-диаграмме, где x - координата, а t - время. Обозначим x_o, t_o - координату и время формирования ударной волны на поверхности кристаллического тела (см. рис. 10-2).

Предположим, что в земной коре, на глубине между 40-50 км (точка 0: $x = 0$) и 15-20 км (точка D: $x = x_0$), расположено геологическое тело, обладающее вполне определенными свойствами:

- во-первых, это должно быть прочное тело, способное к накоплению упругой энергии и активному трещинообразованию;
- во-вторых, тело должно быть изотропным, т.е. в нём не должно быть внедрений вещества, со свойствами отличными от свойств тела (плотность и скорость звука);
- характер нагрузки тела (в-третьих) должен быть таким, чтобы в нем могла возникнуть пространственно когерентная структура микротрещин или, иначе, - дальний порядок;
- в-четвертых, в этом теле должны раскрываться трещины вполне определенного размера, не более 100-200 микрон, которые потом, после события, могли бы “залечиться” так, что тело могло бы быть готово к очередному событию, и т.п.

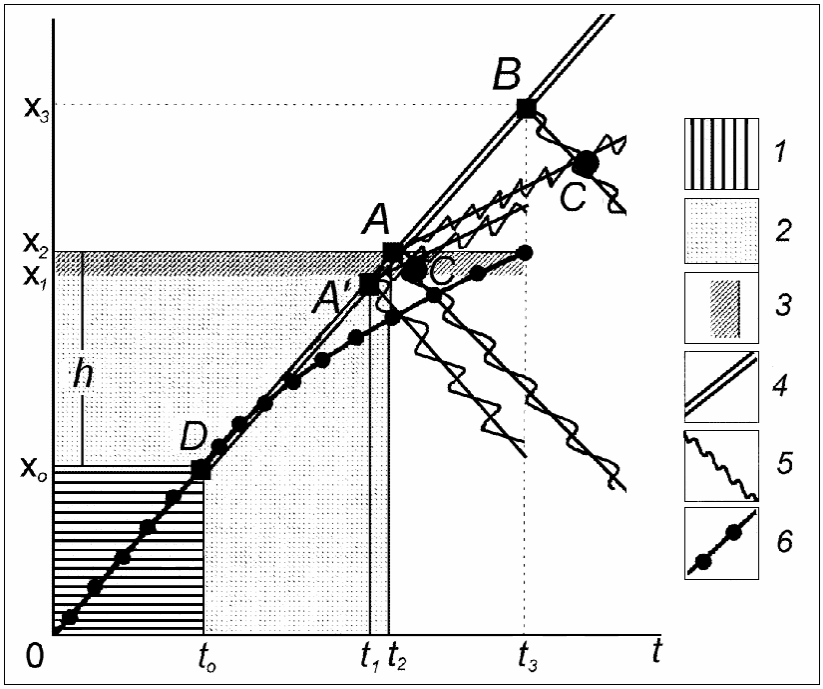


Рис. 10-2. Выход ударной волны на свободную поверхность (в точке x_2, t_2). УВ выходит на свободную поверхность и образует волну разгрузки, “бегущую” в обратном (по отношению к ударной волне) направлении. Длительность её импульса Δt, за это время ударная волна проходит по земной поверхности расстояние $\Delta x = x_3 - x_2$, h – глубина гипоцентра. В точке B так же возникает волна разгрузки, которая направлена против направления ударной волны.

При выполнении этих требований, в сейсмоактивной среде такого геологического тела (1 на рис. 10-2) возможно возникновение акустического стимулированного сверхизлучения (Кузнецов, 2001) и образование ударной волны. Которая, возможно, возникает в тот момент и в том месте, где скорость распространения волны (6) в среде превысит местную скорость звука, хотя возможны и другие (как будет показано ниже) механизмы образования ударной волны. В нашей модели, это, скорее всего, произойдет на границе (3, точка A) геологического тела (2) с окружающей его средой, в которой местная скорость звука ниже, чем в теле.

В точке (A: x_2, t_2) ударная волна (4) выходит на свободную поверхность (см. рис. 10-2) и образует волну разгрузки (5), “двигающуюся” в направлении отражения (по отношению к ударной волне). Если в среде имеется не совсем открытая поверхность, например, - слой с различающимися плотностями среды (точка A’: x_1), то и на этой плоскости может возникнуть волна разгрузки. Длительность импульса ударной волны Δt конечна, за это время она проходит по земной поверхности расстояние $AB = \Delta x = x_3 - x_2$,.

По теореме Цемплена, волна разрежения в среде с нормальными термодинамическими свойствами - образоваться может, но распространяться - нет (Зельдович, Райзер, 1966). Взаимодействие фронтов ударной волны и волны разгрузки происходит практически в точке возникновения волны разгрузки (разрежения). (Поэтому, выражения типа: “бегущая” волна разрежения, - взяты в кавычки). Как известно, на фронте ударной волны происходит сжатие вещества среды, а в области фронта волны разрежения - растяжение. Взаимодействие фронтов этих волн приводит примерно к удвоению величины растягивающих напряжений - разрывов. Это явление аналогично тому, как в электромагнитной волне, распространяющейся вдоль линии, возникает удвоение напряжения на ее разомкнутом конце.

Рис. 10-3 демонстрирует выполнение принципа Рейда, сформулированного им как «теорию упругой отдачи». Статическая подвижка по разлому АА – σ соответствует импульсному движению среды на поверхности при взаимодействии УВ с волной разрежения (ВР). УВ образуется в максимуме напряжений, согласно закону Кулона-Мора под углом в 45° к действующему напряжению.

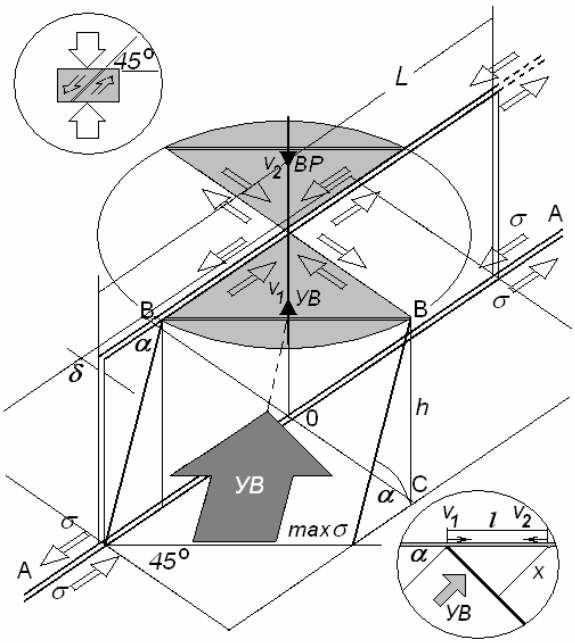


Рис. 10-3. Выход ударной волны (УВ) на поверхность под углом α к поверхности и углом 45° к направлению подвижек «σ» по разлому «АА» (закон Кулона-Мора). Взаимодействие УВ с волной разгрузки (ВР) приводит к подвижкам, повторяющим подвижки по разлому (выполнение принципа Рейда).

Взаимодействие ударных волн с преградой. Отколы и разрушения. Предлагаемый здесь принципиально новый механизм сильных движений среды при землетрясении, - основан на известной физике взаимодействия волн, возникающих при выходе ударной волны на «свободную» поверхность твердого тела. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в книге Забабахина (1997), которой будем придерживаться при изложении материала этого раздела.

Как известно, ударная волна - это волна сжатия, на очень узком фронте которой, термодинамические характеристики претерпевают разрыв. Эта волна, при прохождении через твердое тело, уплотняет его, а при расщеплении на внутренних неоднородностях тела, - приводит к генерации и излучению объемных волн. Ударная волна, как отмечалось выше, отличается от обычных акустических (сейсмических) волн ещё и тем, что вслед за фронтом УВ происходит движение (течение) вещества твердого тела, причем массовая скорость этого течения значительно меньше скорости ударной волны, и, чем интенсивнее ударная волна, тем выше массовая скорость. При выходе ударной волны на поверхность твердого тела образуется волна разрежения, двигающаяся в сторону, обратную движению ударной волны. Образование волн, идущих в обе стороны от «свободной» поверхности принято называть *распадом разрыва.* Разрыв в начальных условиях распространения УВ действительно исчезает, так как образуются два других разрыва. В книге (Забабахин, 1997) рассмотрены четыре возможных типа распада разрыва, из которых нас будет интересовать лишь четвертый. Все типы распада разрыва изображены на рис. 10-4 (сверху вниз):

- Образование двух ударных волн. Такой тип распада встречается при выходе УВ из более «мягкого» вещества в более «жесткое».

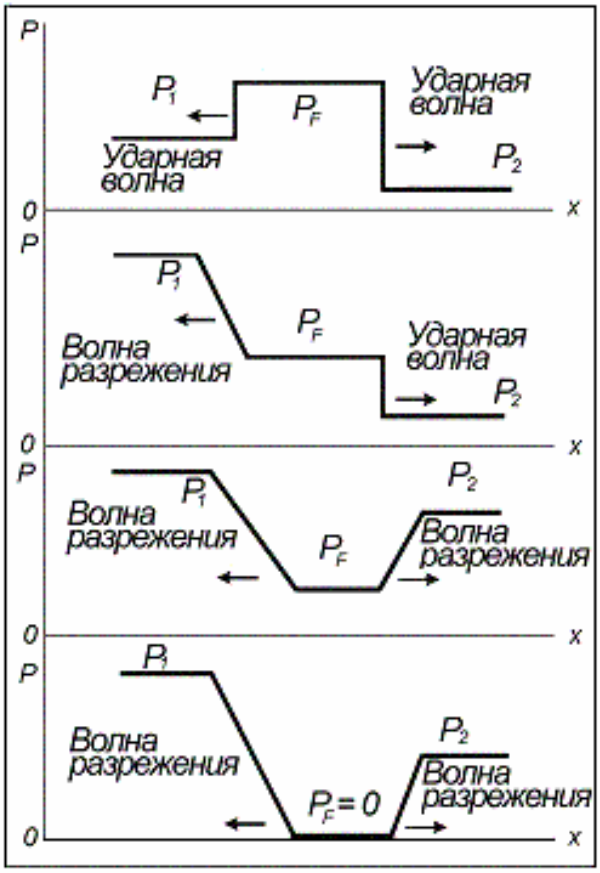


Рис. 10-4. Возможные типы распада разрыва (Забабахин, 1997). Давления P_1 и P_2 – на фронтах волн ударной и разрежения, давление P_F – в теле, после прохождения по нему этих волн. Стрелки – направления распространения волн.

- Образование ударной волны и волны разрежения. Это происходит при выходе УВ из более жесткого вещества в более мягкое. Массовая скорость частиц более жесткого вещества удваивается и в нем начинает распространяться волна разрежения.
- Образование двух волн разрежения. Они возникают в том случае, когда, строго говоря, разрыва в начальных условиях нет, а волна разрежения приходит на границу двух сред, до этого сжатых и покоящихся. На Земле такая ситуация может возникнуть при выходе ударной волны на поверхность и образовании волны разрежения. Волна разрежения приходит на границу двух сред, например, грунта, лежащего на гранитном основании, либо рыхлого грунта на границе вечной мерзлоты и т.п. Волна разрежения является фактически волной плавного изменения состояния и не носит характера ударной волны, т.к. фронт такой волны имеет конечную ширину.
- Образование двух волн разрежения и разрыва сплошного вещества возможно при слабом начальном сжатии. При интенсивной волне разрежения элементы вещества начинают двигаться друг от друга в противоположных направлениях, т.е. происходит откол, - разрушение ранее целого и компактного вещества.

Особенности сильных движений. В течение последних 25 лет в сейсмически опасных регионах США и Японии созданы измерительные и информационные сети, позволяющие фиксировать комплекс явлений на земной поверхности в момент землетрясения. Например, землетрясение, в Нортридже, вблизи Лос-Анжелеса было зарегистрировано примерно 150 приемниками GPS (Global Positioning System) с точностью перемещений грунта порядка 1 мм. Кроме этого, использовались геодезические приборы, сейсмические датчики ускорений и т.п. Объем информации по сильным движениям Нортриджского

землетрясения так велик, что выбрать какую-либо конкретную деталь, и на ней сконцентрировать внимание, просто невозможно. Надо сказать, что данных по землетрясению в Кобе (Япония) 1995 г. не меньше, чем в Нортридже.

Обсудим особенности сильных движений грунта при землетрясении. В качестве примера, остановимся на данных, полученных с помощью датчика горизонтальных перемещений, установленного в 80 м. на 65° СВ от разлома Сан Андреас, в момент Паркфилдского землетрясения 1966 г. Зависимость ускорения, скорости и величины смещения, грунта Паркфилдского землетрясения 1966 г., приведены в книге Аки и Ричардса (1983). Анализируя эти данные, можно видеть, что поведение упругой среды (грунта) скорее характерно для жидкости. Действительно, колебания смещений среды в горизонтальном направлении в момент землетрясения, напоминают волны на воде при падении в неё камня. Можно оценить: длительность периода колебаний $T \approx 1$ с, среднюю величину групповой (массовой) скорости $u \approx 10$ см/с (максимальное значение u в 80 метрах от разлома более 50 см/с), волновое число $k = \omega/u \approx 0.1$ см$^{-1}$. Величины k и ω для волн на поверхности жидкости связаны дисперсионным уравнением:

$$\omega = [g\,k + (\alpha^* k^3)/\rho]^{1/2},$$

где ρ - плотность среды, g – ускорение силы тяжести, α^* - коэффициент поверхностного натяжения. Подстановка в эту формулу оцененных нами данных, позволяет судить о величине «поверхностного натяжения» грунта, приобретшего, при ударной нагрузке на него в момент землетрясения, свойства, характерные для жидких сред. Величина α оказывается порядка 10^5 дин/см (для сравнения α:* воды ≈ 70 дин/см, литосферы $\approx 10^{19}$ дин/см). Таким образом, полученная нами оценка величины поверхностного натяжения не слишком экзотична и вполне может оказаться реальной. При этом грунт, в момент его сильного нагружения, может проявлять вызванную пластичность и действительно вести себя как «вязкая жидкость». Далее рассмотрим несколько примеров сильных движений грунта при землетрясении.

Откольные явления в грунтах. Приведем результаты экспериментов по исследованию явлений отколов в грунтах, возникающих при взрывах в скважинах, выполненных более 30 лет тому назад (Гвоздев, Кузнецов, 1967). Эксперимент состоял в регистрации коротких импульсов от взрыва небольших зарядов взрывчатых веществ, помещенных в скважину на глубину до 20 м, с помощью широкополосной сейсмической аппаратуры. С увеличением веса заряда (или уменьшением глубины его заложения) форма регистрируемого импульса менялась. На больших глубинах и малых зарядах, импульс был практически однополярен. Отколов грунтов при этом не наблюдалось. С увеличением веса взрывчатых веществ, на регистраторе появлялся второй импульс, следующий за первым, причем обратной полярности. С появлением второго импульса наблюдались отколы. Расположение датчика в скважине на сравнительно небольшой глубине приводило к тому, что на этом датчике второго импульса не наблюдалось, в то время как и отколы, и второй импульс на датчике, установленном на грунте, - регистрировались. Эти эксперименты демонстрируют возникновение волны разгрузки, следующей за ударной волной, и ее действие - отколы, а также ее быстрое затухание на сравнительно небольших глубинах. Заметим, кстати, что неоднократные попытки проследить трещины, образовавшиеся при землетрясении вглубь, заканчивались безуспешно: на глубине, большей, чем наблюдаемая глубина открытой трещины, она никогда не прослеживается (частное сообщение академика Н.Н.Пузырева).

Особенности сильных движений землетрясений. Физику землетрясений нельзя понять, если базироваться только на теоретических моделях, натурных и лабораторных экспериментах. Решающую роль должны сыграть непосредственные наблюдения за сильными землетрясениями, выявление их общности и различий, пространственных и

временных особенностей и закономерностей макросейсмики. Выясним, может ли оказаться полезным использование ударно-волновой модели при обсуждении особенностей явлений в грунте, сопровождавших сильные землетрясения.

Нортриджское землетрясение (*M* = 6.7; 17.01.1994). Любая теория явления, а так же его физическая модель, - проверяются опытом, т.е. экспериментом или качественными наблюдениями. В этом плане наблюдения за Нортриджским землетрясением 1994 г в своем роде - уникальны. Воспользуемся данными наблюдений, полученными американскими сейсмологами в момент прохождения этого землетрясения и некоторое время спустя после него. Используемые нами данные в значительной массе собраны в специальном выпуске BSSA (Northridge, 1996).

Наиболее изученное из землетрясений, - Нортриджское произошло вблизи Голливуда, пригорода Лос Анжелеса, в сейсмоопасном и густонаселенном районе, где сосредоточено наибольшее количество сейсмической измерительной аппаратуры. Особую ценность, на наш взгляд, представляют собой результаты измерения трех компонент сильных движений на специально оборудованном полигоне Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996), а так же результаты исследования величины и направления подвижек в очаге землетрясения.

Нортриджское землетрясение 6.7 баллов (энергия $\sim 10^{22}$ эрг) произошло 17 января 1994 г. Координаты гипоцентра 32.2 ° N; 118.5 ° W; глубина 16.6 км. Сейсмический момент 1.2 10^{26} дин·см. Ориентация разлома: направление 131°; наклонение: 50°; уклон: 115°. Размер зоны разрушений 20×20 км^2, скорость разрыва 2.8 км/с, фрактальная размерность D = 2, напряжение $\Delta\sigma$ = 100 бар (Anderson , Yu, 1996).

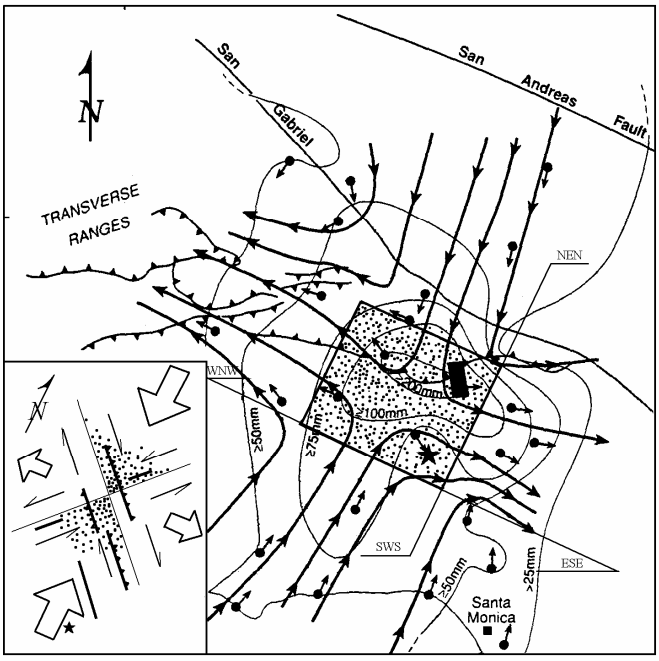


Рис. 10-5. Расположение GPS станций (точки) в момент Нортриджского землетрясения. Звезда – эпицентр землетрясения, выделенный прямоугольник – область сильных движений, черный прямоугольник – специальный полигон VNC, стрелки показывают направления горизонтальных движений грунта. Слева, на вставке, - направление сжимающих и растягивающих сил в районе разлома Сан-Андреас.

На рисунке 10-5 представлено расположение GPS станций в районе Нортриджского землетрясения и величины перемещений грунта в момент толчка в горизонтальном направлении. Точками выделен прямоугольник размером 20×20 км^2, на который

приходился основной удар землетрясения, звездочкой – эпицентр землетрясения. Одна сторона прямоугольника ориентирована WNW-ESE, другая NEN-SWS. Черный маленький прямоугольник внутри выделенного соответствует положению Van Norman Complex, где были зарегистрированы сильные движения почвы. Слева внизу на вставке показано распределение действующих при землетрясении сил и направлений подвижек на поверхности.

Рисунок 10-6 показывает величины вертикальных и горизонтальных амплитуд и скоростей перемещений грунта, измеренных на Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996). Черные прямоугольники на рис. 10-6 соответствуют усредненным за 1 секунду величинам направлений смещений и векторов скоростей. Анализируя амплитуды и скорости перемещений грунта, приведенные на рис. 10-6, можно выделить некоторую квазипериодичность процесса $T \approx$ 2-3 сек. Видно, что амплитуда горизонтальных перемещений и скоростей больше, чем вертикальных, примерно в 2 – 3 раза, при этом амплитуда вертикальных колебаний порядка $h \approx$ 10 – 20 см. Максимальная скорость горизонтальных движений грунта достигает 177 см/с, средняя скорость вертикальных, - 10 – 20 см/с. Максимальная амплитуда горизонтальных движений - до 40 см. Условная длина волны вертикальных колебаний $\lambda \approx$ не более 50 см. Отношение h/λ не менее 1/5, что говорит о неустойчивости волн (Условие устойчивости: $h/\lambda < 1/2\pi$).

Анализ данных по сильным движениям показывает, что в отмеченном на рис.10-5 прямоугольнике максимальных разрушений (размером 20×20 км^2) в момент толчка произошло поднятие (см. рис. 10-1) грунта на высоту ≈ 50 см.

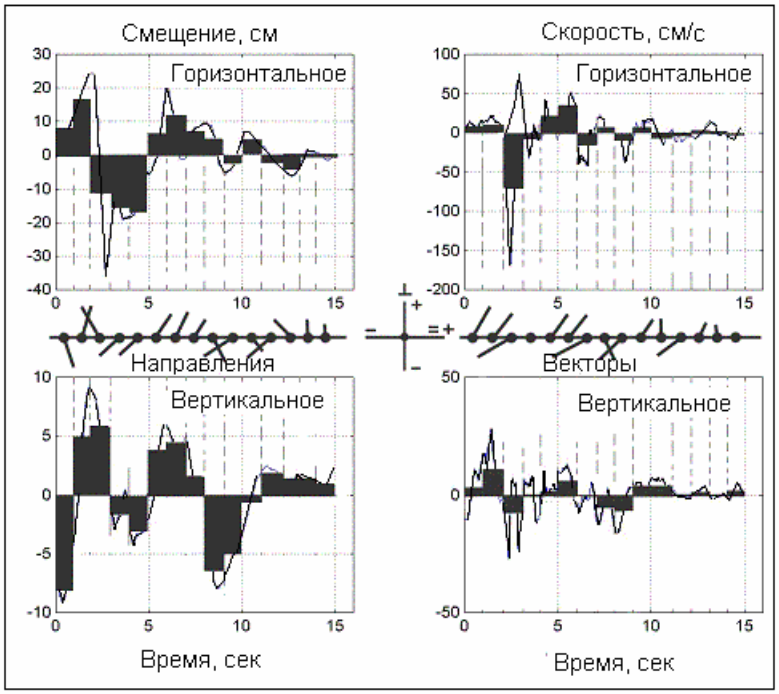


Рис. 10-6. Временная зависимость продольных компонент (transverse, vertical) скоростей и смещений, записанных на станции Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996).

Чуйское землетрясение на Горном Алтае (M = 7.5) произошло на юге Горного Алтая, на территории Кош-Агачского района, 27 сентября 2003 г. в 11час. 33 мин. по Гринвичу. Землетрясение сопровождалось афтершоками, наиболее сильные из них два: первый - 27.09.03 в 18 час. 52 мин. по Гринвичу с магнитудой M = 6.4 и второй - 1.10.03 в 1ч. 03 мин.28 сек. по Гринвичу с магнитудой 7.0. Главный удар афтершока 1 октября произошел

в районе пос. Акташ (место расположения сейсмостанции), где отмечались повреждения зданий 7-ми, 8-ми бальной интенсивности.

Очаг землетрясения, в ходе вспарывания земной коры, «вышел на поверхность» в виде системы первичных сейсморазрывов (рис. 10-7). Эта система прослеживается на протяжении 20 км в бассейне р. Чаган-Узун на восточном погружении Северо-Чуйского хребта (рис. 10-7). Первичный характер разрывов характеризуется их морфологией и тем, что эти трещины представляют собой систему параллельных рвов, секущих различные формы рельефа. Эта система вытянута в северо-западном направлении.

Сейсмотектонические разрывы представляют собой эшелонированную систему трещин сжатия и расширения, укладывающуюся в линию СЗ простирания. Такая структура сейсмотектонического разрыва, по мнению авторов (Геодаков и др. 2003), характеризует подвижку в очаге как сдвиг в горизонтальной плоскости. Строение зоны сейсморазрывов несколько отличается для различных участков. Так, например, на водоразделе рек Чаган и Елангаш разрыв разветвляется на две основных трещины, которые затем смыкаются, представляясь в виде трещин северно-западной ориентировки. Наблюдается правостороннее смещение на 0.5 м. по западной ветви разрывов. По восточной ветви - смещение достигает 0.2 м. Блок, заключенный между этими рвами, опущен на 0.2-0.3 м и рассечен многочисленными диагональными трещинами. Авторы отмечают, что в зоне эпицентра Чуйского землетрясения находятся следы предыдущих землетрясений, которые, так же как современные, были следствием разрядки одного и того же очага. Чуйское землетрясение, по всей видимости, не является уникальным, - оно лишь несколько «обновило» следы прошлых, возможно, более сильных землетрясений. Этот факт однозначно демонстрирует, что очаг сильного землетрясения оказывается «привязанным» к определенной геологической структуре.

Сильные движения грунта и его разрушения, произошедшие во время рассмотренных нами выше землетрясений, находят непротиворечивое объяснение в контексте ударно-волновой модели.

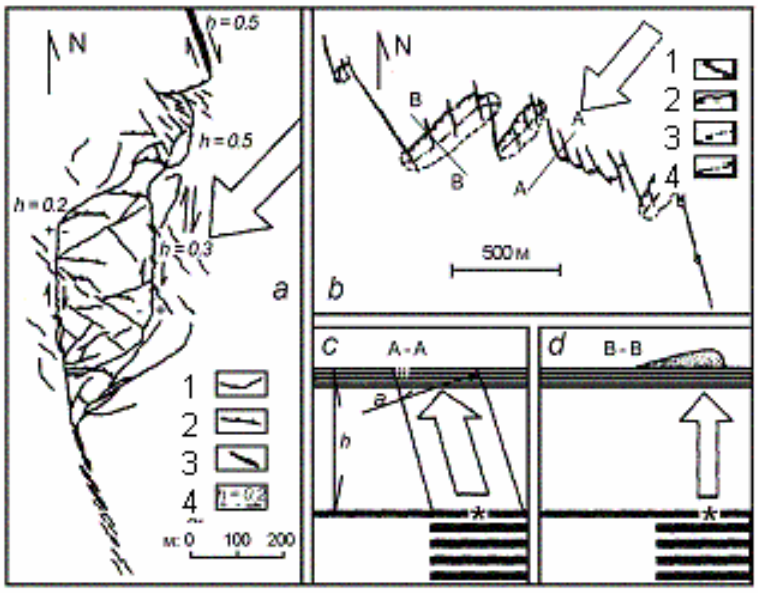


Рис. 10-7. Слева: (a) структура сейсморазрыва на водоразделе рек Чаган и Елангаш: 1 – закрытые трещины и разрывы, 2 – валы вспучивания, 3 – сейсморвы, 4 – амплитуда (м) и направления смещения. Большая стрелка – направление главного удара, параллельные стрелки – направления подвижек почвы. Справа вверху: (b) структура сейсморазрыва на водоразделе р. Талдура-Кускуннур. 1 – сейсморвы; 2 - бровки валов вспучивания; 3 – контуры валов вспучивания; 4 – оси валов вспучивания (Геодаков и др. 2003). Справа

внизу: (c, d) разрезы по А-А и В-В, звездочка – гипоцентр, стрелка – направление главного удара, **а** - фронт УВ.

Рассмотрим два различных подхода к оценке энергии разрушений в эпицентре землетрясения: один, - с точки зрения теории упругости, другой - гидродинамики. Обратим внимание на то, что в преобладающем большинстве работ по физике землетрясения принято считать потери на разрушения очень малыми, - менее одного процента от полной энергии землетрясения. Выясним, насколько справедливо это утверждение в случае Чуйского землетрясения.

Сейсмическая энергия. В механике землетрясения принято считать, что сейсмическая волна, достигая поверхности Земли, вызывает смещение земной поверхности x:

$$x = a\ cos\ (2\pi t/T_o),$$

тогда скорость движения грунта:

$$V = -\ (2\pi a_o/T_o)\ sin\ (2\pi t/T_o).$$

Удельная энергия:

$$e = (\rho/4)\ (2\pi t/T_o)^2,$$

Кинетическая энергия, излучаемая очагом:

$$E = 3\pi^3\ h^2\ c\ t_o\ \rho\ (a_o/T_o)^2.$$

Здесь a_o и T_o – амплитуда и период волны, h - глубина очага, c – скорость распространения волны, $t = nT_o$ – длина цуга волн.

Оценим величину (a_o/T_o), принимая: c = 3,6 км/с, h = 18 км, ρ = 2.7 г/см^3 и $E = 10^{23}$ эрг. Величина (a_o/T_o), иначе, скорость движения грунта, $V \approx (5 – 10)$ см с$^{-1}$. По-видимому, эту оценку можно принять как некоторое усреднение, т.к. в эпицентре 7.5 бального землетрясения скорость движения грунта значительно (в 10 – 20 и более раз) выше, хотя, конечно, это утверждение измерениями не обосновано. Тем не менее, такая оценка полезна, и в дальнейшем, обсуждая параметры сильных движений в эпицентре Чуйского землетрясения, будем ориентироваться на неё.

Характерно, что в формуле для E нет расстояния до места прихода излучения от очага. По-видимому, это имеет глубокий смысл. Например, если оценить величину $\sigma = \rho cV$, где c – скорость звука, то оказывается, что напряжение σ соответствует примерно 1 бар. Как было оценено выше, напряжение в волне в 1 бар было зарегистрировано на сейсмостанции в Новосибирске (4 балла). Однако, главный толчок Чуйского землетрясения в Барнауле вызвал сотрясение всего в 2 балла, хотя Барнаул в два раза ближе к эпицентру, чем Новосибирск.

Энергетика сильных движений. Воспользуемся формулой: $p = \rho Du$, где примем: D = 3.5 км/с, u = 1м/с, p = 100 бар (полагая, что сброшенное сдвиговое напряжение примерно равно давлению p). Как отмечалось выше, эти параметры измерены при наблюдении Нортриджского землетрясения в Калифорнии и примерно соответствуют его энергетике (M = 6.7). Энергия Чуйского землетрясения (M = 7.5) примерно на порядок выше, следовательно, величины D и u, соответственно, выше.

Предположим невероятный случай, что вся энергия землетрясения E пошла, например, на разуплотнение грунта на поверхности $S = 10\times10$ км^2 под действием волны разрежения. В этом случае глубина слоя разуплотнения грунта была бы равна E/pS =10 метрам. Эта оценка показывает масштаб явления. Грубая оценка суммарной длины очень сильных сейсморазрывов Алтайского землетрясения примерно 5 км, хотя мелкие разрывы прослеживаются на расстоянии до 100 км. Если принять глубину разрывов 5 м, а ширину – 20 м, то объем, который подвергся разрушению, равен $5\cdot10^5$ м^3. На эту «операцию» было

затрачено примерно $5 \cdot 10^{19}$ эрг. Оценим объем грунта, подвергшегося вспучиванию. Оказывается, что грубая оценка величины этого объема равна объему трещин. Возможно, это совпадение, но, возможно, - это реализация закона сохранения массы в ударной волне. В любом случае, суммарная энергия, потраченная на получение разрывов и вспучиваний, составляет примерно 10^{20} эрг на один из многих участков земной коры в эпицентре землетрясения. Будем, к примеру, считать, что таких участков 10, тогда получается, что на реализацию этого типа сильных движений и разрушений в эпицентре землетрясения «уходит» примерно 1 % от суммарной энергии. Пока не учитывалась часть энергии, которая «пошла» на работу грифонов, подвижку среды как квазижидкости и образование оползней.

Оценим, для сравнения, порядок кинетической энергии, израсходованной на образование грифона. Воспользуемся формулой Пуазейля для оценки объемного расхода жидкости V(см^3/с), изливающейся через круглое отверстие радиусом R, длиной «трубы» l, вязкостью «жидкости» η и под давлением Δp:

$$V = (\pi R^4/8\eta l)\, \Delta p$$

Подставляя $R = 10^2$ см, $\eta = 10^5 - 10^6$ Пз, $l = 10^2$ см, $\Delta p = 10^8$ дин/см^2, получаем: $V = 10^8$ см^3/с. Учитывая, что время «работы» грифона порядка нескольких минут, масса (объем ΔV) выброшенного материала может достигать: $m \geq 1000$ т. Положим, что линейная скорость переноса массы m порядка $v = 10^4$ см/с, это позволяет сделать грубую оценку кинетической энергии работающего грифона: $E = 10^{17}$ эрг. Величину E можно оценить и по формуле: $E = \Delta p\ \Delta V$. Подставляя: $\Delta p = 10^8$ дин/см^2, $\Delta V = 10^9$ см^3, получаем ту же величину E. Даже если допустить, что во время Чуйского землетрясения "работало" 100 таких грифонов, их суммарная энергия ($E = 10^{19}$ эрг) оказывается значительно меньше (в сто раз), чем энергия, которая пошла на образование сейсморазрывов.

Анализируя приведенные данные, вернемся к одной интересной особенности сильных движений. Сильные движения почвы имеют, несомненно, колебательный неустойчивый характер. Можно считать, что среда, в которой происходят подобные затухающие колебательные движения, ведет себя как «квазижидкость», в которой возбудили горизонтальные колебания (см. рис. 10-6). Фазы вертикальных и горизонтальных перемещений и скоростей не совпадают. Характерный вертикальный размер пространства, на котором наблюдается колебательный процесс: $a \approx 1$ м, величина напряжения в главном толчке землетрясения: $\sigma \approx 100$ бар. Знание этих параметров позволяет оценить величину вязкости «жидкой» среды: $\eta = \sigma a/v \approx 10^7$ Па с. Оценка вязкости показывает, что вещество верхнего слоя почвы действительно находится в момент землетрясения в квазижидком, пластическом состоянии. Подобные оценки и сам подход к ним следуют из книги (Зельдович, Райзер, 1966).

Смыкание откола. При соблюдении некоторых условий образовавшийся откол (разрыв сплошности материала) может сомкнуться. Для этого в материале должна возникнуть волна сжатия, т.е. ударная волна, которая может остановить процесс откола. Условия возникновения УВ могут быть связаны как с внутренними причинами, т.е. особенностями распространения волны разгрузки, так и внешними, - заключающимися в особенностях волновой обстановки вокруг материала, претерпевающего откол. Возможно, подобное явление, т.е. раскрытие трещины и, следующее за ним, смыкание её, наблюдал очевидец (пастух) во время Чуйского землетрясения в районе с Чибит. По словам очевидца, скорости раскрытия трещины и последующего её смыкания были сравнительно невелики, а сам процесс хорошо различался во времени. Опытные сейсмологи утверждают, что подобные случаи встречались и раньше, например, на Памире. Для объяснения этих фактов необходимо в рамках модели сильных движений получить оценки времени и

скорости образования сейсморазрывов, различимых глазом, которые должны быть сравнимы со скоростями прихода к сейсморазрывам ударных волн.

Влияние прочности материала на скорость откола. Обсуждая проблему откола (разрыва), предполагалось, что для проявления этого явления достаточно того, чтобы плотность вещества после выхода ударной волны на поверхность оказалась ниже исходной. Действительно, это не совсем верно. Для начала откола необходимо, чтобы плотность оказалась меньше заданной, заранее определенной. Это связано с тем, что вещество, через которое распространяется УВ, обладает прочностью σ_p.

О прочности грунта. Известно, что теоретическая прочность на разрыв твердого тела $\sigma_p \approx 0.1\ E$, где E – модуль Юнга. Учитывая справочные данные, скорости сейсмических волн в грунте и его плотность, можно с уверенностью считать, что величина $E \approx 1$ кбар. Фактически прочность меньше чем σ_p примерно в 100 – 1000 раз. Для грубых, качественных оценок примем $\sigma_p = 1 – 10$ бар, или $10^6 – 10^7$ дин/см^2, что соответствует давлению вышележащих слоев грунта $p = \sigma_p = \rho g h$ на глубине h порядка нескольких метров (обычная для землетрясений глубина разрыва поверхности).

Скорость сейсморазрыва. Будем полагать, что возникновение первичных трещин сейсморазрывов в грунте идентично появлению откола в твердом теле при воздействии на него ударных волн. В этом случае можно написать формулу для величины скорости раздвижения трещины U:

$$U = 1/\rho_o \times \partial P/\partial x\ \Delta t,$$

где $\partial P/\partial x$ – градиент давления, Δt - время процесса. Очевидно, что $\partial P/\partial x = \sigma_p/\delta x$, где σ_p - растягивающее напряжение, при котором происходит откол, δx - толщина слоя откола (ширина трещины сейсморазрыва). Полагая Δt – время выхода ударной волны на поверхность до момента образования откола: $\Delta t = \delta x/C$, C – скорость звука, получаем выражение для скорости U:

$$U = \sigma_p /\rho_o C,$$

что позволяет оценить порядок величины скорости (в нашей интерпретации) раскрытия трещины-разлома U. Скорость оказывается порядка нескольких метров в секунду. По-видимому, это несколько заниженная оценка, так как, со слов очевидцев, раскрытие трещины происходит, как говорится, «на глазах у свидетеля». По-видимому, человеческий глаз способен различить скорость порядка 100 м/с. Это потребует корректировки (увеличения ~ в 10 раз) величины σ_p, что вполне правдоподобно. Важно, что скорость раскрытия трещины прямо связана с прочностью материала, что так же вполне правдоподобно.

10. 2. Распространение ударной волны от очага до поверхности.

Расщепление ударной волны в очаге на примере Нортриджского землетрясения. Очаг землетрясения в сейсмологии изучается не только по характеру разрушений и направлению подвижек земной поверхности в непосредственной близости от эпицентра разрушений. Значительно больше информации об очаге получают, как правило, по данным наблюдений на удаленных от очага сейсмостанциях. Эта информация переносится объемными волнами. Давно известно, что характер подвижек в окрестности очага (сжатий и разрежений) повторяется в фазе вступления объемных волн. Таким образом, модель очага, претендующая на адекватное описание процессов, должна находить объяснение этому известному факту.

Из физики ударных волн, распространяющихся в твердых телах при движении ударной волны со скоростью $c_o < V_P$, известно, что на неоднородностях земной коры и литосферы в очаге землетрясения, может происходить расщепление ударной волны. С расщеплением связано возникновение волны растяжения и, кроме этого, генерация

«пластических» и объемных волн. Далекими сейсмостанциями фиксируются именно те объемные волны, которые возбуждаются в очаге при расщеплении ударной волны. По характеру распространения этих волн обычно делается заключение о механизме очага землетрясения.

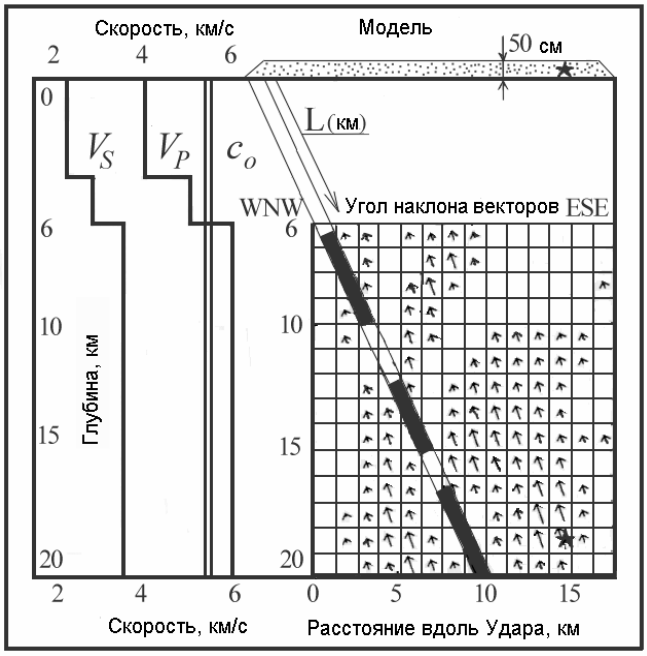


Рис. 10-8. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (справа) (Somerville et al., 1996; Zeng, Anderson, 1996). В левой части рисунка - распределение скоростей P-, S-волн и ударной волны c_o - по глубине (Shen et al., 1996).

Рассмотрим процессы, сопутствующие распространению УВ по очагу землетрясения, т.е. по геологической среде, от места образования УВ – гипоцентра землетрясения, до поверхности Земли. Положим, что геологическая среда обладает неоднородностями в виде слоистости, трещиноватости, резких изменений плотности и скорости звука и т.п. На принятом в физике ударных волн языке, все неоднородности можно считать слабыми разрывами. Приведем несколько положений теории этих явлений, имеющих непосредственное отношение к физике землетрясения в рамках ударно-волновой модели на примере Нортриджского землетрясения.

На рис. 10-8 справа, изображена модель разрывов Нортриджского землетрясения. В левой части рис. 10-8 показано одномерное распределение скоростей сейсмических P- и S- волн по глубине (Shen et al., 1996). На рис. 10-8 отчетливо видно, что уменьшение скоростей P- и S-волн соответствует глубине 6 км. Отметим, что именно на этой глубине наблюдается исчезновение векторов slip. Видно, что структура векторов не равномерная, а состоит из трех отдельных друг от друга участков. Это демонстрирует наклонная линия, в которой наличие slip, проектируемое на эту линию, отмечено черным цветом. Предположим, что изображенная картина векторов, это временной «срез» явления. «Разрыв» происходит вдоль этой линии, длина которой L примерно 22 км. Вдоль этой линии можно изобразить временную шкалу, на которой выделяются три, следующих один за другим удара. В работе (Zeng, Anderson, 1996) показано, что главный удар землетрясения в Нортридже, состоит из трех, следующих друг за другом, импульсов. Длительность главного удара землетрясения, по основанию импульса, составляет $\tau \approx 8$ сек. Скорость разрыва равна $V = L/\tau = 2.8$ км/с. Как следует из (Shen et al., 1996), величины slip векторов максимальны и равны 4 м в районе гипоцентра землетрясения. Их величина меняется в очаге в интервале от 0.5, до 3 м, а выше 6 м векторов вообще не наблюдается, угол наклона векторов к горизонту ~ 60 - 70 °.

Согласно наблюдениям, объемные волны возбуждаются на всем протяжении очага - от эпицентра землетрясения, практически до поверхности Земли. Обратим внимание на такую деталь, следующую из работы (Somerville et al., 1996): на глубине двух-трех километров и выше (рис. 10-8), т.е. вблизи земной поверхности, генерации объемных волн не наблюдается.

Для решения этой задачи обратимся к физике распространения УВ и образования ВР в сплошной среде. Волна разгрузки может образоваться не только при выходе УВ на свободную поверхность, а, как показано Зельдовичем и Райзером (1966), и при прохождении ее через вещество, нагруженное внешним давлением. Для этого необходимо выполнение ряда условий: Вещество должно быть сжато внешним давлением до величины порядка предела текучести материала ($p_{кр}$). Амплитуда УВ должна быть больше $p_{кр}$. В этом случае возбуждаются и распространяются по среде две волны, одна - "упругая", со скоростью v_p, другая - "пластическая", со скоростью $c = (K/\rho)^{1/2}$. УВ расщепляется на упругую и пластическую волны. По нагруженному телу "бежит" ударная волна разгрузки в сторону, обратную распространению УВ. Кроме этого, может образоваться еще и пластическая волна разгрузки, "двигающаяся" вслед за ударной, но с меньшей скоростью.

Описанное явление - не теоретическое предположение, оно реально наблюдалось в экспериментах с боковой разгрузкой ударных волн (Зельдович, Райзер, 1966). Заметим, что если скорость УВ значительно выше, чем местная скорость звука, расщепления волн вообще не происходит.

Соотнесем сказанное к нашей модели. Предположим, что предел текучести материала среды ($p_{кр}$) порядка 1 кбар. Это давление примерно соответствует глубине около 3 км. Кроме этого, по нашим оценкам, скорость УВ примерно (5 - 6) км/с. Скорость распространения Р-волн такого порядка значений, соответствует глубине около 2 - 3 км. Отсюда следует, что на глубинах меньших 2 - 3 км расщепления УВ и генерации ВР происходить не может. Действительно, этот эффект наблюдался при землетрясении в Нортридже. Здесь, на вертикальном разрезе (рис. 10-8), проходящем через гипоцентр землетрясения, определены вектора подвижек, соответствующие интенсивности объемных волн (Somerville et al., 1996). Как следует из этой работы, все волновые векторы направлены под углом $\approx 45°$ к горизонту, а их интенсивности изменяются, от максимальной до нуля, вдоль плоскости разреза. На малых глубинах (2 - 3 км) векторов подвижек нет. Они не наблюдаются так же в некоторых более глубоких областях разреза. Полученный результат можно интерпретировать (в рамках нашей модели) следующим образом: На малых глубинах нет эффекта расщепления УВ, поэтому не возникает ВР, поэтому нет и генерации объемных волн. Факт, что генерации объемных волн в некоторых частях разреза не происходит, может говорить, например, о том, что УВ, на своем пути, встречается с ослабленной зоной среды очага. В этой зоне не происходит расщепления УВ, либо она пересекает область пространства, в которой, по ряду причин, скорость звука значительно ниже скорости распространения УВ, что тоже может служить препятствием к расщеплению УВ и т.п. Заметим, что развиваемый нами подход находит простое и естественное объяснение еще одному явлению. Речь идет о том, что при взрывах атомных и водородных зарядов, сейсмостанциями регистрируется только волна сжатия и никогда не записывается волна обратного знака. По-видимому, это связано с тем, что ядерные заряды подрывают на таких небольших глубинах, на которых не может происходить расщепления УВ и, соответственно, генерации объемных волн.

Муйское землетрясение (*M* = 7.6 – 7.9, 57/06/27*).* В районе северного Байкала в 1957 г. не было разветвленной сейсмологической сети, тем не менее, тщательное изучение геологической структуры этого землетрясения позволяет отнести его к достаточно хорошо изученным. Дело в том, что этот район подробно изучен с помощью методов глубинного сейсмического зондирования - ГСЗ (Крылов и др., 1993). Методы ГСЗ позволяют выявить объемные, трехмерные, глубинные неоднородности литосферы. Одним из наиболее

интересных для нас результатов использования этого метода, было детальное изучение пространственных неоднородностей распределения скоростей продольных волн в очаговой области катастрофического Муйского землетрясения, произошедшего 27 июня 1957 г., его магнитуда оценивается в 7.6-7.9, интенсивность - 10-12 баллов, энергетический класс - 17, глубина очага около 15 км.

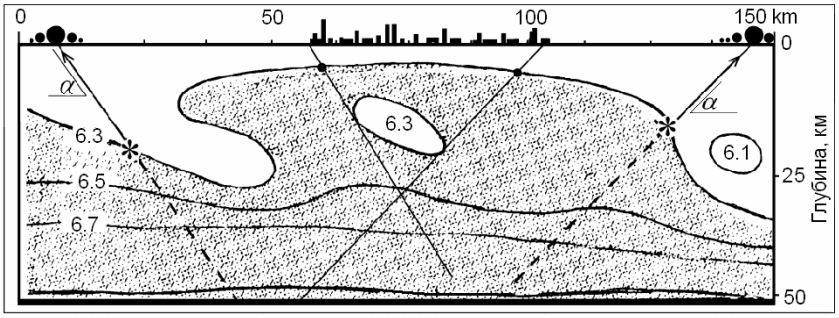


Рис. 10-9. Сейсмический разрез земной коры в Муйском районе Байкальской рифтовой зоны по данным скоростей Р-волн (Крылов и др., 1993).

Сейсмическая активность этого района, по данным наблюдений за период 1962-1979 гг., повышена в западной и северо-восточной частях района (Левая и правая части рисунка). Именно на этих участках располагаются эпицентры инструментально зарегистрированных землетрясений 12-го и более высоких энергетических классов. Подавляющее большинство таких землетрясений произошло после Муйской катастрофы (северо-восток изучаемого района, на рис. 10-9 справа). В его западной части, сильнейшим было Северобайкальское землетрясение 1917 г. (энергетический класс К = 16, магнитуда 6.6-6.7, интенсивность - 9 баллов, на рис. слева), глубина гипоцентра грубо оценивается в 15-20 км. В разделяющей эти участки зоне “сейсмического затишья” (рис. 21-8, между 50 и 100 км, где можно построить «город») в текущем столетии не зарегистрировано ни одного землетрясения с К > 12.

В районе эпицентра Муйского землетрясения на территории около 60 тыс. кв. км методом ГСЗ проведены детальные площадные и профильные наблюдения, получено около 1600 зондирований. Выявлена область повышенной скорости, вытянутая в северо-восточном направлении и распространяющаяся в нижнюю часть земной коры вплоть до ее подошвы. Область высокой скорости включает в себя зону сейсмического затишья и два района активизации. Резкие краевые неоднородности области совпадают с гипоцентрами двух сильных землетрясений. Авторы считают эту область глубинным накопителем упругой энергии. В этом случае слагающие ее горные породы должны обладать повышенной прочностью и энергоемкостью. Вероятными местами разрядки накопившейся энергии могут служить ослабленные участки на контактах высокопрочного объема с вмещающей его средой. Авторы при анализе записей колебаний сдвиговых волн не обнаружили эффектов их расщепления на SV- и SH-составляющие, что позволяет считать среду изотропной. Надо сказать, что отображение крупных черт глубинного строения по Р- и S-волнам близки. Рассматриваемое тело, несмотря на существование в нем локальных внутренних неоднородностей, в целом характеризуется относительным увеличением плотности и обоих упругих модулей. В его пределах модуль сдвига увеличен на 15-20 % от среднего значения в изученной области. Как следует из рисунка 10-9, в рассматриваемом нами сейсмически активном теле (области) скорость Р-волн, от слоя М в направлении к земной поверхности, вплоть до границы тела с вмещающей средой, постепенного уменьшается, а на его границе - убывает довольно резко.

Таких примеров, когда гипоцентры сильных землетрясений совпадают с акустической границей геологического тела, можно привести довольно много. Сюда можно с уверенностью отнести землетрясения в Нортридже и Лома Приета (США), в Кобе

(Япония), в Спитаке (Армения) и т.д. Допустим, нагрузка на геологическое тело представляет собой сумму нагрузок: литостатической и тангенциальной. Главный «удар» землетрясения может произойти под углом 45° к горизонту. Если, кроме этих сил, на среду действует ещё какая-то другая сила, например, такая, как в случае с Паркфилдским землетрясением, то суммарная нагрузка может оказаться не нормальной к горизонту, как раньше, а иметь угол наклона её вектора порядка 45°. Главный удар такого землетрясения может произойти вертикально вверх, - вдоль плоскости разлома. Очевидное условие возможности такой ситуации, следующее из нашей модели, заключается в том, что сила и характер литостатической нагрузки должны соответствовать сдвиговой, или иначе, касательному напряжению. Гипоцентры Байкальских и Калифорнийских землетрясений приурочены к некоторой скоростной, акустической «границе» геологического тела. Такая ситуация просматривается для всех хорошо изученных в последнее время землетрясений.

Афтершоки. Как известно, после сильного землетрясения в области его очага возникает рой повторных землетрясений, глубина гипоцентров которых, как правило, находится выше, чем плоскость основного удара. Согласно нашей модели, для образования объемных волн, возникающих при прохождении УВ от гипоцентра к земной поверхности, на ее фронте должны развиваться давления порядка предела текучести вещества, через которое распространяется УВ. Очевидно, что в таком случае на фронте УВ должно происходить “закрытие” (залечивание) трещин, наличие которых препятствовало (по нашей модели) возникновению акустически активной среды и образованию землетрясения. После такого “закрытия” трещин, - среда оказывается вновь способной к генерации ударных волн. Однако по прошествии определенного времени, пространство очага постепенно вновь заполняется не залечивающимися трещинами и перестает быть способным к генерации УВ. Эта идея является очевидным следствием нашей модели. В качестве подтверждения её правомерности приведем рис. 10-10 (Wald et al., 1996), из которого следует, что после Нортриджского землетрясения 1994 г. максимальная концентрация афтершоков соответствует плоскости главного удара этого землетрясения. Звезда на этом рисунке показывает положение гипоцентра, угол подхода главного удара к дневной поверхности, как мы отмечали раньше, составляет примерно 40-45°. Максимум разрушений Нортриджского землетрясения располагается строго на север от гипоцентра (эпицентра) землетрясения, в то время как максимум афтершоков немного (градусов на 20) повернут в восточном направлении (в сторону Голливуда). Рисунок 10-10 показывает, что проекция афтершоков на дневную поверхность приходится на область между гипоцентром землетрясения и эпицентром максимальных разрушений, т.е. в области максимальных значений амплитуды ударной волны, как это и должно следовать из нашей модели.

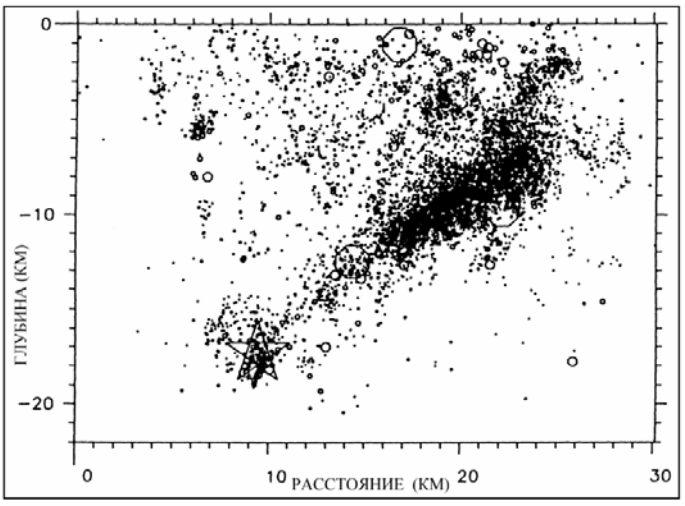


Рис. 10-10. Афтершоки Нортриджского землетрясения 1994 г. “повторяют” структуру “основного удара” этого землетрясения (Wald et al., 1996).

Обратим внимание на хорошо известный сейсмологам факт: после глубокого землетрясения афтершоки практически отсутствуют, однако, и эта закономерность иногда нарушается. Авторам (Wiens et al., 1994) после глубокого (564 км) землетрясения 9 марта 1994 г. (с магнитудой $M_W = 7.6$) в районе Тонга удалось наблюдать с помощью восьми широкополосных сейсмографов первую серию афтершоков. Афтершоки (82 события) затухали после главного толчка по степенному закону в течение 42 суток и имели магнитуды от 3.8 до 6.0. Главный толчок, и большинство афтершоков, - локализованы вдоль вертикальной плоскости главного удара с максимальным расстоянием от нее не более 5 км, что так же, как в первом случае, подтверждает нашу модель.

Подход к землетрясению как к комплексу явлений сопутствующих генерации ударной волны, распространению её по геологической среде при формировании очага и выходу волны на поверхность Земли, позволяет найти логическое решение задачи, связанной с выяснением характера распределения афтершоков во времени и пространстве. Как известно, после сильного землетрясения в пространстве, занимаемом очагом землетрясения, возникает последовательность более мелких, чем основной удар землетрясений, называемых афтершоками. Спад числа афтершоков во времени после главного удара характеризуется гиперболической зависимостью (закон Омори):

$$N(t) \sim 1/t^{\zeta}, \text{ где } \zeta > 1.$$

Зависимость, аналогичную закону Омори, можно получить, если представить, что ударная волна в момент землетрясения, проходя по частично разрушенной предыдущей сейсмичностью среде, закрывает микротрещины и поры, чем способствует генерации роя мелких землетрясений. Если принять полное число афтершоков N_o, то их изменение со временем можно описать формулой убывания люминесценции (фосфоресценции):

$$N(t) = N_o \, exp \, (- \lambda t),$$

где $1/\lambda$ - характеризует среднее время жизни возбужденного состояния, равное обратной величине вероятности спонтанного перехода в единицу времени. Иногда фосфоресценция приближенно аппроксимируется известной гиперболой Беккереля:

$$B = B_o/(1 + at)^{\alpha},$$

где B_o – начальная яркость, t - время, прошедшее после прекращения возбуждения, a и α – константы ($\alpha \leq 2$). Эта формула выражает и закон Омори, и, что вполне возможно, показывает на некоторую общность между этими процессами. Тем не менее, нельзя не отметить и принципиальную разницу между ними. Если фосфоресценция является типичным представителем релаксационных процессов, то афтершоки происходят при наличии постоянно присутствующей вынуждающей силы – суммы литостатического и тектонического давлений.

10. 3. Модель акустического сверхизлучения.

Ансамбль излучающих трещин. Модель взаимодействия излучающих звук трещин строится на аналогии этого явления с известным в оптике явлением сверхизлучения. Идея была высказана Дике (Dicke, 1954) и реализована в лазерах. Идея самоорганизации в структурах типа лазера, генерирующих оптическое излучение, рассмотрена Хакеном (1980). В первом варианте, суть модели акустического сверхизлучения была опубликована в работах автора (Кузнецов, 2001-а, 2001-б). Ниже излагается дальнейшее развитие модели.

Эксперименты. Модель базируется на объяснении известных экспериментальных фактов. Авторами ряда работ неоднократно наблюдалось явление самопроизвольного усиления интенсивности акустической эмиссии, которое затем, так же самопроизвольно, - прекращалось. Единственное объяснение этому явлению с точки зрения самоорганизации

когерентной структуры на основе взаимодействия звуковых волн с раскрывающимися трещинами было сделано автором. Им же высказано предположение, что эффект усиления акустической эмиссии имеет некоторую общность с оптическим сверхизлучением. Любопытный факт, досконально исследованный в некоторых работах в Японии и Китае, состоит в том, что эффекты акустического сверхизлучения происходят далеко не во всех типах горных пород. Так, например, изучение режимов акустической эмиссии гранитов двух различных типов, внешне практически не отличающихся один от другого, показало, что при нагружении образцов на прессах, они ведут себя по-разному. На серии образцов гранита из одного месторождения эффект резкого усиления интенсивности акустической эмиссии, названной нами акустическим сверхизлучением, постоянно присутствует, однако, на серии образцов гранитов другого типа – эффекта нет. Этот результат, неоднократно подтвержденный экспериментально, дает основание полагать, что и в земных недрах должны встречаться геологические тела, реология которых такова, что в них могут развиваться процессы самоорганизации и генерироваться, в конечном счете, землетрясение, а в других телах, на первый взгляд идентичных первым, таких явлений возникнуть не может.

Результаты лабораторных экспериментов и натурных наблюдений (рис. 10-11) показывают, что на фоне постоянного акустического фона ($I = dN/dt \sim N$), излучаемого нагруженным образцом горной породы, возникает взрывоподобное нарастание (типа цепной реакции) количества раскрывающихся трещин N (акустических импульсов) в единицу времени t: $dN/dt \sim N^2$. По аналогии с оптикой, это явление можно считать акустическим сверхизлучением. Ясного понимания физики этого явления пока - нет. Ниже мы рассмотрим два различных подхода к этой проблеме: акустическая эмиссия (АЭ) обязана образованию трещины (1) и она вызывается дислокациями, в качестве которых могут быть процессы образования и разрушения водородных связей в веществе (2).

Теория разрушения. Согласно механистическому подходу к описанию теории твердого тела, потенциальная энергия твердого тела определяется через деформацию. Свойства тела определяются модулями Юнга и Пуассона, а разрушение происходит, когда напряжение (растяжение или сжатие) достигает своего критического значения - т.е. образуется трещина. Классическим критерием разрушения является критерий Гриффитца, отвечающий за развитие трещины. Акустическая эмиссия является лишь сопутствующим фактором раскрытия трещины. Именно такой подход механического разрушения применяется в теории землетрясения, т.е. образования магистральной теории трещины.

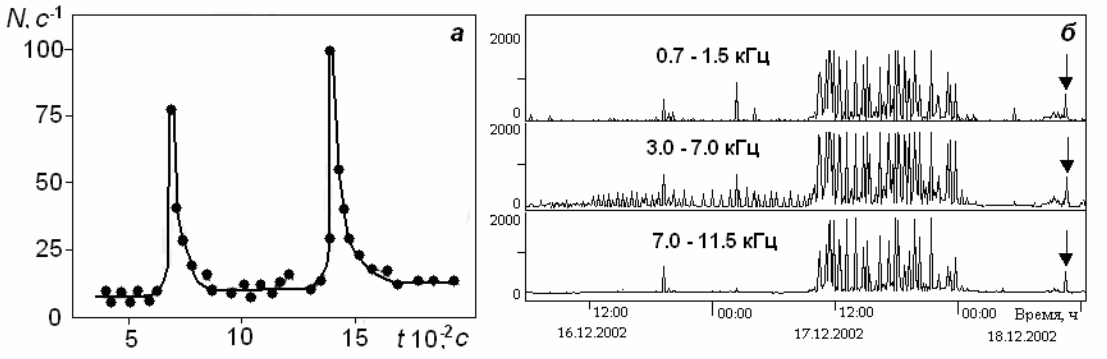


Рис. 10-11. *а*) Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения (Журков и др. 1980).
б) Геоакустические сигналы, зарегистрированные перед землетрясением 18.12.2002 (К = 12.1) на Камчатке (ИКИР). Время события отмечено стрелкой (Купцов, 2006).

Однако существует и другой подход к теории разрушения: кинетический (подход С.Н. Журкова). Сущность его заключается в необходимости учета ангармонизма кристаллической решетки. Согласно кинетической теории прочности долговечность материала τ, находящегося под нагрузкой σ, равна: $\tau = \tau_0 \exp [(U_0 - \gamma\sigma)/kT]$. Здесь k – константа Больцмана, T- температура, U_0 – энергия разрыва межатомных связей, время $\tau_0 = 10^{-13}$ с – совпадает с фундаментальной характеристикой твердого тела – периодом тепловых колебаний атомов в решетке - фононов, γ – коэффициент, пропорциональный перенапряжению на межатомных связях. Отсюда следует, что напряжение σ, разрывающее образец за время τ:

$$\sigma = 1/\gamma\ (U_0 - kT \ln \tau/\tau_0) = \sigma_{max} - (kT/\gamma) \ln\tau/\tau_0. \qquad (10.2)$$

Рассмотрим роль ангармонизма в кинетической теории прочности. Представим силу межатомного взаимодействия $F(\triangle)$ (см. рис. 10-12) в виде разложения в ряд Тейлора по величине $\triangle a$ смещения атома от равновесного расстояния r, сохраняя два члена: $F(\triangle a) = f \triangle a - g(\triangle a)^2$, где f –константа упругости связи, а g - коэффициент ангармоничности, учитывающий нелинейность силы взаимодействия.

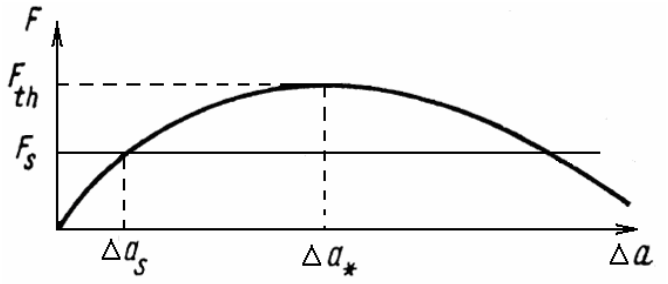


Рис. 10-12. Сила межатомного взаимодействия как функция смещения атомов (Журков, Петров, 1978).

Из рис. 10-12 видно, что максимум силы *Fth*, достигаемый при удлинении $\triangle a$, определяет теоретическую прочность связи. Если к связи приложена сила *Fs*, то при *Fs* < *Fth* возможен термофлуктуационный разрыв связи. Он обусловлен ангармоничностью тепловых колебаний атомов, что порождает дополнительную флуктуирующую силу *Fg* = *Fth* – *Fs*:

$$Fs = Fth - 2(gkT/f) \ln \tau/\tau_0. \qquad (10.3)$$

Произведя замену силы *Fs* на напряжение с помощью соотношения $Fs/a^2 = x\sigma$, где σ - среднее напряжение в матрице, x – коэффициент перенапряжения связи, получим:

$$\sigma = \sigma_{max} - (2gkT/fa^2x) \ln\tau/\tau_0, \qquad (10.4)$$

что в точности совпадает с предыдущей оценкой при $\gamma = fa^2x/2g$.

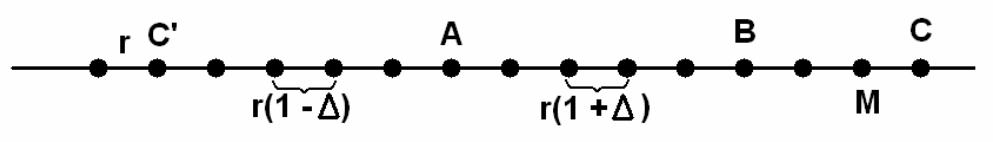
Механизм термофлуктуационного разрыва связи обусловлен ангармоничностью тепловых колебаний и определяется отношением g/f. При $g = 0$ влияние температуры и времени на прочность исчезает. В идеальных телах, подчиняющихся закону Гука вплоть до напряжений теоретической прочности, температурно-временной эффект прочности должен отсутствовать. Учет ангармонизма кристаллической решетки приводит к таким эффектам как тепловое расширение твердого тела и смещение частот фононных мод за счет упругих деформаций твердого тела.

В приближении Грюнайзена изменения частот фононов одинаковы для всех мод и определяются деформацией $\epsilon = \triangle V/V$ объема кристаллической ячейки:

$$\triangle\omega/\omega = G\epsilon \qquad (10.5)$$

Колебания кристаллической решетки – фононы в силу ангармонизма, сталкиваются между собой. Эту ситуацию можно рассматривать как квантовый, или фононный «газ». За счет сжатия твердого тела концентрация фононного газа увеличивается, что приводит к его «конденсации» и образованию «дилатона» или «предтрещины». Размеры дилатона пропорциональны длине свободного пробега фононов. Особенность дилатона состоит в том, что он способен как черпать энергию извне, например, из звуковых волн, так и отдавать её в виде звука. При этом длина звуковой волны должна быть пропорциональна длине свободного пробега фононов.

Физическая модель. Для объяснения физики разрушения воспользуемся понятием дилатон (Кусов, 1979). Дилатон – это область дефектов кристаллической решетки, в которой происходит интенсивная генерация фононов. Когда количество фононов за счет ангармонизма решетки достигает критического уровня, дилатон «схлопывается» (решение типа бризер) и превращается в микротрещину, которая, раскрываясь, излучает акустическую волну.



Дилатон △ - в линейной цепочке атомов

Фононная модель разрушения основана на исследовании устойчивости локальных отрицательных флуктуаций плотности – дилатонов мощности $\triangle = (r' - r)/r$, где $r' > r$ – расстояние между ближайшими атомами в области AB. При «схлопывании» дилатонов происходит раскрытие трещины. Этот процесс сопровождается излучением акустической волны, причем на её формирование необходимо некоторое пространство, соизмеримое с длиной акустической волны λ.

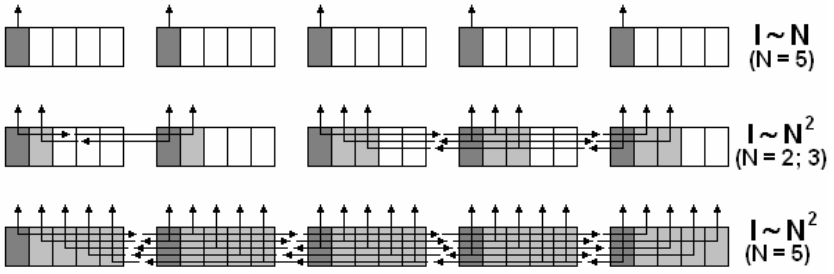


Рис. 10-13. Излучение раскрывающихся трещин (схлопывающихся дилатонов): верхняя панель – излучение акустических волн без связи между дилатонами. Средняя и нижняя панели – акустическая связь между двумя, тремя и пятью дилатонами.

Предположим, что в некотором объеме среды существует n ($n = 5$) дилатонов (рис. 10-13), а схлопывание происходит только в одном. Излученная акустическая волна взаимодействует путем обмена энергией с фононами решетки с другими дилатонами, передает им энергию и способствует их схлопыванию. Если характерный размер выделенного объема среды меньше длины волны λ, то в нем взаимодействия с собственной акустической волной не происходит. Рассмотрим N объемов, в каждом из которых находится n дилатонов. Если взаимодействия между дилатонами не происходит,

то в единицу времени излучается N импульсов. Если происходит такое взаимодействие, то акустические волны, возникающие при схлопывании N дилатонов «запускают» $(N - 1)$ дилатон. В результате акустический фон возрастает с N импульсов в единицу времени до: $N + N(N - 1) = N^2$, что и требовалось доказать. По физике, подобное явление близко к сверхизлучению Дикке (коллективное спонтанное испускание электромагнитного излучения), которое было предложено им задолго до изобретения лазеров. Дикке показал, что система, состоящая из N инвертированных двухуровневых атомов, может спонтанно перейти в основное состояние за время, обратно пропорциональное числу атомов, что приводит к усилению потока излучения $\sim N^2$.

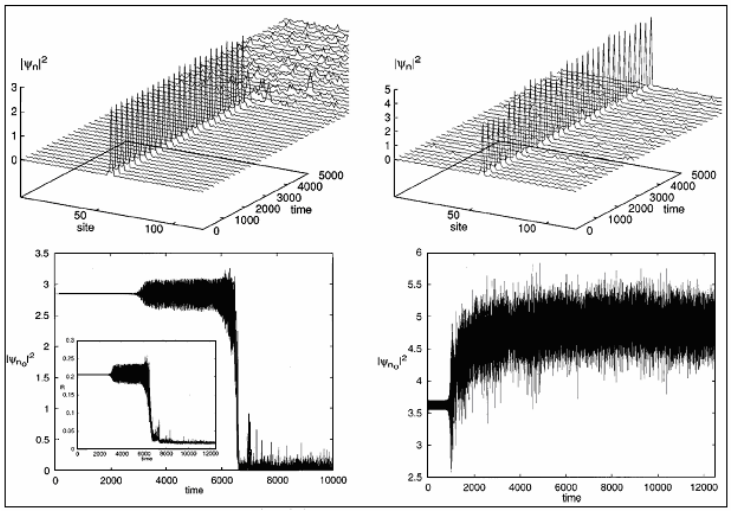


Рис. 10-14. Численное решение (вида бризер)- для нелинейной решетки Шредингера.

При раскрытии трещины излучается звуковой импульс акустической эмиссии (АЭ). Этот импульс "несет" определенную долю энергии и, взаимодействуя с дилатоном (микротрещиной), передает ему энергию, "помогая" раскрыться. Трещина начинает расти и излучает при этом "свой" импульс, который взаимодействует со следующей трещиной и т.д. При этом может наблюдаться эффект лавинного образования трещин, звуковые импульсы которых когерентно складываются, обеспечивая при этом явление усиления звуковой волны (Ishido, Nishizawa, 1984) и возникновение фрактальных структур.

В настоящее время представляется, что приемлемое решение взаимодействия «волна-трещина» может быть найдено в физике фононов, дилатонов и бризеров. Особенность дилатона заключается в способности черпать энергию от окружающих фононов и отдавать энергию им. Увеличение энергии дилатона может происходить не только за счет тепловых фононов, но и за счет поглощения фононами звука.

В дискретных решетках Клейна-Гордона и Шредингера возникают решения, называемые бризером (breath). Бризеры, - это локальные решения дифференциальных уравнений с зависящей от времени амплитудой (рис. 10-14). Физически, решения бризера соответствуют двум солитонам, типа «кинк» и «антикинк». Взаимодействие их приводит к образованию стоячей волны в решетке. Амплитуда бризера может возрастать до тех пор, пока не произойдет разрушение решетки, т.е. образование трещины и её раскрытие, сопровождающееся излучением акустической волны. Акустическая волна может привести к образованию другого бризера и т.о. может возникнуть лавина образования трещин. Конечным «продуктом» этого процесса может быть генерация ударной волны.

10. 4. Формирование ударной волны. Акустическая модель.

Сошлемся на высказывание Старра (1971), который полагал, что «нелинейная теория идеальных акустических возмущений неизбежно приводит к формированию

ударных волн и, следовательно, к изменению формы уравнений, которые до этого были достаточными для описания сплошной среды» (стр. 13).

Предположим, что в некотором объеме напряженной горной породы образовалась структура параллельных друг другу трещин и микротрещин. Раскрытие одной из микротрещин, сопровождается излучением S-волны. Эта волна, рассеиваясь на трещине, переизлучает P-волну, распространяющуюся в направлении ориентирования трещин, и S-волну, распространяющуюся поперек луча P-волны. Рассеиваясь на микротрещине, S-волна приведет к её раскрытию, и каскад явлений повторится, аналогично приему, используемому в методе пересекающихся характеристик (Жуков, 1960). В результате, в этом объеме образуется некоторое количество P-волн, распространяющихся вдоль направления трещин со скоростью V_P и S-волн, распространяющихся поперек этого направления со скоростью V_S. Предположим, что расстояние между соседними трещинами (по лучу S-волн) равно x. Тогда, если выполняется условие: $\tau_1 + \tau_2 = \tau_o + \tau_3$, где $\tau_1 = y_1/V_P$ – время распространения P-волны от раскрывшейся трещины 1; $\tau_2 = x_1/V_S$ – время распространения S-волны от трещины 1 до микротрещины 2; τ_o – время раскрытия трещины; $\tau_3 = y_2 /V_P$ – время распространения P-волны от трещины 2: *P-волны пересекаются в одной точке*. Полагая: $y_2 - y_1 = \Delta y$, при выполнении условия: $\Delta y/ V_P = - \tau_o + x /V_S$. Оценим величину x, для чего примем: $\Delta y = x$, $V_P = 5$ км/с, $V_S = 3$ км/с, $\tau_o = 10^{-7}$ с, тогда $x \approx 700$ мкм. (Что вполне реально). Таким образом, эта оценка показывает, что пересечение P-волн от раскрывающихся микротрещин, расположенных на расстоянии друг от друга порядка 700 мкм, вполне возможно. Предположим, что характерный поперечный размер активной среды $X = x \cdot N$ ($x \sim 1/N$), тогда характерное время: $\tau \sim 1/N$. В такой среде возможно явление акустического сверхизлучения.

Известно, что ударные волны могут возникать не только при разрывных начальных граничных условиях, но и в областях, где движение среды в начале не сопровождается никакими разрывами. Такие случаи «самопроизвольного» зарождения ударных волн всегда связаны с явлением *пересечения одноименных характеристик* (Жуков, 1960). Простейший случай явления пересечения, это образование т.н. центрированной волны, когда несколько простых волн, при их одновременном распространении, пересекаются в одной точке (О) – вершине волны (рис. 10-15-а). При этом возникает волна сжатия, в вершине которой плотность вещества среды и давление в волне возрастают. Такая волна может стать ударной.

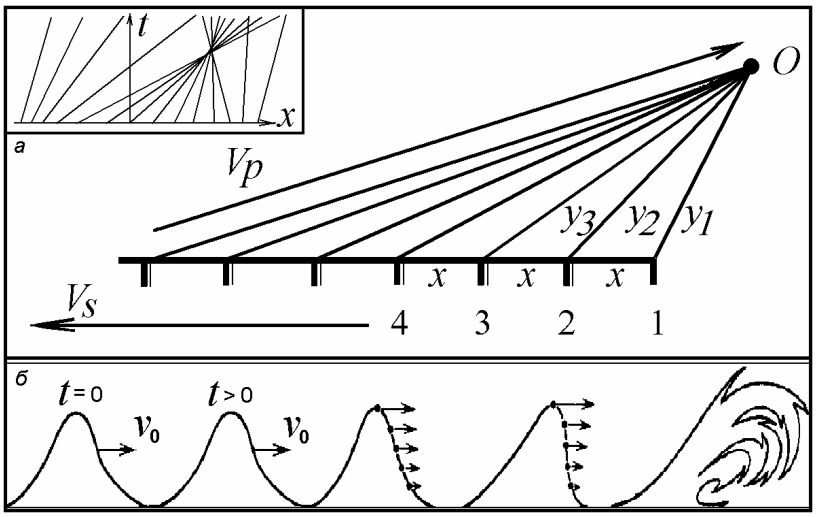


Рис. 10-15-а. Когерентное сложение акустических импульсов в точке 0. Метод пересекающихся характеристик (Жуков, 1960). Рис. 21-14-б. Модель укручения и «опрокидывания» солитона (Заславский, Сагдеев, 1988)

Ударная волна обычно описывается приближенными уравнениями, учитывающими нелинейность, дисперсию и диссипативные свойства среды. Широкий класс таких явлений представлен т.н. уравнением Бюргерса-Кортевега-де Фриза:

$$\partial\varphi/\partial t + v_o(\partial\varphi/\partial x) = -\varepsilon\varphi(\partial\varphi/\partial x) + \eta(\partial^2\varphi/\partial x^2) - \beta(\partial^3\varphi/\partial x^3),$$

где ε, η, β - константы, отражающие влияние, соответственно, нелинейности, диссипации и дисперсии.

Известно явление укручения фронта УВ за счет того, что материальные частицы, находящиеся в пучности ударной волны (где плотность среды выше), движутся быстрее, чем соседние частицы вне пучности. Волновой профиль укручается настолько, что может привести к опрокидыванию УВ (рис. 10-15-б).

Основополагающее ограничение. Акустическая модель образования ударной волны, в принципе, физически довольно прозрачна и правдоподобна. Есть один момент недостаточно ясный, который требует более глубокой проработки. Речь идет о постулированном нами механизме поглощения звуковой волны микротрещиной, приводящим к раскрытию новой трещины. Но такая задача. По всей видимости, преодолима, однако существует проблема принципиального характера, о которой мы не упоминали раньше. Эта проблема касается *принципиальной возможности использования акустики для генерации ударной волны*.

Действительно известно, что мощные землетрясения, имеющие характерный размер в поперечнике, достигающий 1000 км, обладают фронтом нарастания сигнала порядка секунды (и меньше). Это означает, что должен быть некий агент, связывающий огромный массив сейсмически активной среды с колоссальной скоростью, значительно превышающей акустические скорости. Например, для синхронизации объема горной породы (в поперечнике 1000 км) за время порядка 0.1 с, - скорость, необходимая для передачи сигнала ~ 10^4 км/с, что значительно больше скорости звука. В качестве синхронизующего, казалось бы, мог быть электромагнитный сигнал, однако нет никакого правдоподобного механизма, в котором бы синхронизация раскрытия трещин могла бы быть связана со сверхвысокочастотной электромагнитной волной. Сверхвысокочастотной, - волна должна быть потому, что длина волны должна была бы быть соизмеримой размеру микротрещины.

Получается так, что сама постановка задачи генерации ударной волны неверна? Нет, это неверное утверждение. В квантовой физике хорошо известна идея квантовой запутанности, иначе, принципа неопределенности Гейзенберга, когда среда становится когерентной, она описывается некой волновой функцией и, когда происходит редукция этой функции («смерть запутанности»), этот процесс распространяется мгновенно независимо от величины объекта, вовлеченного в квантовую запутанность. (По мнению некоторых авторов, скорость редукции волновой функции не должна превышать скорость света, но для нашей модели этот момент не столь принципиален). Кратко рассмотрим далее эту область физики, которая в течение последних нескольких лет активно развивается как в плане постановки экспериментов, так и в теоретическом плане. Однако прежде решим принципиальную проблему, можно ли генерировать УВ без скоростных ударов, детонации, взрывов и т.п. Казалось бы – да, если найдется способ создания разрыва термодинамических параметров среды, в частности, - разрыв плотности.

Образование ударной волны на разрыве характеристики среды. Ударная волна - это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. Ударные волны называют также сильными разрывами или скачками.

Запишем уравнение дивергентного вида:

$$\partial\rho/\partial t + \partial f(\rho)/\partial x = 0,$$

с условием на линии разрыва:

$$-D(\rho_1 - \rho_2) + f(\rho_1) - f(\rho_2) = 0,$$

где ρ_1 и ρ_2 – значения плотности на разрыве, а $D = dx(t)/dt$ - наклон линии разрыва – скорость УВ: $D = \Delta\rho/\rho \cdot \Delta x/\Delta t$.

Предположим, что нам, каким-либо способом удалось резко увеличить плотность вещества, например, на 10 % ($\Delta\rho/\rho = 0.1$). Предположим, что увеличение плотности среды происходит в слое толщиной $\Delta x = 10$ см, за время порядка $\Delta t = 10^{-6}$ с. Резкое увеличение плотности в тонком слое – это разрыв параметров среды. Разрыв параметров среды - эквивалентен прохождению (или формированию) УВ, обладающей скоростью $D = 10$ км/с. В такой ситуации проблему генерации УВ можно сформулировать как задачу поиска физически правдоподобного механизма, приводящего к мгновенному изменению плотности среды в тонком слое литосферы, расположенном на глубине, характерной для возникновения землетрясений. Наша идея состоит в привлечении квантовых механизмов для создания локального разрыва термодинамических характеристик среды, в частности – плотности. Однако прежде ознакомимся с успехами, достигнутыми в теории и экспериментальных исследованиях, проводимых в последнее время в университетах различных стран по квантовому запутыванию и телепортации квантового состояния на огромные (с точки зрения квантовых размером) расстояния.

10. 5. Эксперименты по туннелированию и запутанности в геологических образцах.

Лед. Разработанная для кристаллов с водородными связями теория переменной волновой функции для основного состояния, - была применена (Schweizer, Stilling, 1984) для исследования поведения нескольких полиморфных модификаций льда при высоком давлении Теория точно объясняет коротко- и длинноинтервальные протонные корреляции и квантово-механическое туннелирование, которые все вместе являются важными для режима высокого давления. Основное внимание уделяется индуцированным давлением фазовым переходам порядок-беспорядок и симметризации водородной связи во льдах VII, VIII и Ic. При давлении примерно 330 кбар был обнаружен переход первого порядка (управляемый протонным туннелированием), из фазы VIII антиферроэлектрически упорядоченного льда в высокоионизированную форму протонно-неупорядоченного льда VII. Несмотря на высокую степень ионизации, при переходе сохраняется порядок, на что указывает бимодальность плотности протонного заряда вдоль связи. Предсказано, что кроссовер к одномодальному состоянию, т.е. симметризации водородной связи, происходит при 450 кбар. Изучены эффекты при замещении изотопом дейтерием. Расчеты для кубической формы льда с более низкой плотностью показывают, что, по-видимому, в этом соединении можно наблюдать симметричные водородные связи при давлении более низком, чем то, которое требуется для плотных льдов.

В работе (Sugimura. et al. , 2008) проводились исследования объемного сжатия и фазовых переходов льда вплоть до 126 GPa путем измерения синхротронной рентгеновской дифракции и плотностно-функциональных вычислений. Экспериментальные данные показывают, что при комнатной температуре лед меняет свою сжимаемость при 40 и 60 GPa, что соответствует фазовым переходам льда VII к динамически разупорядоченным льдам VII и X. Промежуточная фаза, динамически разупорядоченный лед VII, высоко сжимаем, возможно, благодаря квантовым эффектам протонов. В отличие от этого, динамически разупорядоченный лед X демонстрирует значительно меньшую сжимаемость.

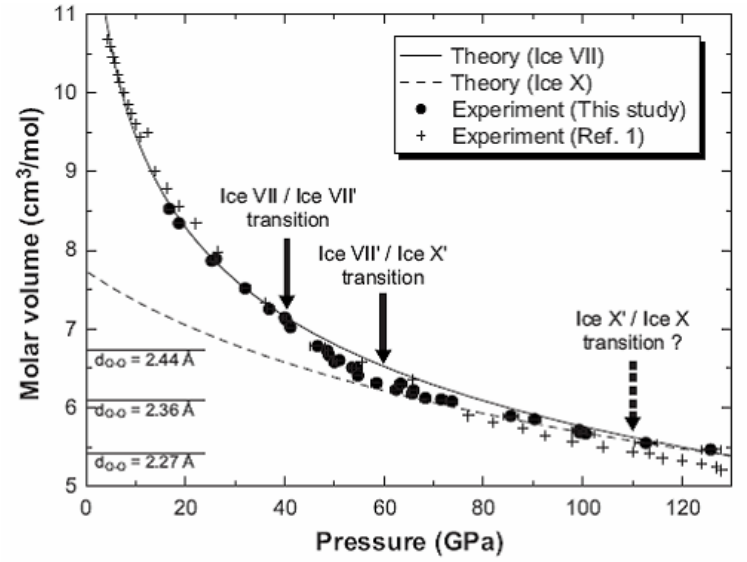


Рис. 10-16. Экспериментальные результаты по сжатию льда различных модификаций. Черточками показаны предсказанные расстояния между соседними атомами кислорода (O···O), равные 2.44, 2.36 и 2.27 Å, соответственно, при возникновении эффекта туннелирования. Стрелками отмечены фазовые переходы льда.

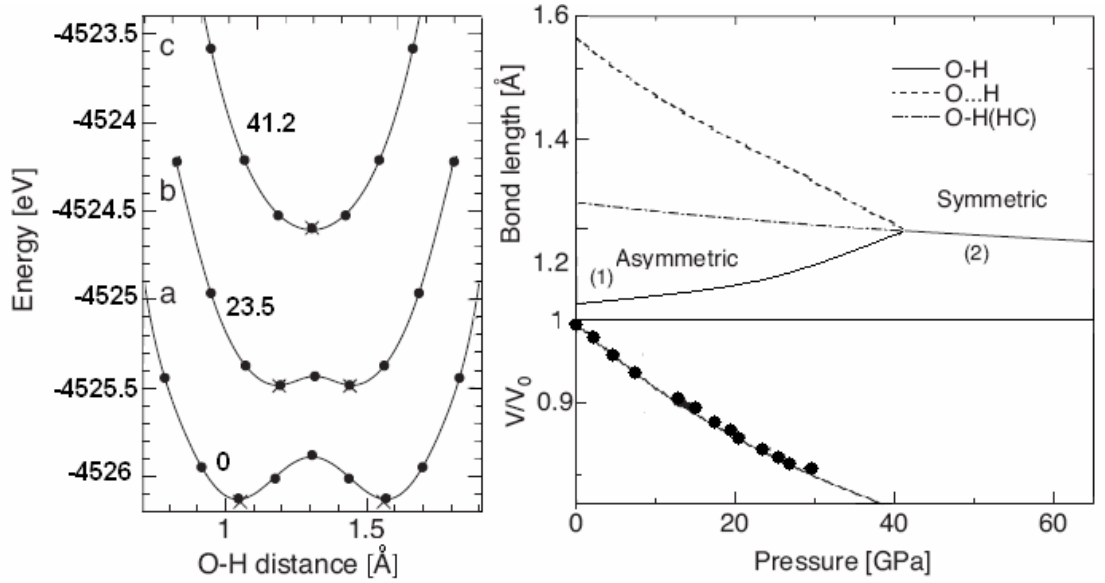


Рис. 10-17. Изменение потенциала Морса водородной связи O-H (в ангстремах) под действием внешнего давления: 0, 23.5, 41.2 ГПа вдоль направления O···O. (На рис. потенциал обозначен в электрон-вольтах, хотя приведены величины в $см^{-1}$ (слева)). На рис. (справа вверху) показан характер изменения расстояния между атомами для различных типов связи, - от величины давления. Относительное уменьшение объема кристаллической структуры с увеличением давления (справа внизу).

Силикат магния. Исследованы структурные и физические свойства вещества D-слоя мантии при высоком давлении (Tsuchiya et al., 2005). Авторы полагают, что в этом слое находится в основном силикат магния ($Mg_2Si_2O_6H_2$). Предполагается, что это вещество обладает высокой стабильностью под давлением и является одним из наиболее подходящих кандидатов на роль источника воды в нижней мантии Земли. Оказалось, что расчеты и эксперименты поведения $Mg_2Si_2O_6H_2$ под давлением очень похожи. При 40 GPa была обнаружена симметризация водородных связей. Эта индуцированная давлением симметризация водородной связи сильно влияет на поведение фазы D при сжатии. При

структурном изменении возрастает модуль сжатия примерно на 20%. Авторами ранее на примере δ-AlOOH сообщалось о подобной индуцированной давлением симметризации водородной связи.

Гидрокарбонат калия. Для изучения корреляции протонов водорода в ионном кристалле гидрокарбоната кальция ($KHCO_3$) авторы (Fellaux et al., 2006) использовали технику дифракции нейтронов. Протоны участвуют в организации планарных центросимметричных димеров $(HCO_3^-)_2$ за счет образования водородных связей. При этом наблюдалось установление квантовой запутанности. При замене $KHCO_3$ на $KDCO_3$, запутывания не возникало. В экспериментах квантовое запутывание наблюдалось до температуры 300 К.

В работе (Nagai et al., 2002) проведены измерения синхротронной рентгеновской дифракции для калисинита (KHCO3) вплоть до 9.0 GPa при комнатной температуре. Обратимое фазовое превращение наблюдалось при примерно 2.8 GPa. До сих пор не была идентифицирована структура фазы высокого давления. Поведение калисинита при сжатии является высоко анизотропным, и a-ось, примерно, в два раза более сжимаема, чем оси b- и c-. Поведение при сжатии отличается от того, которое наблюдается при сжатии со снижением температуры. Это означает, что с возрастанием давления водородно-связанное расстояние O ··· O значительно укорачивается.

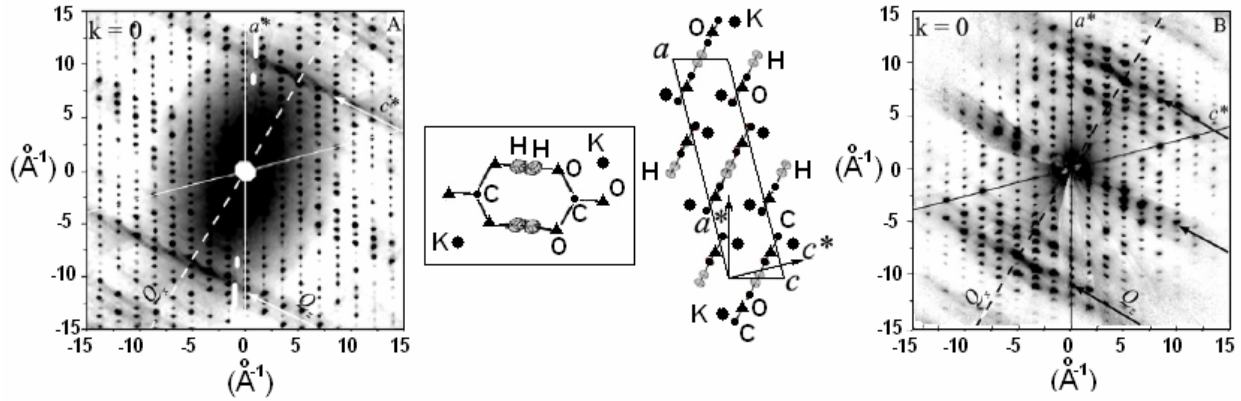


Рис. 10-18. Примеры дифракционных картин для решетки $KHCO_3$ при 30 К (A) и при 300К (B) На вставке в центре рисунка: слева – димер, справа – структура решетки [JPC]. (Nagai et al., 2002).

Калисинит – это минерал гидрокарбоната калия ($KHCO_3$). При комнатной температуре кристаллическая структура моноклинная с четырьмя молекулами на ячейку, и две карбонатные группы CO_3 объединены водородными связями с образованием центро-симметричного (HCO_3) димера. Катион калия окружен восьмью атомами кислорода и соединяет димеры. Поскольку водородные связи локализованы в димере, в структуре отсутствует решетка водородных связей. При комнатной температуре существует два кристаллографически неравнозначных положения водорода. Считалось что синхронные протонные переходы скачком через водородные связи - это маловероятный механизм разупорядочивания. Однако недавние исследования показывают возможность туннелирования протонов через потенциальный барьер - в качестве механизма водородного разупорядочения).

В работе (Allan et al., 2007) проводились эксперименты по изменению объема образцов калисинита под давлением при комнатной температуре (рис. 10-19 и 10-20).

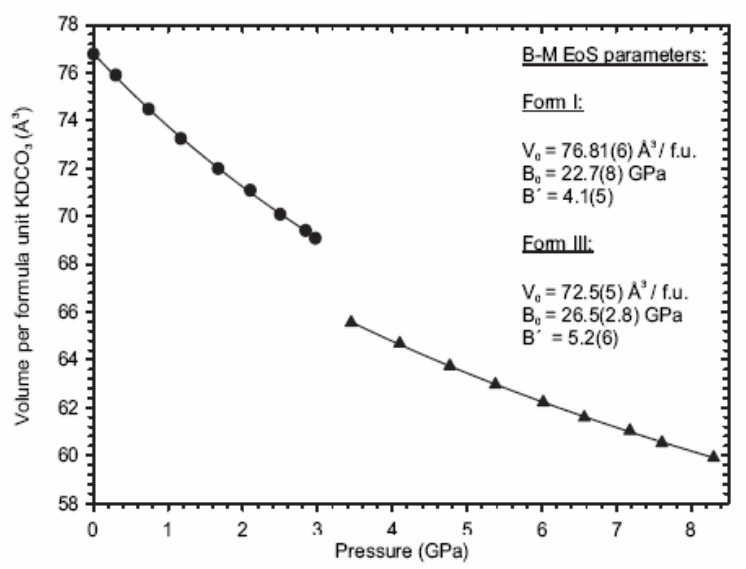


Рис. 10-19. Изменение удельного объема ($\Delta V/V = 4$ %) в калисинаите при давлении 3.2 GPa (Allan et al., 2007).

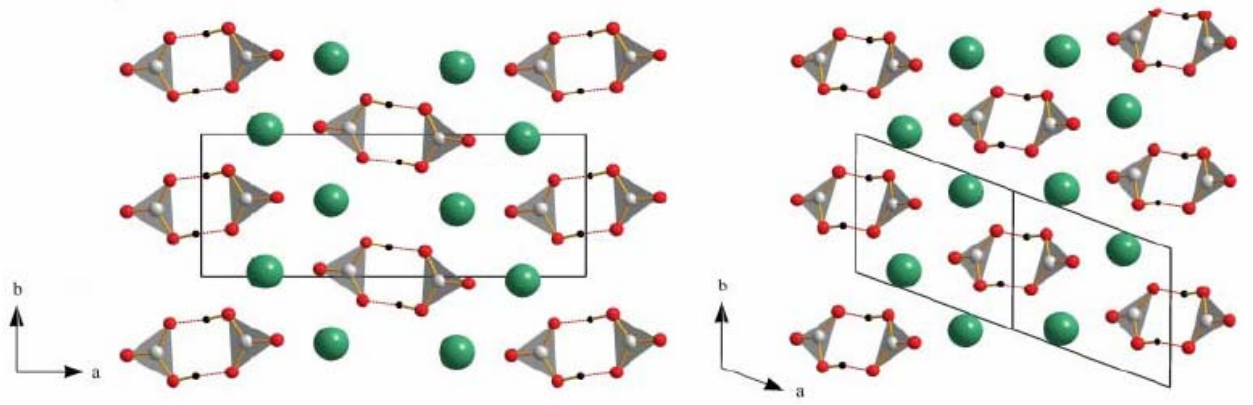


Рис. 10-20. Изменение пространственной структуры калисинита: зеленые шары – K, белые – C, красные – O, маленькие темные – водород. (Allan et al., 2007).

Т.о. показано, что к настоящему времени разработана теория симметризации минералов, обладающих водородными связями. Теория подтверждена многочисленными экспериментами. Эффект получен на природных образцах при комнатных температурах и давлениях, характерных для мантии Земли. Это открывает возможность изучения эффектов туннелирования и квантовой запутанности на реальных средах, характерных для сейсмоактивных регионов и используемых в экспериментах с акустической эмиссии на образцах под давлением. В принципе, для большей убедительности следует выяснить, связана ли сейсмическая активность с присутствием водорода.

10. 6. Сейсмическая активность и водород.

В работах (Sugisaki, 1984/1985; Кузьмин и др. 2004) измерялся химический состав пузырьков из минеральных источников активных разломов Японии. Периоды возрастания водородной эмиссии совпадали с роем землетрясений в Ohno. Концентрация водорода менялась в интервале от 0,5 до 200 ppm, в то время как концентрации остальных газов, таких, как гелий, аргон, азот и метан менялись не значительно. Водород обычно появляется в минеральных источниках накануне землетрясения, что может использоваться для прогноза землетрясений (рис. 10-21).

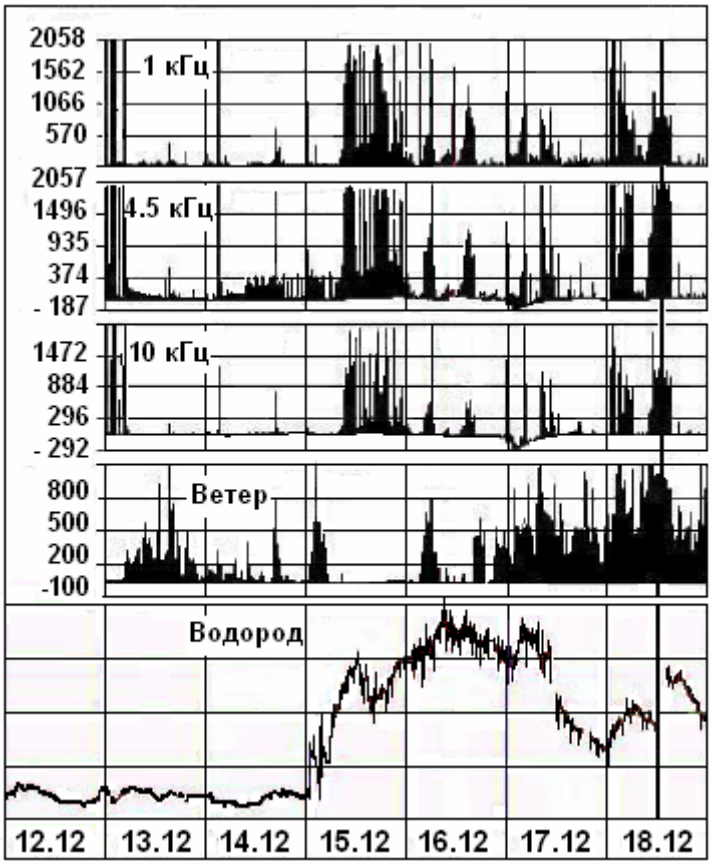


Рис. 10-21. Сопоставление колебаний сейсмоакустической эмиссии с изменением концентрации растворенного водорода в потоке термальной воды во время и после землетрясения 18.12.2002 г. (Кузьмин и др.. 2004).

Снижение микротвердости и кристаллических констант некоторых таких горных пород как кальцит, доломит и др., наблюдается после непродолжительного проникающего воздействия водородом при низком давлении (Su, et al., 1992). Это означает, что диффузия водорода может вызывать падение или ослабление их прочности. Генерируемый под землей или накопленный во время ее образования водород при вертикальном его миграции вдоль разломов вызывает разупрочнение породы, что делает возможным её разрушение в условиях пониженного тектонического напряжения.

Генерация водорода при мокром измельчении кварцевого порошка и ее зависимость от pH и ионной силы жидкой среды (Kameda et al., 2003; Saruwatari et al., 2004). Была исследована генерация водорода при измельчении кварцевого порошка в жидкой среде при контролировании ее pH и ионной силы. Влияние ионной силы на генерацию водорода оказалось ничтожным, тогда как наблюдалось уменьшение генерации водорода в кислотной области pH>5.0. Обсуждается механизм этих механохимических реакций.

Авторы (Копничев, Соколова, 2008; Kasahara, et al., 2001; Giammanco et al. 2008) отмечают роль сжатой жидкой и газообразной фазы в генерации роя землетрясений в районе Peloritani Mts. (NE Sicily), когда 1000 землетрясений произошла в период 1994 – 2006. Аналогичные наблюдения проводились в Японии. Авторы отмечают, что эпицентры этих землетрясений приурочены термальным источникам с выбросами газов.

В (Chu, et al., 1996) изучались геоэлектрические сигналы во время землетрясений *M* 7.8 1976 Tangshan и *M* 7.2 1976 Songpan. Определялось поведение электропроводности внутри и вокруг области эпицентра этих событий. Авторы показывают, что в процессе подготовки землетрясений электропроводность заметно изменялась. Авторы рекомендуют наблюдать изменения на больших площадях, т.к. это эффективнее, чем наблюдения в конкретном объеме среды.

В начале этой главы мы предполагали, что акустическая эмиссия (АЭ) обязана исключительно раскрытию трещин. Однако это не совсем верное предположение. Так, например, в работе (Кузнецов Д.М., 2008) измерялась АЭ в тающем льду с использованием дефектоскопического акустически-эмиссионного комплекса A-Line32D. Авторами обнаружен эффект АЭ в тающем льду, причем по мере его таяния (см. рис. 11-22, на котором черная линия показывает момент, когда весь лед растаял) длительность сигналов АЭ возрастает, а мощность сигналов – падает. Авторы обнаружили наличие АЭ в талой воде (сигналы правее черной линии). По мере дальнейшего нагревания воды, - сигналы АЭ исчезают.

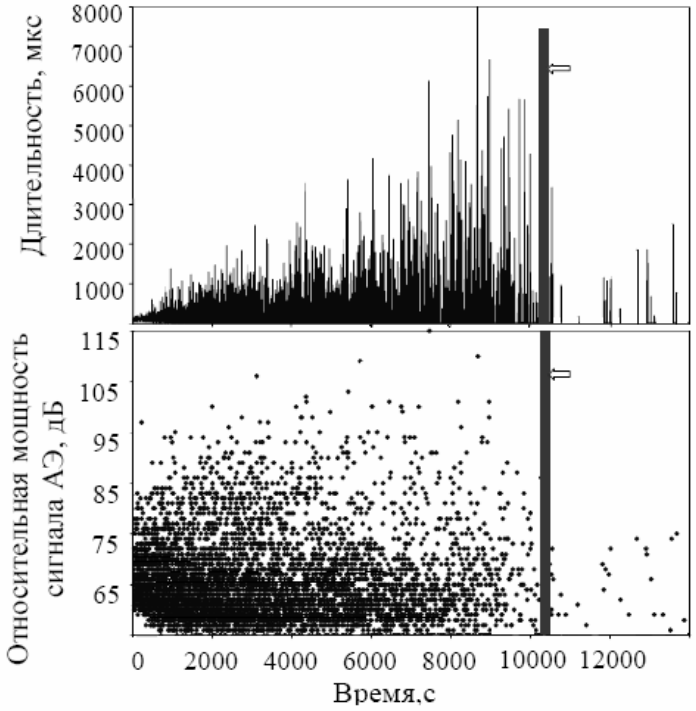


Рис. 10- 22. Акустическая эмиссия, регистрируемая при таянии льда (Кузнецов Д.М., 2008).

Последний факт – наиболее примечателен, он показывает, что АЭ обязана своим происхождением не только хрупкому разрушению, а и другим различным физико-химическим процессам. Известно, что лед от воды отличается количеством упорядоченных водородных связей – других отличий нет. Количество водородных связей (ВС) уменьшается по мере плавления льда и нагрева воды. В талой воде ВС меньше чем во льду, но больше, чем в обычной воде. Есть все основания полагать, что АЭ в этом эксперименте связана с разрушением ВС. Генерация АЭ происходит не только при таянии льда, но и при его росте (Смирнов, 2008). Упомянем так же, что и при кристаллизации воды, и росте льда, а так же при его разрушении, - наблюдаются электромагнитные импульсы, схожие по форме с импульсами АЭ (Шибков и др., 2000; Бери и др., 1986). Всё это говорит о том, что образование и разрушение ВС в образцах горной породы может быть причиной акустической и электромагнитной эмиссии, регистрируемой в экспериментах и наблюдениях.

10. 7. Акустическое сверхизлучение и образование ударной волны – как редукция волновой функции.

Вернемся к рис. 10-10 и предложим объяснение акустического сверхизлучения на идее квантового запутывания и нелокальности. Предположим, что если кристаллическая структура не имеет квантовой связанности между своими элементами, обладающими водородными связями (ВС), то они с течением времени постоянно образуются и

разрушаются. При разрушении ВС – испускаются акустические импульсы, временная последовательность которых (*N*) - создаёт некий акустический фон $I \sim N$. Если *N* водородных связей оказываются кватново запутанными, т.е. протоны связей становятся неразличимы друг с другом, и вся структура описывается единой волновой функцией, то разрыв одной из них ведет к одновременному разрыву всех *N* связей (редукция волновой функции). Сигнал при этом возрастает и становится равным $I \sim N^2$.

Приведем один из примеров квантового запутывания фотонов. В эксперименте флуоресцентное излучение собиралось широкоапертурными линзами и направлялось в противоположные от источника стороны (Aspect, 2002). Фотоны через интерференционные фильтры и поляризаторы направлялись на фотоумножители, которые подключались к счетчикам совпадений при двухфотонном детектировании.

Спектр вначале содержит плоский участок, обусловленный случайными совпадениями между фотонами, излученными разными атомами. Истинные совпадения (между фотонами, излученными одним и тем же атомом) отображаются в виде пика при нулевой задержке (рис. 10-23), спадающего по экспоненте с постоянной времени 5 нс (время жизни промежуточного каскада).

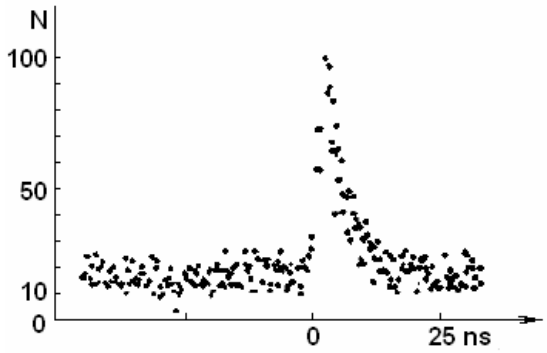


Рис. 10-23. Число зарегистрированных пар фотонов как функция задержки между моментами регистрации двух фотонов. Плоский участок отвечает случайным совпадениям между некоррелированными фотонами, пик соответствует квантовой запутанности (Aspect, 2002).

Представим себе, что в литосфере на определенной глубине имеется некий тонкий слой, содержащий повышенную концентрацию водорода, мигрирующего к поверхности Земли от ядра. Водород участвует в образовании водородных связей в минералах литосферы. В выделенном слое возникает квантовое запутывание между протонами водородных связей. Одновременная перестройка (симметризация, тунеллирование и разрушение) водородных связей приводит к резкому увеличению плотности вещества в слое, что вызывает резкое изменение характеристик среды, что обычно связывается с образованием ударной волны, которая начнет распространяться вдоль по градиенту плотности - к земной поверхности. Внезапное разрушение одной водородной связи приводит к одновременному разрушению всех запутанных связей. Происходит «смерть» запутанности (редукция волновой функции). Этот процесс может сопровождаться выбросом протонов, которые превращаются тем или иным способом в молекулярный водород, который при этом создает дополнительное давление в области слоя. В результате, происходит скачек увеличения плотности и давления в тонком слое, что, по определению, является, собственно, ударной волной. Площадь поверхности слоя определяет размер очага землетрясения. Форма поверхности слоя определяет форму ударной волны и, соответственно, форму разломных диаграмм. Глубина слоя, его размер и концентрация в нем водорода определяют все измеряемые параметры землетрясения. Из лабораторных экспериментов известно (см. выше), что симметризация водородных связей в различных веществах, их содержащих, происходит при различных давлениях. Возможно, это является причиной того, что землетрясения в различных регионах Земли приурочены к различным глубинам. Прохождение ударной волны к поверхности Земли

вызывает в среде афтершоки. Причиной их образования являются, очевидно, дополнительное давление на среду, вызванное ударной волной и, возможно, ещё в большей степени, движением фронта свободного водорода вслед за волной. Сильные афтершоки, которые происходят очень быстро вслед за основным ударом, вероятно, объясняются этими двумя факторами.

В качестве иллюстрации того, что форма поверхности слоя определяет форму ударной волны и, соответственно, форму разломных диаграмм, приведем рис. 10-24, на котором показана схема землетрясения в Тонга и Самоа, произошедшее в сентябре 2009.

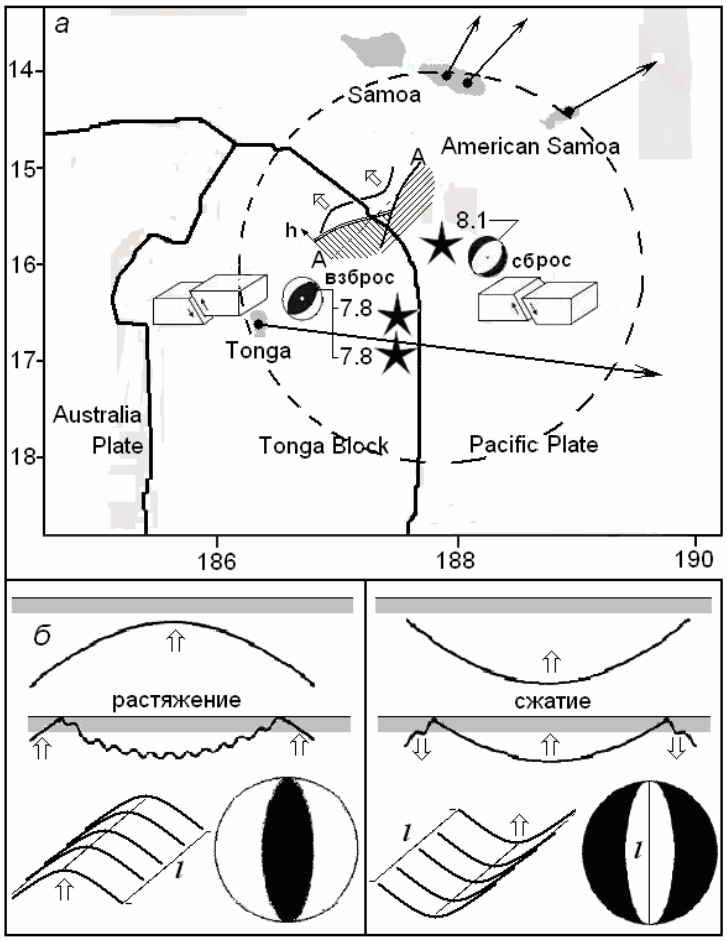


Рис. 10-24-а. Силовая модель очага землетрясения - двойная пара сил и диаграмма направленности для Р-волн. Положение эпицентра и фокальный механизм землетрясения. Типы смещений по разломам и соответствующие им стереограммы фокальных механизмов. 10-24- б. Наша ударно-волновая интерпретация явления.

Это землетрясение (по некоторым оценкам это было почти одновременно два или три землетрясения) вызвало цунами высотой до 12 метров. Землетрясения происходили с небольшой задержкой и они "замаскировали" друг друга, чем поначалу поставили в тупик геофизиков, сообщают авторы статей в журнале Nature (Beavan et al., 2010; Lay et al, 2010). Данные GPS-наблюдений с островов Самоа показывали, что 29 сентября 2009 года на юго-западе Тихого океана произошло одно землетрясение магнитудой 8, которое и привело к возникновению цунами. Однако характеристики волны, зафиксированные глубоководными датчиками, не соответствовали типу и месту эпицентра землетрясения. Кроме того, почти все "афтершоки", повторные толчки, следующие за главным, происходили не там, где должны были. Обе группы авторов сходятся в том, что эти землетрясения относились к разным типам. Одно из них, так называемое **сбросовое** землетрясение, произошло при разломе Тихоокеанской литосферной плиты. Второе - **взбросовое** - произошло в зоне субдукции, погружения Тихоокеанской плиты под малую

плиту Тонга, часть Австралийской литосферной плиты. Магнитуду сбросового землетрясения ученые оценивают в 8-8,1, а взбросового - в 7,8-7,9. Однако группы расходятся во мнениях относительно того, какое из двух землетрясений случилось раньше и стало причиной другого.

В центре рис. а показано возможное положение литосферы вдоль профиля АА.В этой ситуации, согласно нашей модели, должны возникнуть две сферических ударных волны (рис. 10-24), одна из них привела к растяжению, другая – к сжатию.

10. 8. Физика явлений сопутствующих землетрясению в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере.

В Главе 09, обсуждая перспективы и возможности прогнозирования землетрясений, мы ограничились примером прогноза с использованием т.н. VAN-метода и критикой развиваемого авторами подхода со стороны Р. Геллера. Мне представляется, что Геллер прав и говорить о прогнозе, как о реальной возможности предсказания этого явления: его магнитуду, место и время, - на сегодняшний день – не возможно. Более того, если физика землетрясения действительно базируется на МКЗ, то и прогноз его, в любом случае должен иметь вероятностный характер. Остается не ясным вопрос о физике явлений, сопутствующих землетрясению в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере. Основанием к такой постановке вопроса является многочисленные публикации, посвященные взаимосвязи этих явлений. В такой ситуации имеет смысл выяснить, можно ли найти правдоподобное объяснение таким явлениям в контексте нашей ударно-волновой модели, основанный на использовании принципов многочастичной квантовой запутанности. В пользу такого подхода говорит тот факт, что УВ возникает, по нашей модели, за счет реализации структурного фазового перехода в средах, в которых присутствуют водородные связи (ВС). В атмосфере присутствует водный аэрозоль, в котором находятся ВС. Остается не выясненным один момент: могут ли квантово запутываться водородные связи, которые присутствуют в веществах, находящихся в различных агрегатных состояниях? Ответа на этот вопрос найти в литературе не удалось, поэтому, нам не остается ничего другого, как принять аксиому, что такое взаимодействие – возможно.

Приведем несколько примеров квантового запутывания окружающей среды со средой источника генерации УВ, т.е. со средой очага землетрясения.

В литосфере. Акустическая эмиссия. Акустическая эмиссия регистрируется, например, в 100 км от гипоцентра землетрясения, который находится на глубине нескольких км. Если учесть, что коэффициенты поглощения звука от частоты акустической волны для пород различного литологического состава известны, например, коэффициент затухания сигнала частотой 10 кГц $\beta \approx 1$ м$^{-1}$, иначе, такой сигнал затухает в два раза на расстоянии в один метр. Акустический сигнал $f \approx$ 3-7 кГц, регистрируемый аппаратурой, не может достигать приемника, если он возникает в районе гипоцентра землетрясения. Следовательно, источники этих сигналов располагаются достаточно близко от приемников. Возникает вопрос, каким образом эти источники связаны с генерацией самого землетрясения?

Аналогичный вопрос возникает при наблюдении инфразвука в момент афтершока. Что же генерирует неоднократно наблюдаемый на очень многих землетрясениях подземный гул? Ясно одно, что гул производится значительно выше, чем основной толчок землетрясения, т.к. скорость распространения гула не может быть выше скорости Р-волн.
Общим для этих, казалось бы, совершенно различных наблюдений является то, что инфразвук опережает землетрясение. Возможно, что наблюдаемое опережение им сейсмического сигнала проявляется как «подземный гул», предшествующий удару. При изучении афтершоков Чуйского землетрясения, такой гул наблюдался нами неоднократно.

Источник акустической эмиссии и сейсмического «гула» остается неизвестным. В дальнейшем попытаемся выяснить его природу. Это тем более важно, что на опережении сигнала акустической эмиссии перед ударом землетрясения строятся системы его прогноза.

Вполне возможно, что обнаруженный таинственный звук в океане, который считается одной из неразгаданных загадок, имеет отношение к обсуждаемому нами вопросу. Действительно, сотрудники Национального агентства по изучению океанических и атмосферных явлений США в 1997 впервые записали странный звук в Тихом океане. Он был таким громким, что его различили два микрофона, расположенные на расстоянии в три тысячи миль друг от друга. Звук имеет импульсную, прерывистую структуру, частота волн колеблется в диапазоне 0-30 Гц. Этот таинственный звук в океане американцы называют bloop (завывание, рев)
http://entertainment.howstuffworks.com/arts/literature/cthulhu2.htm

ОНЧ излучение. Электромагнитные колебания очень низкой частоты (ОНЧ) предшествующие землетрясению, аналогично предыдущей оценке, так же не могут быть испущены из очага землетрясения. Коэффициент поглощения электромагнитного сигнала α записывается как: $\alpha \approx (\pi\mu f/\rho)^{1/2}$, где μ - магнитная проницаемость, ρ - удельное сопротивление, f – частота сигнала. На частоте 1 кГц для магнетита α = 170 м$^{-1}$, а на частоте 10 кГц α = 560 м$^{-1}$. Изменение амплитуды гармоники частотой 1 кГц на расстоянии 1 см определяется как 0.37, а для частоты 10 кГц эта величина равна 3.7 10^{-3}, иначе, сигнал частотой 10 кГц убывает в 100 раз сильнее. Фактически отсюда следует, что электромагнитный сигнал частотой 10 кГц возникает практически на поверхности земли и никак не может быть обнаружен с глубины очага землетрясения. Обе приведенные оценки (АЭ и ОНЧ) показывают, что источник сигналов находится вблизи приемника и, вместе с тем, - со всей очевидностью имеет связь с землетрясением. Причем, эта связь не может передаваться ни акустическим каналом, ни электромагнитным.

Гравиинерциальные эффекты. Предназначенная для прогноза землетрясения станция ATROPATENA разработана в НИИ прогнозирования и изучения землетрясений в Баку и там же установлена в 2005. Две другие аналогичные станции установлены в г. Йогьякарта (Индонезия) и г. Исламабад (Пакистан).

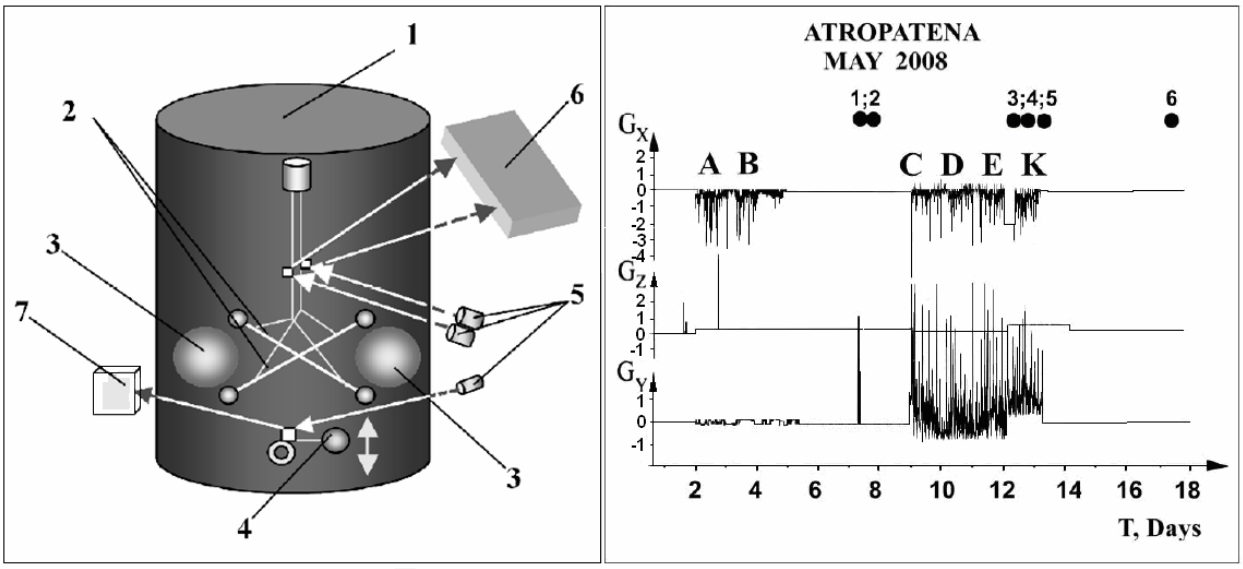


Рис. 10-25 слева. Схема конструкции ТД ДГВ – ATROPATENA. 1 – стеклянный корпус детектора; 2 – коромысла с малыми массами на концах; 3 – большие массы; 4 – пробная

масса, подвешенная на подпружиненном рычаге; 5 – лазерные излучатели; 6 – чувствительная оптическая матрица для горизонтальных сенсоров; 7 – чувствительная оптическая матрица для вертикального сенсора. Рис. 6 справа. Гравитограмма с 1 по 17 мая 2008 г. A, B, C, D, E, K – зарегистрированные аномалии гравитационного поля; **1**, **2** – землетрясения в Японии (Хонсю) 0.7-0.5-2008 *M* 6.2 (время - 16:02:01) и *M* 6.8 (время – 16:45:20); **3**; **4**; **5**; **6** – землетрясения в Китае (Сичуань) 12.05.2008 *M* 8 (время 06:28:00); *M* 6.3 (время 06:43:14); 13.05.2008 *M* 5.9 (время 07:07:08); 17.05.2008 *M* 6.0 (время17:08:25).

Прибор «Торсионный детектор длиннопериодных гравитационных вариаций (ТД ДГВ) ATROPATENA» представляет собой замкнутую и изолированную от внешней среды систему сенсоров, использующих физический принцип «Весов Кавендиша», в которых подвешены на нитях вместо одного – два коромысла с малыми массами, размещенными на концах двух коромысел, на равном удалении от них размещены большие массы. Схема конструкции прибора и результаты наблюдений 6-ти землетрясений приведены на рис. 10-25.

Явления в атмосфере. Свечение. Свечение неба накануне сильного землетрясения - известный факт. Приведем несколько примеров. В канун землетрясения 1855 года в Эдо (M = 6,9) в море вышла группа из 19 человек. Незадолго до первого толчка люди вдруг заметили свечение неба на северо-востоке. Оно было таким ярким, что не составляло труда отчетливо рассмотреть цветные узоры на одежде. Вскоре после свечения из-под воды послышался страшный рев и тут же яркое пламя, сопровождаемое разными звуками, охватило все небо. В течение нескольких ночей перед наиболее сильным толчком землетрясения 1703 года (M = 8.2) в Гэнроку (Япония) очевидцы наблюдали свечение воздуха. Землетрясение 1927 года в Крыму примечательно световыми эффектами в виде огненных столбов, поднявшихся над морем. Напротив мыса Лукулл эти столбы вознеслись на высоту около 500 м. То же было во время ашхабадской трагедии 5 октября 1948 года (M = 7,6). Перед ташкентским землетрясением 26 апреля 1966 года (M = 5), по данным некоторых жителей, все небо над эпицентром также светилось. Зарево белесовато-розового цвета, напоминающая рассеянный свет молний, наблюдалось над городом за несколько часов до толчка.

Совсем недавно (04.09.2010) «светящееся (рис. 10-26) землетрясение (M = 7.1) произошло в Новой Зеландии, в 40 км от г. Christchurch (Duncan, 2011).

Рис. 10-26. Свечение неба незадолго до сильного (M = 7.1) землетрясения в Новой Зеландии (Duncan, 2011).

Известны также случаи свечения моря. Эти случаи наблюдатели обычно связывают с цунами, что вполне естественно, т.к. главная опасность землетрясения на море – цунами. Попытки найти разумное объяснение этим явлениям - автору не известны.

Атмосферное электричество. В разделе 20. 8. «Вариации E при изменении параметров геофизической среды», приведен рисунок 20-26, показывающий вариацию электрического поля *Ez* во время землетрясения на Суматре 26.12.2004 (M = 8.3). Датчик АЭП был установлен на сейсмостанции Uper Tiber Valley (Тоскания, Италия). Он зарегистрировал заметные изменения вертикальной компоненты поля перед, во время и после крупнейшего землетрясения на Суматре. Эти данные, насколько известно, не были подтверждены в других пунктах наблюдения АЭП. В частности, на Камчатской обсерватории Паратунка, в этот день были условия «хорошей погоды», однако подобного явления (рис. 20-26, справа) - зарегистрировано не было. Возникает резонный вопрос: насколько реально это измерение и какова может быть природа явления, если на значительно более близкой обсерватории, на Камчатке – такого сигнала не было. Хотя, на той же обсерватории неоднократно регистрировались изменения *Ez* перед местными землетрясениями.

Возмущения в ионосфере. Анализ накопленной информации по связи ионосферы с предстоящим землетрясением позволил обнаружить предвестников землетрясений во временных вариациях ионосферных параметров. Было найдено, что за несколько дней перед землетрясением наблюдаются определенные эффекты в суточном ходе *foF*2, в частности, заметное повышение или понижение критических частот относительно медианы. Аналогичный эффект был обнаружен и параметрах слоя *E*s, который заключался в увеличении *foE*s за несколько дней перед землетрясением.

Наряду с выявлением общих закономерностей, имеющих место во временном ходе ионосферных параметров, как перед землетрясением, так и после него, происходил поиск возможных физических механизмов, которые могли вызывать такие эффекты. На основе этих исследований был сделан вывод о том, что перед началом землетрясения и во время сейсмического процесса происходит усиление квазистатического электрического поля, связанного с изменением структуры земной коры. Это электрическое поле проникает на высоты ионосферы и может оказывать влияние на вариации электронной концентрации в E и F-областях ионосферы.

Сейсмомагнитосферные эффекты и частицы высокой энергии. В работе (Гальперин и др., 1992) рассмотрен случай, когда над эпицентральной зоной землетрясения, за несколько часов до главного удара, одновременно пролетали два спутника «Ореол-3» и «ИКБ-1300». Спутники зарегистрировали высыпание высокоэнергичных (> 100 кэВ) электронов и протонов на орбите $L = 1.25$. Одновременно оба спутника регистрировали КНЧ и ОНЧ шумы. Источник этих шумов соответствовал гипоцентру землетрясения, а сами шумы расходились виде конуса, с вершиной у поверхности земли. Явления, происходящие в магнитосфере и возникающие под воздействием готовящегося землетрясения, получили название сейсмомагнитосферные эффекты и, соответственно, сейсмомагнитосферные шумы (СМШ). Интенсивность СМШ возрастает по мере приближения основного толчка и, в отличие от других методов, продолжается некоторое время после землетрясения. Принято считать, что причиной СМШ являются захваченные магнитным полем заряженные частицы, а они сами – продукт высыпания из радиационного пояса, как это отмечено в районе Бразильской магнитной аномалии. «Была обнаружена некоторая корреляция между темпом счета частиц и среднесуточной глобальной сейсмической активностью, определяемой суммарным числом землетрясений по всему земному шару.

Вывод. Анализ явлений, предшествующих и сопутствующих землетрясению показывает, что накануне землетрясения в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере происходят события, которые, очевидно, *имеют непосредственную с ним связь*. За несколько часов, или даже дней, - до основного удара, предшествующие ему события (явления) прекращаются. Это относится в большей мере с таким малоинерционным явлениям как: акустическая эмиссия, ОНЧ-излучение, АЭП, явления, связанные с изменениями силы тяжести среды, и т.п. Очевидно, что все эти явления происходят в непосредственной окрестности измерительного прибора. Сигналы, если бы они производились в очаге землетрясения в силу их особенностей и особенностей среды распространения, - *не смогли бы достигнуть регистрирующего их прибора*. Следует отметить, что приборы, регистрирующие изменения геофизической среды перед землетрясением, располагаются подчас на огромных (тысячи км) расстояниях от эпицентра землетрясения. Часто бывает так, что прибор, регистрирующий эффект, установленный ближе к землетрясению, чем другой, - его не обнаруживает. Несоответствие друг другу отмечаемых нами фактов, а так же невозможность найти им объяснение в рамках общепринятых представлений по физике землетрясения - является принципиальным моментом. Разрешение известных парадоксов в физике Земли в рамках квантовой механики, на наш взгляд, может приблизить нас к пониманию природы самого явления землетрясения и явлений, имеющих непосредственную с ним взаимосвязь.

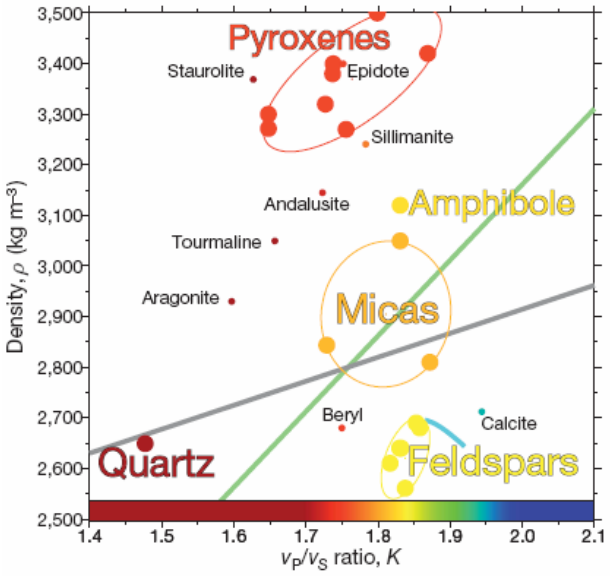


Рис. 10-27 Соотношение: плотность различных горных пород – отношение сейсмических скоростей (Lowry, Pérez-Gussinyé; 2011). Зеленая линия – лабораторные эксперименты, серая – измерения в полевых условиях.

Нам остается выяснить главный вопрос: существует ли в сейсмически активных районах горные породы, имеющие в своем составе водородные связи. Ответ на этот принципиальный вопрос можно найти в журнале Nature (Lowry, Pérez-Gussinyé; 2011), который был выпущен накануне сильнейшего землетрясения в Японии в марте 2011. Американские геофизики Лоури и его коллеги изучили температуру и гравитационные характеристики почв вдоль западной границы США - сейсмически активного горного региона Кордильер. Передвижная сейсмическая лаборатория, которой они воспользовались, позволила создать детальную карту геологических свойств земной коры в этом регионе. Ученые обнаружили, что отложения кристаллического кварца всегда сопровождают горные гряды или линии разломов на территории Калифорнии, Айдахо, Невады и Юты. Они показали, что подземные залежи кварца по всему миру могут

являться определяющим фактором в возникновении землетрясений, формировании горного рельефа и других тектонических процессах (рис. 10-27).

Геофизики предполагают, что залежи кварца соответствуют участкам хрупкой земной коры, где зарождаются геологическое события - землетрясения или извержение вулканов. Хрупкость «кварцевой» земной коры объясняется тем, что она содержит заметное количество воды, которая испаряется при нагревании верхним слоем мантии. Порода становится менее прочной, ее пласты двигаются, и происходит сейсмическое событие. Лоури назвал этот процесс «циклом вязкости».

С другой стороны известно, что поверхность кварца всегда несет на себе гидроксильный покров. Даже свежее образованные поверхности немедленно присоединяют гидроксильные группы из влаги воздуха. Поверхность кварца проявляет слабые кислотные свойства. Гидроксильный покров кварца легко образует водородные связи, прежде всего с водой. В результате поверхность кварца и кварцевых материалов обводняется. Гидрофильность кварцевого песка играет исключительную роль в структурообразовании полимербетонов и понимании физико-химических явлений в зоне контакта фаз. Наличие водной пленки на поверхности кварцевых частиц ингибирует отвердение связующего в пограничных слоях, т. е. ослабляет структуру в самых ответственных участках. Гидрофильность зерен кварца в конгломерате — полимербетоне создает благоприятные условия для диффузии воды и полярных веществ. (Свойства составляющих полимербетона и основы технологии http://www.jocelyngourvennec.com/2008/04/22/svoystva_sostavlyayushchih_polimerbetona_i_osnovi_tehnologii.html)

Сопоставление этих фактов открывает перспективу теоретической разработки ударно-волновой модели землетрясения основанной на использовании квантовых свойств геологической среды.

Литература

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. М.: Мир. 1983.

Берри Б.Л., Григоров Н.О., Качурин Л.Г. и др. Электромагнитные процессы при кристаллизации воды и разрушении льда. Пробл. техн. гляциологии. Новосибирск, 1986. С.24-32.

Гальперин Ю.И., Гладышев В.А., Джорджио Н.В. Ларкина В.И., Могилевский М.М. Высыпание энергичных заряженных частиц в магнитосфере над эпицентром готовящегося землетрясения // Косм. Исследования. 1992. Т. 30. Вып. 1. С. 89-106.

Гвоздев А.А., Кузнецов В.В. Откольные явления в грунтах, наблюдаемые при сейсморазведке. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. N. 5. С. 21-27.

Геодаков А.Р., Овсюченко А.Н., Платонова С.Г и др. Материалы предварительного изучения сильного землетрясения 2003 г. на Горном Алтае. Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН» № 1 (21) 2003, М.: ОИФЗ РАН, 2003. *URL:* http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-8.pdf

Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физ. мезомех. – 2008.-Т. 11.- № 2.-С. 5-13.

Жуков А.И. Применение метода характеристик к численному решению одномерных задач газовой динамики // Труды мат. инст. им. Стеклова, 1960, Т. 58. 150 с.

Журков С.Н., Петров В.А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел. ДАН. 1978. Т. 239. № 6. С. 1316-1319.

Журков С.Н., Куксенко В. С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. науч. тр. М.: Наука, 1980. С. 78-85.

Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ–ВНИИТФ. 1997.

Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. М.: Наука. 1988. 368 с.

Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 1966. М.: Наука. 686 с.
Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики сейсмичности и поля поглощения S-волн в районе очага Суматринского землетрясения 26 декабря 2004 г. ДАН 2008. Т. 422. № 5. С. 672-676.
Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на P- и S-волнах. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.
Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. 1990. - Новосибирск. Препринт ИГиГ, № 8, -18 с.
Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. 1992.- Новосибирск: Наука,- 96с.
Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин. ПМТФ. 2001-а. Т. 42. № 4. С. 184-189.
Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. Науки о Земле: Современные проблемы сейсмологии. - М.: Вузовская книга, 2001-б. С. 47-62.
Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. - Петропавловск-Камчатский. КамГУ, 2008. - 367 с.
Кузнецов Д.М., Смирнов А.Н., Сыроешкин А.В. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях в водной среде. Рос. хим. ж. 2008. Т. 52. № 1.С. 114-121.
Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР. 2006.
Кусов А.А. Фононная модель разрушения нагруженной атомной цепочки. ФТТ. 1979. Т. 21. № 10. С. 3095-3099.
Смирнов А.Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах. 2008. http://www.chem.msu.su/rus/jvho/2001-1/29.pdf
Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружений. Энергетическое строительство. 1992. № 9. С. 70-73.
Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. - М.: Наука. 1971. - 854 с
Старр В.П. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир. 1971. 130 с.
Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 404 с.
Шибков А.А., Желтов М.А., Королев А.А. Собственное электромагнитное излучение растущего льда. Природа. 2000. № 9.
http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/09_00/RADIOICE.HTM

Allan D.R., Marshall W.G., Pulham C.R. The high-pressure crystal structure of potassium hydrogen carbonate ($KHCO_3$). American Mineralogist. 2007. V. 92. P.1018-1025
Anderson J.G., Yu G. Predictability of strong motion from the Northridge, California Earthquake. Northridge Earthquake. January 17, 1994. Bulletin Seismological Society of America (BSSA). 1996. V. 86. N. 1B. P. 100 – 114.
Aspect A. Bell's theorem: the naïve view of an experimentalist // Quantum [Un] speakables – From Bell to Quantum information. Ed. R.A. Bertlmann & A. Zeilinger, Springer. 2002.
Beavan J., Wang X., Holden C., et al. Near-simultaneous great earthquakes at Tongan megathrust and outer rise in September 2009 // Nature 2010. V. 466. P. 959-963.
Bennett C. H., et al., Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels // Phys. Rev. Lett. 1993, V.70, P.1895.
Schrödinger E. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik // Naturwissenschaften, 1935, **48**, 807, **49**, 823, **50**, 844
Bardet J.P., Davis C. Engineering observations on ground motions at the Van Norman Complex after the 1994 Northridge Earthquake. Northridge Earthquake January 17, 1994. Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. N. 1B. P. 333-349.

Dicke R.H. Coherence in spontaneous radiation processes. Phys. Rev. 1954. V.93. N. 1. P. 99-110.
Duncan P. Earthquake Lights, or 'Lightning', is a well documented phenomena // http://www.nzherald.co.nz/christchurch-earthquake/news/article.cfm?c_id=1502981&objectid=10673092
Fellaux F., Cousson A., Gutmann M.J. Macroscopic quantum entanglement and "super-rigidity" of protons in the $KHCO_3$ crystal from 30 to 300 K // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. V. 18. P. 3229-3249.
Giammanco S., Palano M., Scaltrito A. et al. Possible role of fluid overpressure in the generation of earthquake swarms in active tectonic areas: The case of the Peloritani Mts. (Sicily, Italy). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008, V.178, No 4, P. 795-806.
Harp E.L., Jibson R.W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake. BSSA. 1996. V.86. N.1B. P. S 319-S 332.
Ishido T., Nishizawa O. Effect of zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression J. Geophys. Res. 1984. V. 89, N B6. P. 4153-4159.
Kameda J., Saruwatari K., Tanaka H. Hydrogen Generation by Wet Grinding of Quartz Powders and its Dependence on the pH and Ionic Strength of Liquid Media // Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2003, V. 76. No.11. P. 2153-2154.
Kasahara J., Toriumi M., Kawamura K. et al., Role of Water on Earthquake Generation. Part 1. Influence of Water on Earthquake Generation along Subduction Zones // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2001, V.76; No. 3, P.291-303.
Khalilov E. N. About possibility of creation of international global system of forecasting the earthquakes . Baku-Innsbruck: ICSD/IAS, 2007. P. 51–69. ISBN 978-9952-81-15-2-0
Lay T., Ammon C.J., Kanamori H. et al. The 2009 Samoa-Tonga great earthquake triggered doublet // Nature. 2010 V. 466. P. 964-970.
Lowry A.R., Pérez-Gussinyé M. The role of crustal quartz in controlling Cordilleran deformation // Nature, 2011, V.471, P.353–357.
Moehring D.L, Maunz P., Olmschenk S., et al. Entanglement of Single Atom Quantum Bits at a Distance. Nature, 2007, V. 449, P. 41.
Nagai T., Kagi H., Yamanaka T. The first observation of a pressure-induced transition and compression behavior of kalicinite ($KHCO_3$) at room temperature // Solid State Comm.. 2002. V. 123. P. 371-374.
Northridge Earthquake January 17, 1994. Bulletin Seismological Society of America 1996. V. 86. N.1. Part B.
Pan J.-W., Gasparoni S, Ursin R, et al., Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. Nature. 2000. V. 403. P. 515–519.
Saruwatari K., Kameda J., Tanaka, H. Generation of hydrogen ions and hydrogen gas in quartz–water crushing experiments: an example of chemical processes in active faults // Physics and Chemistry of Minerals, 2004, V. 31, No 3. P. 176-182.
Schweizer K.S., Stilling F. High pressure phase transitios and hydrogen-bond symmetry in ice polymorphs // J. Chem. Phys. 1984. V. 80 (3), P.1230-1240.
Shen, Z., Ge B. X., Jackson D. D. et al. Northridge Earthquake rupture models based on the Global Positioning System measurements. Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. N.1, Part B, P. 39- 48
Somerville P., Saika C., Wald D., Graves R. Implications of the Northridge earthquake for strong ground motions from thrust faults. 1996. BSSA. V. 86. N. 1B. P. S115-S125.
Su T., Taylor P.C., Ganguly G., Carlson D. E. Direct role of hydrogen in Staebler-Wronski effect in hydrogenated amorphous silicon. Phys. Rev. Lett. 2002. V, 89. 015502.
Sugimura E., Iitaka T., Hirose K., et al. Compression of H_2O ice to 126 GPa and implications for hydrogen-bond symmetrization: Synchrotron x-ray diffraction measurements and density-functional calculations. Phys. Rev. 2008. V. B77. P. 214103.

Tsuchiya J., Tsuchiya T., Tsuneyki S. First-principles study of hydrogen bond symmetrization of phase D under high pressure // American Mineralogy. 2005. V. 90. P. 44-49.
Ursin **R**., Jennewein T., Aspelmeyer M., et al.,. Quantum Teleportation across the Danube, Nature 430, 849 (2004).
Wald D.J., Heaton T.H., Hudnut K.W. The slip history of the Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data. BSSA. 1996. V. 86. P. S49-S70.
Wiens D.A., McGuire J.J., Shore P.JU., et al. A deep earthquake aftershock sequence and implications for the repture mechanism of deep earthquakes. Nature. 1994. V. 372. P. 540-543.
Zeng Y., Anderson J.G. A composite source model of the 1994 Northridge Earthquake using genetic algorithms. Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. N.1, Part B. P. 71-83

Глава 11. Вулканизм Земли, планет и спутников.

В 11-ой главе дается общее представление о вулканизме и его роли в эволюции Земли. О некоторых особенностях вулканизма в наши дни и в прошлом. Модели вулканических извержений, распределение их на поверхности Земли. Вулканы, супервулканы и климат. Вулканическая опасность и прогноз извержений. Вулканы планет и спутников Солнечной системы.

11. 1. Вулканизм.

Вулканы**,** отдельные возвышенности над каналами и трещинами земной коры, по которым из глубинных магматических очагов выводятся на поверхность продукты извержения. Вулканы обычно имеют форму конуса с вершинным кратером (глубиной от нескольких до сотен метров и диаметром до 1,5 км). Во время извержений иногда происходит обрушение вулканического сооружения с образованием кальдеры - крупной впадины диаметром до 16 км и глубиной до 1000 м. При подъеме магмы внешнее давление ослабевает, связанные с ней газы и жидкие продукты вырываются на поверхность, и происходит извержение вулкана. Если на поверхность выносятся древние горные породы, а не магма, и среди газов преобладает водяной пар, образовавшийся при нагревании подземных вод, то такое извержение называют фреатическим.

К действующим, - относятся вулканы, извергавшиеся в историческое время или проявлявшие другие признаки активности (выброс газов и пара и проч.). Некоторые ученые считают действующими те вулканы, о которых достоверно известно, что они извергались в течение последних 10 тыс. лет. Например, к действующим следовало относить вулкан Ареналь в Коста-Рике, поскольку при археологических раскопках стоянки первобытного человека в этом районе был обнаружен вулканический пепел, хотя впервые на памяти людей его извержение произошло в 1968, а до этого никаких признаков активности не проявлялось.

Извержение вулканов — одно из самых эффектных и грозных явлений природы. В процессе извержения из глубинных недр Земли на поверхность выносится расплавленная огненная масса (магма). Наземные вулканы образуют огромное количество лав и вулканогенно-обломочного материала. Например, во время извержения вулкана Безымянного на Камчатке в 1956 г. выброшенный из жерла вулкана обломочный материал достиг объема нескольких кубических километров, а объем излившейся лавы составил несколько десятков кубических километров. При этом высота подъема газов, паров воды, насыщенных пеплом и обломками, лав достигала 45 км.

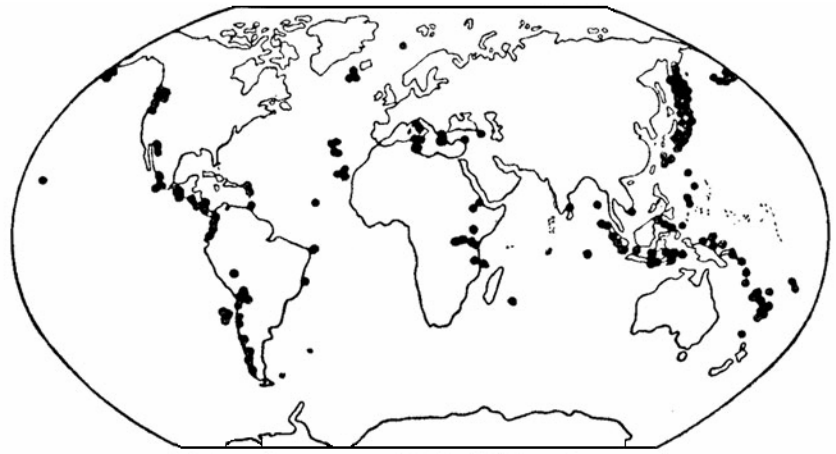


Рис. 11-1. Распределение вулканов по Земле.

Еще больше масштабы подводного вулканизма. В пределах срединно-океанских хребтов ежегодно извергается базальтовых подводных лав приблизительно в три раза больше, чем у наземных вулканов. В соответствии с концепцией тектоники литосферных плит, - вся океанская земная кора (более – 2/3 всей поверхности Земли) сформировалась в результате глубоководного вулканизма за последние 150 млн. лет.

Наземные извержения вулканов происходят практически на всех формах рельефа поверхности, сформировавшихся в результате самых различных геодинамических процессов. Отнесем сюда: островные дуги (Курило-Камчатская, Японская, Филиппинская и другие островные дуги Тихого океана, острова Индонезийского архипелага, Малые Антильские острова). Также: активные окраины континентов андийского типа (Анды и Кордильеры), зоны сочленения континентов (Кавказ и Средиземноморье), рифтовые зоны континентов (Восточная Африка и Байкал) и участки аномального вулканизма («горячие точки») в пределах срединно-океанских хребтов (Исландия, Галапагос, о. Вознесения и др.). Это и зоны аномального внутриплитового вулканизма (нагорья Ахаггар и Тибести в Африке) и районы пассивных окраин континентов (острова Зеленого Мыса, Камерун).

В зависимости от вязкости и газонасыщенности магмы наземные извержения отличаются исключительным разнообразием. При обычных для начала извержения температурах 1000 – 1200 °С вязкость магматических расплавов разного состава (в зависимости от места извержения) может изменяться от 10^2 до 10^{10} Пуаз. При этом по мере снижения температуры расплава его вязкость может возрастать на 3-4 порядка. Существуют различные типы извержений вулканов в зависимости от величины вязкости расплавов. Гавайский тип извержения, создающий чаще всего щитовидные вулканы, отличается относительно спокойным излиянием жидкой базальтовой магмы, образующий в кратерах огненно-жидкие озера и лавовые потоки. Газы образуют фонтаны, выбрасывающие комки и капли жидкой лавы, которые вытягиваются в полете в тонкие стеклянные нити (вулкан Килауэа).

В стромболианском типе извержений, создающем обычно стратовулканы, наряду с излиянием жидких лав базальтового и андезито-базальтового составов, преобладающими являются небольшие взрывы, которые выбрасывают куски шлака и витые и веретенообразные бомбы.

Для купольного типа извержений характерно выжимание и выталкивание вязкой (андезитовой, дацитовой или риолитовой) лавы сильным напором газа из каналов вулкана и образование куполов, криптокуполов, конусокуполов и обелисков.

В вулканическом типе большую роль играют газообразные вещества, производящие взрывы и выбросы огромных черных туч, переполненных большим количеством обломков лав.

Глубоководный вулканизм проявляется главным образом в осевых частях срединно-океанских хребтов и в зонах окраинных морей, где происходит излияние однообразных по составу расплавов толеитовых базальтов. В меньшей степени глубоководный вулканизм проявлен на трансформных разломах и в зонах аномального вулканизма (вулканы «горячих точек» типа Гавайского Императорского хребта).

На поверхности океана глубоководное извержение вулкана обычно никак не проявляется. Выделяющиеся из волнистых, подушечных, глыбовых расплавов вулканические газы полностью поглощаются водной толщей.

Процессы вулканизма, как уже отмечалось, играют большую роль в изменении облика Земли, формировании земной коры. Существенное влияние вулканизм оказывает на формирование атмосферы и гидросферы, на условия обитания живых организмов и человека. В районах, подверженных вулканизму, проживает более 400 млн. человек. В настоящее время на суше известно более 800 вулканов, извергавшихся в историческое время. Ежегодно на поверхности Земли происходит 20-30 извержений, из которых 1-2 приносят немалые разрушения существующим экосистемам. Упомянем несколько очень крупных катастрофических извержений вулканов.

Извержение крупного вулкана Индонезии — Тамборы считается самым мощным извержением, произошедшим в историческое время. Оно длилось более года с апреля 1815 г. по июль 1816 г. Высота бывшей горы уменьшилась на 1500 м. Взрывом была образована кальдера (округлая впадина на месте вулканического конуса) диаметром 6 км и глубиной 500-600 м, при этом перемещено почти на порядок больше горных пород, чем при извержении Кракатау. Извержение сопровождалось сильными землетрясениями, приливными волнами и ураганами. Были засыпаны метровым слоем пепла постройки, находящиеся на расстоянии от вулкана до 110 км. Погибло более 50 тыс. человек.
Крупнейшая катастрофа произошла при извержении вулкана Кракатау в Зондском проливе между островами Ява и Суматра.

26 августа 1883 г. началось извержение, которое можно было наблюдать с кораблей, проходивших вдалеке. На следующий день в 10 ч 20 мин гигантский взрыв разнес вдребезги вулканические конусы Данан и Первуватан. Грохот взрыва был слышен в Австралии (удаление 3 600 км) и даже на острове Родригес (Индийский океан). Тончайшая пыль достигла стратосферы, в которой она распространилась по всей Земле, вызвав во всех странах необычайно яркие закаты Солнца и сумерки. В Джакарте, напротив, пыль, попавшая в атмосферу, затмила солнце почти до полной темноты. Среднегодовая температура Земли в результате частичного экранирования солнечного излучения снизилась на несколько градусов. Чудовищный взрыв вызвал гигантскую волну (цунами) высотой до 40 м, которая обрушилась на города Марак, Аньер, Тьяринган и полностью их разрушила, погубив большую часть населения этих городов.

Вулкан Килауэа (о. Гавайи, США) в течение 10 лет, предшествовавших извержению, характеризовался повышенной сейсмической активностью, сопровождающейся плавными извержениями с накоплением лавы во впадинах на верхних этажах горы. 1 февраля 1994 г. в результате землетрясения с магнитудой 5,2
произошло обрушение отрезка побережья длиной 400 м и шириной 25 м, в результате чего потоки лавы устремились в море. Главный толчок сопровождался 300 повторными толчками. Почти непрерывное извержение Килауэа продолжается.

Исследование деятельности вулканов и их опасных проявлений может дать возможность предсказания характерных типов вулканической деятельности. Для прогноза извержений вулканов используются сейсмические и геомагнитные методы геофизических исследований. Эти методы оказались успешными при прогнозе извержений вулканов Михара (Япония), Руапеку и Нгаурукос (Новая Зеландия).

Типы вулканов: **Стратовулканы** – слоистые конусные вулканы. Угол обычно $\approx 30°$, но может достигать и $> 40°$ (около вершины).

- **Щитовидные** вулканы, образуются при извержении лавы базальтового состава с низкой вязкостью, что приводит к отсутствию конуса ($<10°$).
- **Базальтовые траппы** – продукты наиболее интенсивных этапов вулканизма в истории Земли. Форма – плато, площадью около 1 млн. км^2 и толщиной (геологи называют это мощностью) около 1 км. Формирование трапповой толщи происходит за время около 1 млн. лет. Средняя скорость извержения трапповых базальтов (1 км^3/год) в 20 раз превышает среднюю скорость извержения над типичной горячей точкой, такой, как Гавайи. Толщина отдельных лавовых потоков составляет около 20 м.
- **Кальдеры**, это вулканические кратеры диаметром более 1 км, возникающие после извержения и разрушения стратовулкана и проседанию свода магматического очага. Самые большие кальдеры достигают в диаметре нескольких десятков км (Иеллоустон – до 60 км).
- **Супервулкан** - вулкан, производящий наиболее сильные и объемные извержения. Мощность подобных извержений может варьироваться, однако объем продуктов извержения достаточен, чтобы радикально изменить ландшафт и значительно повлиять на

глобальный климат, вызывая катастрофические последствия для жизни, например вулканическую зиму.

Интенсивность извержения вулкана. (Volcanic explosivity index, VEI) была составлена Ньюэллом и Селфом для оценки силы вулканических извержений, которая могла бы быть выражена единственным параметром.
V – объем извергнутого материала, H – высота эруптивной колонны.

VEI	**V** ($м^3$)	**H** (км)	
0	**$<10^4$**	**<0.1**	**неэксплозивное**, высота столба пепла и газа менее 100 метров, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в тысячах кубометров; происходят ежедневно;
1	**10^4-10^6**	**0.1-1**	**слабое**, высота столба пепла и газа от 100 до 1000 метров, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в десятках и сотнях тысяч кубометров; происходят ежедневно;
2	**10^6-10^7**	**1-5**	**эксплозивное**, высота столба пепла и газа от 1 до 5 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в миллионах кубометров; происходят еженедельно;
3	**10^7-10^8**	**3-15**	**сильное**, высота столба пепла и газа от 3 до 15 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в десятках миллионов кубометров; происходят примерно раз в год;
4	**10^8-10^9**	**10-25**	**катаклизмическое**, высота столба пепла и газа от 10 до 15 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в сотнях миллионов кубометров; происходят раз в десятилетия;
5	**10^9-10^{10}**	**>25**	**пароксизмальное**, высота столба пепла и газа свыше 25 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в кубических километрах; происходят раз в столетия, пример – извержение Св. Елены в 1980 году;
6	**10^{10}-10^{11}**	**>25**	**колоссальное**, высота столба пепла и газа свыше 25 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в десятках кубических километров; происходят раз в столетия, пример – извержение Кракатау в 1883 году;
7	**10^{11}-10^{12}**	**>25**	**суперколоссальное**, высота столба пепла и газа свыше 25 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в сотнях кубических километров; происходят раз в тысячелетия, пример – извержение Тамбора в 1815 году;
8	**$>10^{12}$**	**>25**	**мегаколоссальное**, высота столба пепла и газа свыше 25 км, объём выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в тысячах кубических километров; происходят раз в десятки тысяч лет, пример, – извержение, создавшее Йеллоустонскую суперкальдеру около двух миллионов лет назад.

***Рекорды*:**

- **Самый сильный вулканический взрыв.** Сильнейший вулканический взрыв в истории (возможно, со времени извержения вулкана Санторин в Эгейском море, в 95 км к северу от Крита, около 1628 г. до н.э.) произошел 27 августа 1883 г. в 10 ч утра по местному времени при извержении вулкана Кракатау в Зондском проливе между островами Ява и Суматра, Индонезия. Вызванная им приливная волна смыла 163 деревни, что привело к гибели 36 380 человек. Куски раскаленной лавы выбрасывались в воздух на высоту 55 км, а унесенный ветром вулканический пепел через 10 дней выпал за 5330 км от места извержения. Через 4 ч вулканический взрыв был зарегистрирован на о. Родригес, в 4776 км от Кракатау. Его грохот был слышен на 8% территории земного шара. И все же этот взрыв, примерно в 26 раз превосходивший по силе самую мощную водородную бомбу, испытанную в СССР, был в 3 раза слабее, чем во время извержения вулкана Санторин.
- **Самое мощное извержение - "Тамбора"** Общий объем лавы и пепла во время извержения вулкана Тамбора на о. Сумбава, Индонезия, 5-10 апреля 1815 г. составил 150-180 км^3. Для сравнения: вулкан Санторин выбросил около 60-65 км^3 породы, вулкан Кракатау - 20 км^3. Энергия извержения Тамборы, в результате которого высота острова уменьшилась с 4100 до 2850 м (т.е. на 1250 м), равнялась 8,4x10^{19} Дж.
- **Самое мощное извержение - "Таупо"** Самое мощное из всех документально зарегистрированных вулканических извержений произошло в Новой Зеландии около 130 г. н.э. По оценкам ученых, вулкан Таупо выбросил 30 млрд. т породы. Скорость ее извержения достигала 700 км/ч. Она покрыла территорию в 16 000 км^2 менее 20 процентов от 14x10^9 т породы упало в радиусе 200 км от кратера.
- **Самый длинный поток лавы - "Лаки"** Самый длинный поток лавы с вкраплениями падавших в него веретенообразных лавовых сгустков излился во время извержения вулкана Лаки на юго-востоке Исландии в 1783 г. Раскаленная масса растеклась на расстояние 65-70 км.
- **Самый активный действующий вулкан - "Килауэа"** Вулкан Килауэа на Гавайях, США, каждую секунду извергает 5 м^3 лавы.
- **Самый большой действующий вулкан - "Мауна-Лоа"** Купол вулкана Мауна-Лоа на Гавайях имеет высоту 4170м, 120 км в длину и 50 км в ширину. Его объем 42 500 км^3, причем 84,2% из них приходится на подводную часть вулкана. Кратер под названием Мокувеовео площадью 10,5 км^2 уходит в глубь горы на 150-180 м. С 1843 по 1984 г. Мауна-Лоа извергался в среднем раз в 4,5 года.
- **Самый высокий вулкан - "Аконкагуа"** Заснеженный пик "спящего" вулкана Аконкагуа, расположенного высоко в Андах на территории Аргентины, поднимается на высоту 6690 м.
- **Самый высокий действующий вулкан - "Охос-дель-Саладо"** Вулкан Охос-дель-Саладо (имеющий фумаролы), расположенный на границе Аргентины и Чили, имеет высоту 6887 м.
- **Самый большой кратер - "Тоба"** Самая большая кальдера (широкий и плоский вулканический кратер) у вулкана Тоба на севере центральной часто о. Суматра, Индонезия (площадь 1775 км^2).
- **Самый молодой вулканический остров - "Тонга"** Самый новый в мире и пока еще безымянный остров входит в группу островов Хаапаи, Тонга. Днем его рождения можно считать 6 июня 1995 г., когда на поверхности были впервые замечены признаки подводной вулканической активности, которые и привели к образованию нового участка суши. Расположен он между островами Као и Лаге и занимает территорию 5 га; самая возвышенная точка острова находится на высоте 40 м.
- **Самые большие потери вследствие извержения вулкана - "Тамбора"** Извержение вулкана Тамбора, о. Сумбава, Индонезия, 5-7 апреля 1815 г. привело к тому, что уровень поверхности острова понизился на 1250м (с 4100 до 2850 м). Непосредственно в результате этого извержения и последовавшего за ним голода погибли 92 000 человек.

11. 2. Роль вулканизма в эволюции Земли. (Фролова, 1996).

Объектами, позволяющими получить информацию о глубинах Земли, являются горные породы магматического происхождения, которые образуются при застывании глубинных (эндогенных) расплавов. Одни из них, эффузивные, или вулканические, достигают поверхности Земли и быстро застывают, не успевая измениться. Другие - интрузивные, или плутонические, длительно застывают в земной коре. Поэтому для познания строения и состава недр Земли более информативными являются вулканические породы.

Вулканические породы являются продуктами глубинного процесса - вулканизма. По определению известного вулканолога А. Джаггара, вулканизм - это совокупность явлений, протекающих в земной коре и под нею, приводящих к прорыву расплавленных масс через твердую кору. Вулканизм связан с потоком горячих глубинных газов - флюидов из недр Земли. Флюиды способствуют разуплотнению и локальному подъему глубинного вещества, которое в результате понижения давления (декомпрессии) начинает частично плавиться, образуя глубинные диапиры - источники магматических расплавов. В зависимости от интенсивности прогрева образование расплавов происходит на разных уровнях мантии и земной коры, начиная с глубин 300 - 400 км.

Вулканология - это наука о вулканах и их продуктах (вулканических породах), о причинах вулканизма, обусловленных геодинамическими, тектоническими и физико-химическими процессами, совершающимися в недрах Земли. Помимо геологических наук: исторической геологии, геотектоники, петрографии, минералогии, литологии, геохимии и геофизики; - вулканология использует данные географии, геоморфологии, физической химии, а отчасти, - и астрономии. Вулканизм представляет собою общепланетарное явление. Известны вулканы на Марсе, Венере, Луне и спутниках Юпитера. Будучи продуктами глубинных (эндогенных) процессов, вулканы, образующиеся на поверхности Земли, оказывают влияние на окружающую среду, атмосферу и гидросферу, образование осадков. Вулканология как бы фокусирует проблемы, связывающие процессы внутренней и внешней энергетики Земли.

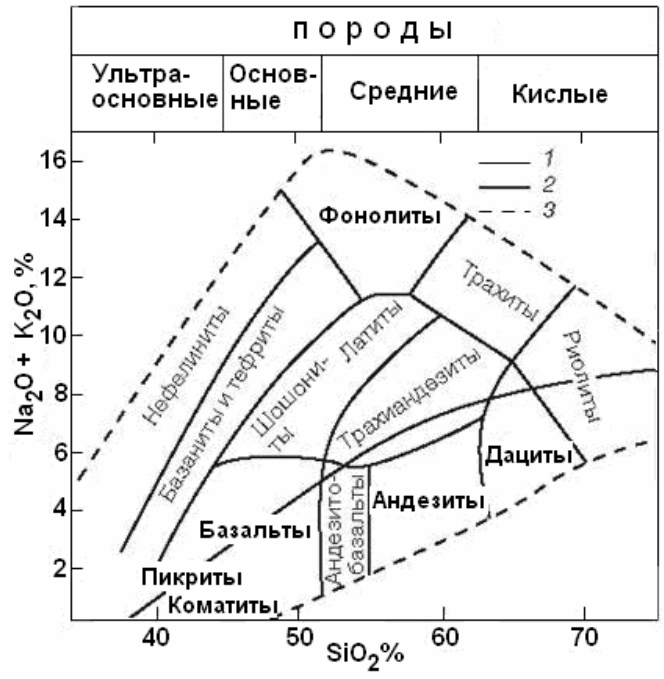


Рис. 11-2. Главные типы вулканических пород в координатах SiO_2 – $Na_2O + K_2O$:
1 – разделительная линия между породами нормальной щелочности и щелочными,
2 – границы между типами пород, 3 – линия, ограничивающая поле существования природных вулканических пород.

Общая классификация всех магматических пород, в том числе и вулканических, основана на их химическом составе и в первую очередь на содержании и соотношении в породах кремнезема и щелочей (рис. 11-2). По содержанию кремнезема, самого распространенного оксида в магматических породах, последние разделяются на четыре группы: ультраосновные (30 - 44% SiO_2), основные (44 - 53%), средние (53 - 64%), кислые (64 - 78%). Другой важный признак классификации - щелочность пород, оценивается суммой содержаний Na_2O + K_2O. По этому признаку выделяются горные породы нормальной щелочности и щелочные.

Наиболее широко среди вулканических пород Земли распространены основные породы - базальты, которые являются производными вещества мантии и встречаются как в океанах, так и на континентах. Их можно сравнить с "кровью" нашей планеты, которая появляется при любом нарушении земной коры. В зависимости от геологического положения базальты различаются по составу. Большая их часть относится к породам нормальной щелочности. Это богатые известью низкощелочные (толеитовые) и известково-щелочные базальты. Реже встречаются щелочные базальты, недонасыщенные кремнеземом. Базальтовые магмы при дифференциации дают серии пород (толеитовые, известково-щелочные и щелочные), объединенные происхождением из единой магмы, сохраняющие общие признаки с родоначальными базальтовыми магмами, вплоть до крайне кислых. Среди интрузивных пород наиболее распространены граниты. Они относятся к группе кремнекислых пород, в образовании которых существенную роль играет вещество земной коры. Средние по составу породы, которые представлены преимущественно вулканическими андезитами, встречаются реже и лишь в подвижных поясах Земли. В то же время средний состав земной коры отвечает андезитам, а не базальтам или гранитам, соответствуя смеси этих последних в отношении 2 : 1.

11. 3. Эволюция вулканизма в истории Земли.

Самые ранние процессы вулканизма синхронны со временем становления Земли как планеты. По всей вероятности, уже на стадии аккреции (концентрации планетного вещества за счет газово-пылевых туманностей и соударения твердых космических обломков - планетозималей) происходил ее разогрев. Выделение энергии за счет аккреции и гравитационного сжатия оказалось достаточным для ее начального, частичного или полного плавления, с последующей дифференциацией Земли на оболочки. Несколько позднее к этим источникам разогрева присоединилось выделение тепла радиоактивными элементами. Концентрация железокаменной массы Земли, как это, возможно, происходила и на других планетах Солнечной системы. Она сопровождалась обособлением газовой, преимущественно водородной оболочки, которую она в дальнейшем потеряла в период максимальной активности Солнца, в отличие от крупных, удаленных от Солнца планет группы Юпитера. Об этом говорит обеднение современной земной атмосферы редкими инертными газами - неоном и ксеноном по сравнению с космическим веществом.

Согласно представлениям А.А. Маракушева, дифференциация железокаменной массы Земли, близкой по составу метеоритам - хондритам и полностью расплавленной под большим давлением водородной газовой оболочки, привела к высокой концентрации существенно водородных флюидов (летучих компонентов в надкритическом состоянии) в начавшем обособляться металлическом (железо-никелевом) ядре. Таким образом, Земля приобрела большой флюидный запас в своих недрах, определивший ее последующую, уникальную по своей длительности, по сравнению с другими планетами, эндогенную активность. По мере консолидации Земли в направлении от ее внешних оболочек к центру, возрастало внутреннее флюидное давление и наступала периодическая дегазация, сопровождаемая образованием магматических расплавов, поступающих на поверхность при растрескивании застывшей земной коры. Таким образом, самый ранний вулканизм, который характеризовался взрывным, высокоэксплозивным характером, был связан с

началом остывания Земли и сопровождался образованием атмосферы. Согласно другим представлениям, первичная атмосфера, образовавшаяся на стадии аккреции, в дальнейшем сохранилась, постепенно эволюционируя в своем составе. Так или иначе, примерно 3,8 - 3,9 млрд. лет назад, когда температура на поверхности Земли и в прилегающих частях атмосферы опустилась ниже точки кипения воды, образовалась гидросфера. Наличие атмосферы и гидросферы сделало возможным в дальнейшем развитие жизни на Земле. Сначала атмосфера была бедна кислородом, пока не появились продуцирующие ее простейшие формы жизни, что произошло около 3 млрд. лет назад (рис. 11-3).

О составе самых ранних вулканических пород Земли, в настоящее время полностью переработанных последующими процессами, можно судить при сравнении ее с другими планетами земной группы, в частности с относительно хорошо изученным нашим спутником - Луной. Луна - планета более примитивного развития, рано израсходовавшая свой флюидный запас и потерявшая вследствие этого эндогенную активность. В настоящее время это "мертвая" планета. Отсутствие в ней металлического ядра говорит о рано прекратившихся процессах ее дифференциации на оболочки, а пренебрежимо слабое магнитное поле - о полном застывании ее недр. В то же время о наличии флюидов на ранних этапах развития Луны свидетельствуют пузырьки газа в лунных вулканических породах, которые состоят в основном из водорода, что говорит об их высокой восстановленности.

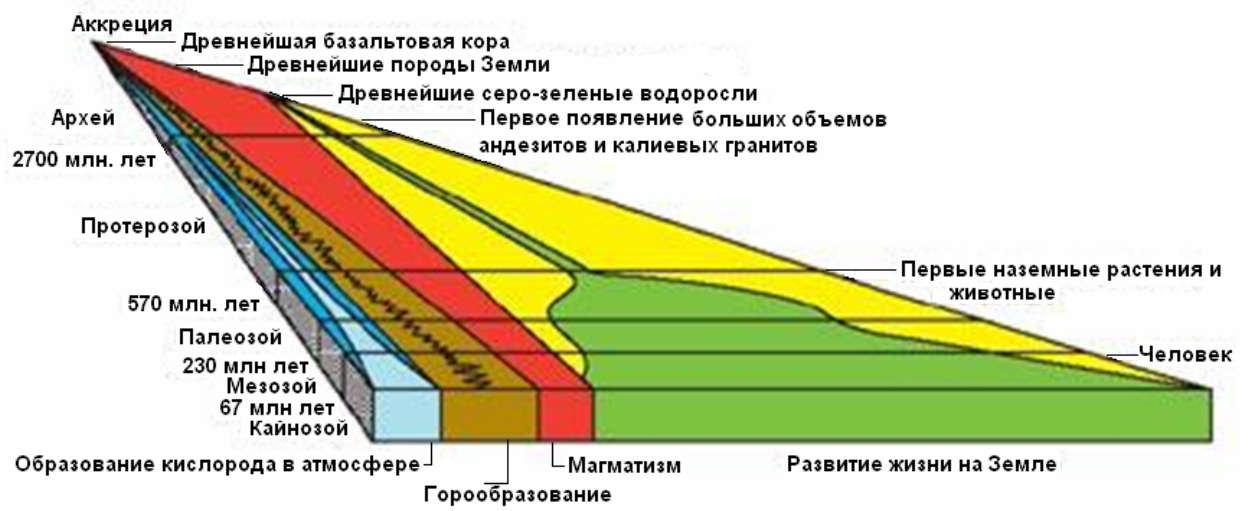


Рис. 11-3. Главнейшие этапы в истории Земли.

Наиболее древние, известные в настоящее время породы Луны, развитые на поверхности лунной коры на так называемых лунных материках, имеют возраст 4,4 - 4,6 млрд. лет, что близко к предполагаемому возрасту образования Земли. Они представляют собою кристаллизовавшиеся на малых глубинах или на поверхности богатые высококальциевым полевым шпатом - анортитом - светлоцветные основные породы, которые принято называть анортозитами. Породы лунных материков подвергались интенсивной метеоритной бомбардировке с образованием обломков, частично переплавленных и смешанных с метеоритным веществом. В результате образовались многочисленные ударные кратеры, сосуществующие с кратерами вулканического происхождения. Предполагается, что нижние части лунной коры сложены породами более основного, низкокремнеземистого состава, близкими к каменным метеоритам, а непосредственно подстилают анортозиты анортитовые габбро (эвкриты). На Земле ассоциация анортозитов и эвкритов известна в так называемых расслоенных интрузивах основного состава и является результатом дифференциации базальтовой магмы. Поскольку физико-химические законы, определяющие дифференциацию, одинаковы во всей Вселенной, логично предположить, что и на Луне древнейшая кора лунных

метеоритов образовалась в результате раннего плавления и последующей дифференциации магматического расплава, слагавшего верхнюю оболочку Луны в виде так называемого "лунного океана магмы". Отличия в процессах дифференциации лунных магм от земных заключаются в том, что на Луне она чрезвычайно редко доходит до образования высококремнеземистых кислых пород.

Позднее на Луне образовались крупные депрессии, названные лунными морями, заполненные более молодыми (3,2 - 4 млрд. лет) базальтами. По составу эти базальты в целом близки к базальтам Земли. Они отличаются низким содержанием щелочей, особенно натрия, и отсутствием оксидов железа и минералов, содержащих гидроксильную группу ОН, что подтверждает потерю расплавом летучих компонентов и восстановительную обстановку вулканизма. Бесполевошпатовые породы, известные на Луне, - пироксениты и дуниты, вероятно, слагают лунную мантию, являясь либо остатком от выплавления базальтовых пород (так называемым реститом), или же их тяжелым дифференциатом (кумулатом). Ранняя кора Марса и Меркурия аналогична кратерированной коре лунных материков. На Марсе, кроме того, широко развит более поздний базальтовый вулканизм. Базальтовая кора есть и на Венере, однако данные по этой планете пока очень ограниченны.

Привлечение данных сравнительной планетологии позволяет утверждать, что формирование ранней коры планет земной группы происходило в результате кристаллизации магматических расплавов, претерпевших большую или меньшую дифференциацию. Растрескивание этой застывшей протокоры с образованием депрессий сопровождалось позднее базальтовым вулканизмом.

В отличие от других планет, на Земле не сохранилось самой ранней коры. Более или менее достоверно историю вулканизма Земли можно проследить лишь с раннего архея. Самые древние из известных возрастных датировок принадлежат архейским гнейсам (3,8 - 4 млрд. лет) и зернам минерала циркона (4,2 - 4,3 млрд. лет) в метаморфизованных кварцитах. Эти датировки на 0,5 млрд. лет моложе, чем образование Земли. Можно предположить, что все это время Земля развивалась аналогично другим планетам земной группы. Примерно с 4 млрд. лет на Земле формировалась континентальная протокора, состоящая из гнейсов, преимущественно магматического происхождения, отличающихся от гранитов меньшими содержаниями кремнезема и калия. Они получили название "серых гнейсов" или ассоциации ТТГ, по названию трех главных магматических пород, соответствующих составу этих гнейсов: тоналитов, трондьемитов и гранодиоритов, подвергнутых впоследствии интенсивному метаморфизму. Однако "серые гнейсы" вряд ли представляли первичную кору Земли. Неизвестно также, насколько широко они были распространены. В отличие от значительно менее кремнеземистых пород лунных материков (анортозитов), такие большие объемы кислых пород не могут получиться при дифференциации базальтов. Образование "серых гнейсов" магматического происхождения теоретически возможно лишь при переплавлении пород базальтового или коматит-базальтового состава, вследствие своей тяжести опустившихся на глубокие уровни планеты. Таким образом, мы приходим к выводу о базальтовом составе коры, более ранней, чем известная нам "серогнейсовая". Наличие ранней базальтовой коры подтверждается находками в архейских "серых" гнейсах более древних метаморфизованных блоков основного состава. Неизвестно, претерпела ли родоначальная магма базальтов, слагавших раннюю кору Земли, дифференциацию с образованием анортозитов, подобных лунным, хотя теоретически это вполне возможно. Интенсивная многостадийная дифференциация планетного вещества, которая привела к образованию кислых гранитоидных пород, стала возможной благодаря водному режиму, установившемуся на Земле в связи с большим флюидным запасом в ее недрах. Вода способствует дифференциации и очень важна для образования кислых пород.

Таким образом, в течение самого раннего (катархейского) и архейского времени, преимущественно в результате процессов магматизма, к которым после образования гидросферы присоединилось осадконакопление, сформировалась земная кора. Она начала интенсивно перерабатываться продуктами активной дегазации ранней Земли с привносом кремнезема и щелочей. Дегазация была обусловлена формированием твердого внутреннего ядра Земли. Она вызывала процессы метаморфизма вплоть до плавления с общим покислением состава коры. Итак, уже в архее Земля имела все присущие ей твердые оболочки - кору, мантию и ядро.

Нарастающие различия в степени проницаемости коры и верхней мантии, которые были обусловлены различиями в их тепловом и геодинамическом режиме, привели к неоднородности состава коры и к формированию разных ее типов. В областях сжатия, где была затруднена дегазация и подъем на поверхность возникающих расплавов, последние испытывали интенсивную дифференциацию, а ранее образовавшиеся основные вулканические породы, уплотняясь, опускались на глубину и переплавлялись. Формировалась протоконтинентальная двухслойная кора, имевшая контрастный состав: верхняя ее часть была сложена преимущественно кислыми вулканическими и интрузивными породами, переработанными метаморфическими процессами в гнейсы и гранулиты, нижняя - породами основного состава, базальтами, коматитами и габброидами. Такая кора была свойственна протоконтинентам. В областях растяжения формировалась протоокеаническая кора, имевшая преимущественно базальтовый состав. По расколам в протоконтинентальной коре и в зонах ее сочленения с протоокеанической образовывались первые подвижные пояса Земли (протогеосинклинали), отличавшиеся повышенной эндогенной активностью. Уже тогда они имели сложное строение и состояли из менее мобильных приподнятых зон, претерпевших интенсивный высокотемпературный метаморфизм, и зон интенсивного растяжения и прогибания. Последние получили название зеленокаменных поясов, так как слагающие их породы приобретали зеленый цвет в результате процессов низкотемпературного метаморфизма. Обстановка растяжения ранних этапов формирования подвижных поясов сменялась по мере эволюции обстановкой преобладающего сжатия, что приводило к появлению кислых пород и первых пород известково-щелочных серий с андезитами (см. рис. 11-2). Подвижные пояса, закончившие свое развитие, причленялись к областям развития континентальной коры и увеличивали ее площадь. По современным представлениям, от 60 до 85% современной континентальной коры было сформировано в архее, и мощность ее была близка к современной, то есть составляла около 35 - 40 км.

На рубеже архея и протерозоя (2700 - 2500 млн. лет) в развитии вулканизма на Земле наступил новый этап. Стали возможными процессы плавления в сформированной к этому времени мощной коре, появилось больше кислых пород. Состав их существенно изменился, в первую очередь за счет увеличения содержания кремнезема и калия. Широкое распространение получили настоящие калиевые граниты, которые выплавлялись из коры. Интенсивная дифференциация мантийных базальтовых расплавов под воздействием флюидов в подвижных поясах, сопровождаемая взаимодействием с материалом коры, привела к увеличению объемов андезитов (см. рис. 11-2). Таким образом, помимо мантийного вулканизма, все большее значение приобретал коровый и смешанный мантийно-коровый вулканизм. В то же время, в связи с ослаблением процессов дегазации Земли, и связанного с ними теплового потока, - оказались невозможными столь высокие степени плавления в мантии, которые могли привести к образованию ультраосновных коматитовых расплавов (см. рис. 11-2). Если они и возникали, то редко поднимались на поверхность вследствие своей высокой плотности по сравнению с земной корой. Они претерпевали дифференциацию в промежуточных камерах и на поверхность попадали их производные - менее плотные базальты. Стали менее интенсивными также процессы высокотемпературного метаморфизма и гранитизации, которые приобрели не площадной, а локальный характер. По всей

вероятности, в это время окончательно были сформированы два типа земной коры (рис. 11-4), соответствующие континентам и океанам. Однако время образования океанов пока окончательно не определено.

В последующий этап развития Земли, который начался 570 млн. лет назад и носит название фанерозойского, те тенденции, которые появились в протерозое, получили дальнейшее развитие. Вулканизм становится все более разнообразным, приобретая четкие различия в океанических и континентальных сегментах. В зонах растяжения в океанах (срединно-океанических рифтовых хребтах) изливаются толеитовые базальты, а в аналогичных зонах растяжения на континентах (континентальных рифтах) к ним присоединяются и часто над ними превалируют щелочные вулканические породы. Подвижные пояса Земли, получившие название геосинклинальных, являются магматически активными десятки и сотни миллионов лет, начиная с раннего толеит-базальтового вулканизма, образующего совместно с ультраосновными интрузивными породами офиолитовые ассоциации в условиях растяжения. Позднее, по мере смены растяжения сжатием, они сменяются контрастным базальт - риолитовым и известково-щелочным андезитовым вулканизмом, достигшим расцвета в фанерозое. После складчатости, образования гранитов и орогенеза (роста гор) вулканизм в подвижных поясах становится щелочным. Таким вулканизмом обычно и заканчивается их эндогенная активность.

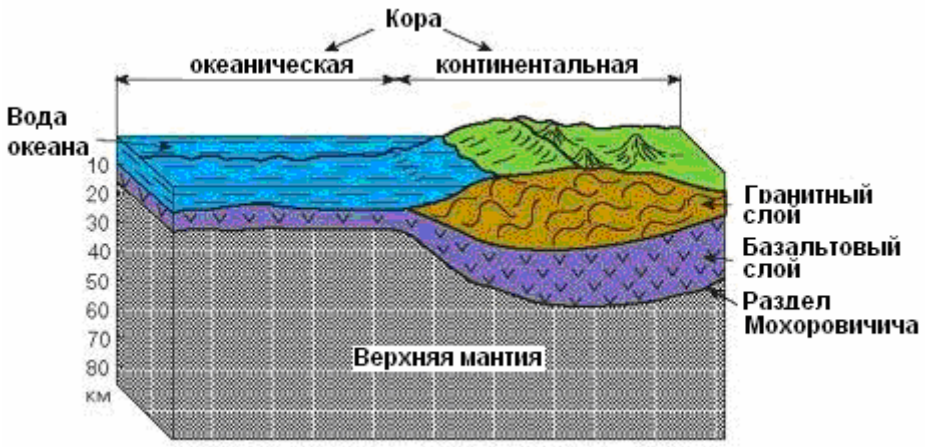


Рис. 11-4. Два главных типа земной коры – континентальной и океанической.

Эволюция вулканизма в фанерозойских подвижных поясах повторяет таковую в развитии Земли: от однородных базальтовых и контрастных базальт-риолитовых ассоциаций, господствовавших в архее, к непрерывным по кремнекислотности с большими объемами андезитов и, наконец, к щелочным ассоциациям, которые практически отсутствуют в архее. Эта эволюция, как в отдельных поясах, так и на Земле в целом, отражает общее уменьшение проницаемости и возрастание жесткости земной коры, что определяет более высокую степень дифференциации мантийных магматических расплавов и их взаимодействия с материалом земной коры, углубление уровня образования магм и уменьшение степени плавления. Сказанное выше связано с изменением внутренних параметров планеты, в частности с общим уменьшением глобального теплового потока из ее недр, который оценивается в 3 - 4 раза меньшим, чем на ранних этапах развития Земли. Соответственно уменьшаются и локальные восходящие потоки флюидов, возникающие в результате периодической дегазации недр. Именно они вызывают разогрев отдельных областей (подвижных поясов, рифтов и др.) и их магматическую активность. Эти потоки образуются в связи с накоплением на фронте кристаллизации внешнего жидкого ядра легких компонентов в отдельных выступах-ловушках, которые всплывают, образуя конвективные струи.

Эндогенная активность периодична. Она обусловила наличие крупных пульсаций Земли с попеременным преобладанием основного и ультраосновного магматизма,

фиксирующего растяжение, и известково-щелочного вулканизма, гранитообразования и метаморфизма, фиксирующих преобладание сжатия. Эта периодичность определяет наличие магматических и тектонических циклов, которые как бы наложены на необратимое развитие Земли.

11. 4. Вулканические явления в кайнозое.

Геологические структуры, где образуются вулканические породы в самый молодой, кайнозойский, этап развития Земли, начавшийся 67 млн. лет назад, находятся как в пределах океанических, так и континентальных сегментов Земли. К первым относятся срединные океанические хребты и многочисленные вулканы океанического дна, наиболее крупные из которых образуют океанические острова (Исландия, Гавайи и др.). Всем им свойственна обстановка высокой проницаемости земной коры (рис. 11-5). На континентах в аналогичной обстановке извергаются вулканы, связанные с крупными зонами растяжения - континентальными рифтами (Восточно-Африканский, Байкальский и др.). В обстановках преимущественного сжатия возникает вулканизм в горных сооружениях, представляющих собою в настоящее время активные внутриконтинентальные подвижные пояса (Кавказ, Карпаты и др.). Своеобразны подвижные пояса на окраинах континентов (так называемые активные окраины). Они развиты преимущественно по периферии Тихого океана. В западной его окраине в них, как и в древних подвижных поясах, сочетаются зоны преимущественного сжатия - островные дуги (Курило-Камчатская, Тонга, Алеутская и др.) и зоны интенсивного растяжения - тыловые окраинные моря (Японское, Филиппинское, Коралловое и др.). В подвижных поясах восточной окраины Тихого океана растяжение менее значительно. На краю Американского континента находятся горные цепи (Анды, Кордильеры), являющиеся аналогами островных дуг, в тылу которых расположены континентальные депрессии - аналоги окраинных морей, где господствует обстановка растяжения. В условиях высокой проницаемости, как всегда в истории Земли, изливаются мантийные расплавы, причем в океанических структурах они обладают преимущественно нормальной щелочностью, а в континентальных - повышенной и высокой. В обстановках преобладающего сжатия на континентальной коре, помимо мантийных, широко распространены породы смешанного мантийно-корового (андезиты) и корового (некоторые кислые эффузивы и граниты) происхождения (рис. 10-5).

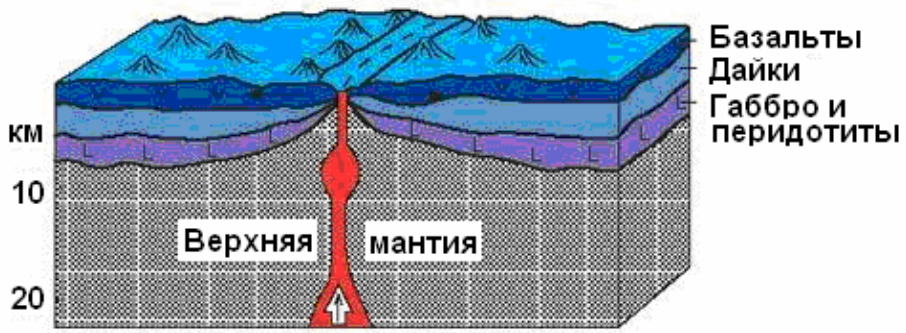


Рис. 11-5. Строение магматических очагов в геоструктурах высокой проницаемости. Блок-диаграмма срединно-океанического хребта.

Если учесть особенности современного этапа развития Земли, к которым относятся высокая интенсивность процесса формирования океанов и широкое развитие рифтовых зон на континентах, то становится ясным, что в кайнозойский этап развития преобладает растяжение и, как следствие, широко распространен связанный с ним мантийный, преимущественно базальтовый вулканизм, особенно интенсивный в океанах.

11. 5. Как процессы вулканизма преобразуют земную кору.

Еще в начале прошлого столетия было замечено, что горные породы образуют закономерно повторяющиеся ассоциации, получившие название геологических формаций, более тесно связанных с геологическими структурами, чем отдельные породы. Ряды формаций, сменяющие друг друга во времени, получили название временных, а, сменяющие друг друга в пространстве, - латеральных формационных рядов. Совместно они дают возможность расшифровать основные этапы развития геологических структур и являются важными индикаторами при восстановлении геологических обстановок прошлого. Вулканогенные формации, включающие в себя вулканические породы, продукты их перемыва и переотложения, а нередко и осадочные породы, удобнее использовать для указанных целей, чем интрузивные, поскольку они являются членами слоистых разрезов, что позволяет точно определить время их формирования.

Существует два типа рядов вулканогенных формаций. Первый, называемый гомодромным, начинается основными породами - базальтами, сменяясь формациями с постепенно возрастающими объемами средних и кислых пород. Второй ряд - антидромный, начинается с формаций преимущественно кислого состава с возрастанием роли основного вулканизма к концу ряда. Первый, таким образом, связан с мантийным вулканизмом и с высокой проницаемостью коры, и лишь по мере уменьшения проницаемости и прогрева коры глубинным теплом последняя - начинает участвовать в магмообразовании. Антидромный ряд свойствен геологическим структурам с мощной, слабо проницаемой континентальной корой, когда затруднено непосредственное проникновение на поверхность мантийных расплавов. Они взаимодействуют с материалом земной коры тем более интенсивно, чем она больше прогревается. Базальтовые формации появляются лишь впоследствии, когда кора растрескивается под напором мантийных магм.

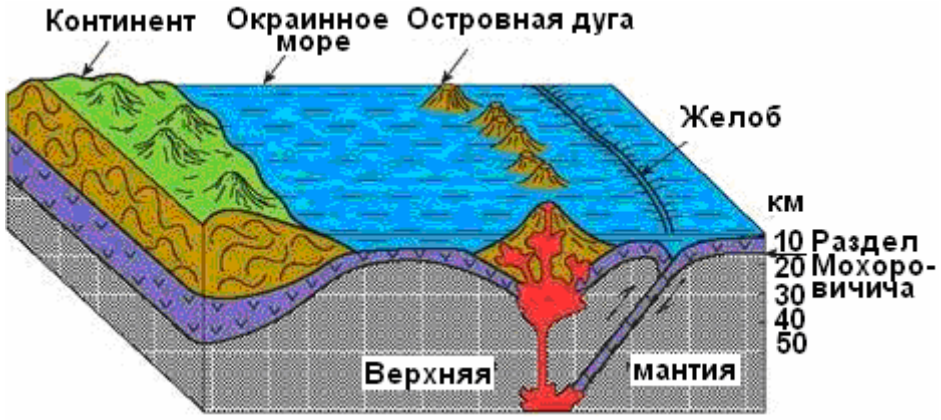


Рис. 11-6. Строение магматических очагов в геоструктурах низкой проницаемости. Блок-диаграмма активной окраины-желоба, островной дуги и окраинного моря.

Вулканизм отражает эволюцию Земли в течение ее геологической истории. Необратимость развития Земли выражается в исчезновении или резком уменьшении объемов одних типов пород (например, коматитов) наряду с появлением или увеличением объемов других (например, щелочных пород). Общая тенденция эволюции свидетельствует о постепенном затухании глубинной (эндогенной) активности Земли и увеличении процессов переработки континентальной коры при магмаобразовании.

Вулканизм - индикатор геодинамических обстановок растяжения и преобладающего сжатия, существующих на Земле. Типоморфным для первых является мантийный вулканизм, для вторых - мантийно-коровый и коровый.

Вулканизм отражает наличие цикличности на фоне общего необратимого развития Земли. Цикличность определяет повторяемость формационных рядов в одной отдельно взятой и в разновременных, но однотипных геологических структурах.

Эволюция вулканизма в геоструктурах Земли является индикатором формирования земной коры и ее разрушения (деструкции). Эти два процесса непрерывно преобразуют земную кору, осуществляя обмен веществом между твердыми оболочками Земли - корой и мантией.

11. 6. Распространение вулканической активности.

Распределение вулканов по поверхности земного шара лучше всего объясняется теорией тектоники плит, согласно которой поверхность Земли состоит из мозаики подвижных литосферных плит. При их встречном движении происходит столкновение, и одна из плит погружается (пододвигается) под другую в т.н. зоне субдукции, к которой приурочены эпицентры землетрясений. Если плиты раздвигаются, между ними образуется рифтовая зона. Проявления вулканизма связаны с этими двумя ситуациями.

Вулканы зоны субдукции располагаются по границе подвигающихся плит. Известно, что океанские плиты, образующие дно Тихого океана, погружаются под материки и островные дуги. Области субдукции отмечены в рельефе дна океанов глубоководными желобами, параллельными берегу. Полагают, что в зонах погружения плит на глубинах 100-150 км формируется магма, при поднятии которой к поверхности происходит извержение вулканов. Поскольку угол погружения плиты часто близок к 45°, вулканы располагаются между сушей и глубоководным желобом примерно на расстоянии 100-150 км от оси последнего и в плане образуют вулканическую дугу, повторяющую очертания желоба и береговой линии. Иногда говорят об «огненном кольце» вулканов вокруг Тихого океана. Однако это кольцо прерывисто (как, например, в районе центральной и южной Калифорнии), т.к. субдукция происходит не повсеместно.

Вулканы рифтовых зон существуют в осевой части Срединно-Атлантического хребта и вдоль Восточно-Африканской системы разломов. Есть вулканы, связанные с «горячими точками», располагающимися внутри плит в местах подъема к поверхности мантийных струй (богатой газами раскаленной магмы), например, вулканы Гавайских о-вов. Как полагают, цепь этих островов, вытянутая в западном направлении, образовалась в процессе дрейфа на запад Тихоокеанской плиты при движении над «горячей точкой».

Сейчас эта «горячая точка» расположена под действующими вулканами о. Гавайи. По направлению к западу от этого острова возраст вулканов постепенно увеличивается.

Тектоника плит определяет не только местоположение вулканов, но и тип вулканической деятельности. Гавайский тип извержений преобладает в районах «горячих точек» (вулкан Фурнез на о. Реюньон) и в рифтовых зонах. Плинианский, пелейский и вулканский типы характерны для зон субдукции. Известны и исключения, например, стромболианский тип наблюдается в различных геодинамических условиях.

11. 7. Вулканическая активность: повторяемость и пространственные закономерности.

Ежегодно извергается приблизительно 60 вулканов, причем и в предшествовавший год происходило извержение примерно трети из них. Имеются сведения о 627 вулканах, извергавшихся за последние 10 тыс. лет, и о 530 - в историческое время, причем 80% из них приурочены к зонам субдукции. Наибольшая вулканическая активность наблюдается в Камчатском и Центрально-Американском регионах, более спокойны зоны Каскадного хребта, Южных Сандвичевых островов и южного Чили.

На верхней панели рис. 11-7 приведена последовательность циклов вулканизма и экскурсов геомагнитного поля. Рис. 11-7 показывает, что экскурсы предшествуют циклам вулканизма примерно на 20 – 30 тыс. лет. Геомагнитное поле, как это следует из модели горячей Земли, инерционностью не обладает. Все явления геомагнетизма происходят (по модели) на границе внутреннего ядра. Именно здесь возникает избыточное давление,

которое передается на границу ядро-мантия и, релаксируя в литосфере, вызывает её упруго-пластическое течение.

Оценим характерное время вязкоупругой релаксации вещества мантии на воздействие геодинамического импульса вызванного кратковременным циклом расширения Земли: $t = \mu/G$, где μ – «вязкость» среды, а G – модуль упругости. По различным оценкам, μ варьирует в диапазоне $10^{21} – 10^{22}$ Па с, модуль упругости изменяется в интервале: $G \approx 10^{9} – 10^{10}$ Па. Отсюда характерное время: $t \approx 10^{12}$ с = 30 000 лет, что неплохо совпадает с характерной задержкой начала усиления вулканизма после экскурса (рис. 11-7), или, как следует из модели горячей Земли (главы 18-22), - импульса её расширения и последующего сжатия.

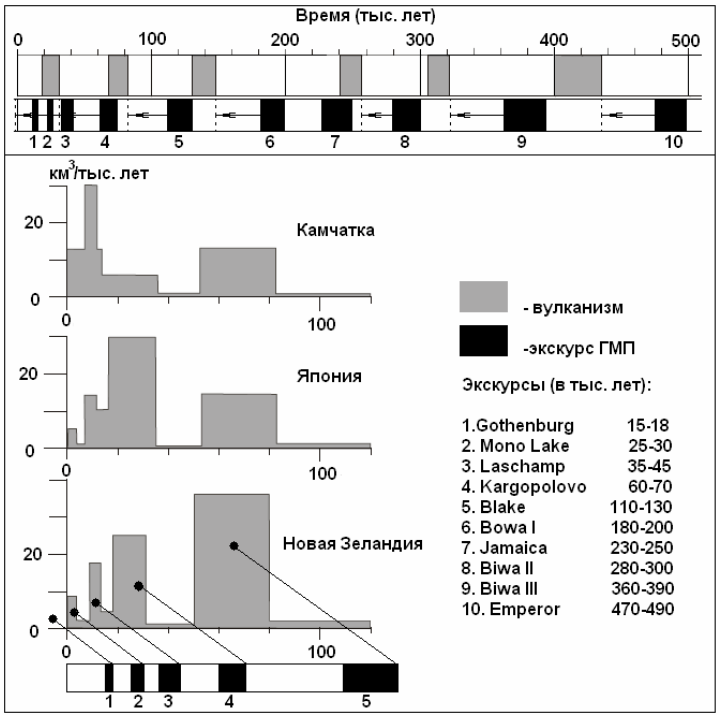


Рис. 11-7. Экскурсы ГМП предшествуют кратковременным периодам усиления вулканизма.

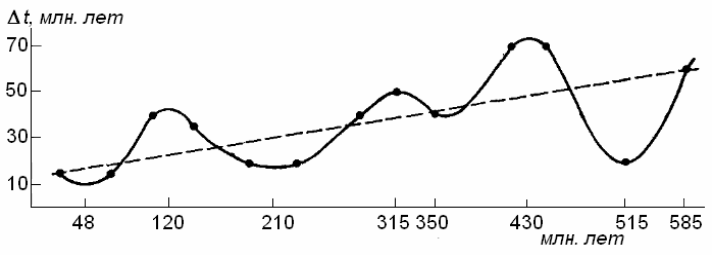


Рис. 11-8. Запаздывание начала тектонических фаз Δt относительно геомагнитных (Палеомагнитология, 1982)

Сравним полученный нами результат с аналогичной зависимостью запаздывания начала тектонических фаз Δt относительно геомагнитных (Палеомагнитология, 1982). Будем считать, что начала тектонических фаз, - совпадают с вулканизмом. Величина $\Delta t = t$, в нашем случае и равна $\approx$ 30 млн. лет, что на три порядка больше. Так как величина G измениться за время эволюции не должна меняться настолько, то, выходит, вязкость μ

должна быть на три порядка больше, что тоже маловероятно. По-видимому, наша оценка более правдоподобна.

Следуя этой логике, в настоящее время прошло примерно 30 тыс. лет после достаточно интенсивного экскурса Моно-Лайк. Следовательно, в наше время должно начаться усиление тектонической активности планеты. В явном виде этого пока не наблюдается, однако, если обратиться к данным института Вулканологии и Сейсмологии на Камчатке по вариации интенсивности вулканизма в течение последних 12 тыс. лет, то, можно считать, что такая тенденция действительно наблюдается (рис. 11-9).

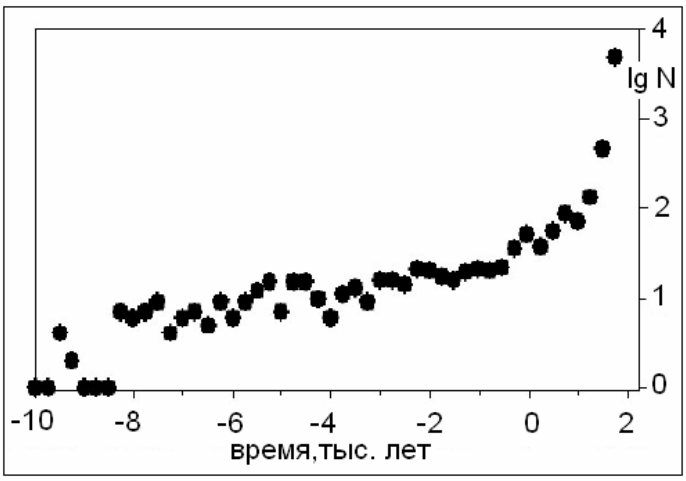


Рис. 11-9. Увеличение количества действующих вулканов за 12 тыс. лет. 2 – наше время.

11. 8. Магматизм Земли.

Механизм зарождения магм (Попов. 1995). Судя по распространению упругих волн и другим физическим характеристикам, современная кора и мантия Земли находятся в твердом состоянии. Жидкие магматические расплавы возникают сейчас и возникали в не очень далеком геологическом прошлом лишь эпизодически и на локальных участках. Известные на Земле интрузивные и вулканические породы связаны с источниками, которые расположены в интервале глубин от 15 до 250 км. С самыми глубинными мантийными источниками (150-250 км) сопряжены алмазоносные кимберлиты.

Возможно, перидотиты верхней мантии испытывают плавление и глубже, но возникающие при этом расплавы - не достигают доступных для наблюдения глубин. Основные породы - базальты и габбро - также зарождаются в верхней мантии. Под континентами источники этих пород находятся на глубине 50-150 км, а под океанами - возможно, и выше.

Материал континентальной земной коры сам неоднократно испытывал плавление с образованием разнообразных вторичных магм, главным образом кислых. Наименее глубинные коровые магматические очаги находятся на глубине около 15 км; с ними связаны многие гранитные плутоны.

По сравнению с радиусом Земли (6371 км) интервал глубин, где происходит магмаобразование (250-15 км), представляет тонкую приповерхностную пленку. Высказаны гипотезы о возможности существования значительно более глубоких источников магм вплоть до границы мантии и ядра. Однако реальность подобных предположений сомнительна, так как на столь больших глубинах температура плавления вещества мантии сильно превышает температуру природных магм и, кроме того, неясен механизм перемещения магматических масс на тысячи километров в обстановке огромного всестороннего сжатия.

Существуют три главных механизма зарождения магм в верхней мантии и земной коре (рис. 11-10) (Попов, 1995). Наиболее универсальным является нагревание выше температуры плавления глубинного вещества, т.е. выше температуры солидуса. Конкретные источники тепла известны лишь для коровых магматических очагов, которые возникают под тепловым воздействием мантийных магматических масс, нагретых до высокой температуры. Причины эпизодического и локального нагрева самого мантийного вещества во многом остаются неясными. Обычно нагрев связывают с выделением тепла при радиоактивном распаде U, Th, K; однако надо иметь в виду, что эти элементы сосредоточены в коре, а мантия бедна ими. Рассчитаны физические модели, связывающие нагрев глубинного вещества с выделением тепла от трения при пластических деформациях.

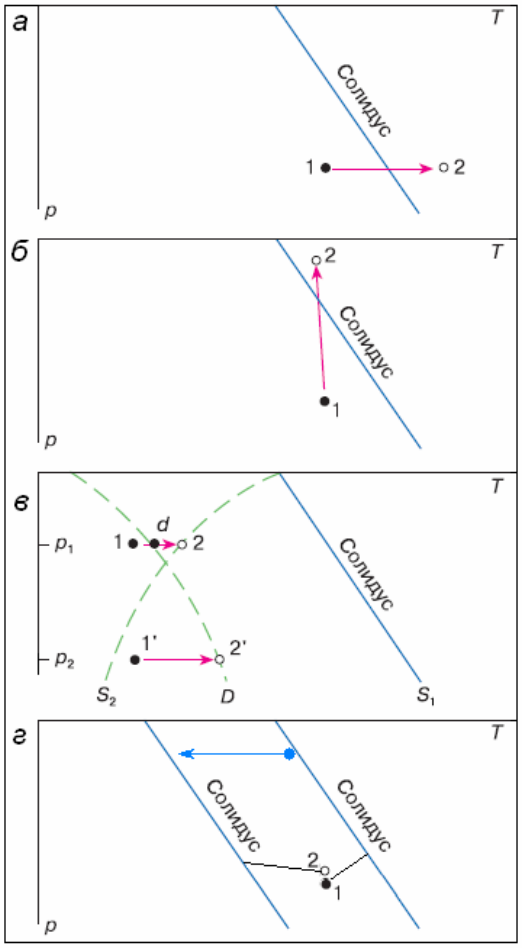


Рис. 11-10. Механизмы плавления, приводящие к образованию магм. Здесь T – температура, p – давление; солидус – линия, отделяющая условия существования твердого вещества (слева от линии).
(*а*) – Плавление путем нагревания при постоянном давлении: 1 – твердое вещество, 2 – частично расплавленное.
(*б*) – Плавление путем адиабатического подъема.
(*в*) – Плавление при дегидратации гидроксилосодержащего минерала: S_1 – солидус при отсутствии воды, S_2 – солидус насыщенного водой расплава, D – кривая дегидратации минерала. При нагревании на уровне p_1 в точке d происходит разложение минерала с выделением воды, которая растворяется в насыщенном водой расплаве в точке 2. Если нагревание осуществляется на уровне p_2, то гидротация происходит в точке 2', и при этой температуре образуется расплав, содержащий растворенную воду, но не насыщенный ею.

В обоих случаях наличие воды значительно понижает температуру плавления по сравнению с «сухим» солидусом S_1 (Попов, 1995).
(*г*) – Гипотетический случай перемещения линии солидуса в область понижения температуры. Температура и давление не изменяются, а вещество при этом плавится.

Другим возможным механизмом зарождения магм служит адиабатический (почти изотермический) подъем нагретого вещества, при котором на некоторой глубине достигается температура солидуса. Этот механизм реализуется при быстром (в геологическом масштабе времени) перемещении крупных масс нагретого и пластичного глубинного материала.

Третий механизм связан с дегидратацией гидроксилсодержащих минералов, имеющихся в горных породах. Распространенными минералами такого рода являются, например, слюды, которые при нагревании выделяют до 4 мас.% воды. Если в магматическом источнике имеется вода, то температура плавления силикатного вещества понижается на десятки и сотни градусов. Чем больше давление, тем больше воды может раствориться в силикатном расплаве и тем ниже температура, при которой расплав может оставаться в жидком состоянии. В отличие от "сухих" систем, не содержащих воды, насыщенные водой магматические расплавы характеризуются не положительным, а отрицательным наклоном линии солидуса в pT-координатах. Если в глубинном веществе имеются гидроксилсодержащие минералы, то при нагревании они разлагаются с выделением воды, которая растворяется в возникающем магматическом расплаве.

При любом способе плавления на начальной стадии процесса возникает очень мало магматической жидкости, и источник остается в эффективно твердом состоянии, представляя пористую среду, состоящую из межзернового расплава и твердого каркаса, еще не подвергшегося плавлению. В ходе дальнейшего плавления количество жидкой фазы возрастает, и наступает такой момент, когда источник превращается в эффективно жидкую магматическую суспензию - расплав с заключенными в нем тугоплавкими кристаллами. При этом механическая устойчивость магматического очага резко падает, и суспензия выжимается в область низкого давления. Переход от твердого состояния к жидкому происходит при условии, что доля расплава достигает примерно 40 объемных %.

В природных магматических очагах доля жидкой фазы обычно не превышает 20-30%, а во многих случаях составляет всего несколько процентов и менее. Другими словами, магмообразование почти всегда сводится не к полному, а лишь к частичному плавлению мантийного или корового вещества. Заметим, что даже при минимальных степенях плавления система пор, заполненных расплавом, оказывается связанной тончайшими межзерновыми каналами, и магматическая жидкость может быть выжата из твердого каркаса.

Физические свойства магм и механизм их подъема. Почти все магмы и возникающие при их затвердевании магматические горные породы имеют силикатный состав. Значительно реже и в несоизмеримо меньшем количестве образуются не силикатные магмы, например карбонатные. Последние являются продуктами частичного плавления карбонатизированных перидотитов верхней мантии, устойчивых на глубине более 80 км. Известны интрузивные карбонатиты магматического происхождения, состоящие из $CaCO3$, $CaMg(CO_3)_2$, $MgCO_3$, $(Na,K)_2CO_3$, а в Танзании один из современных вулканов извергает лавы, близкие по составу к соде. Однако эти породы являются геологической экзотикой. Почти все вулканические и интрузивные породы состоят из силикатов - кислородсодержащих соединений кремния.

Температура силикатных магм в момент зарождения варьирует от 1800-1600 до 600-500 °C. Максимальные оценки относятся к наиболее глубинным ультраосновным расплавам, возникающим при плавлении перидотитов верхней мантии, а минимальные - к наименее глубинным кислым магмам, образованным в земной коре и обогащенным водой или фтором, которые значительно понижают температуру плавления.

Плотность жидких магм равна 2,2-3,0 г/см^3 и примерно на 10% ниже, чем плотность твердых пород соответствующего состава. Максимальная плотность характерна для глубинных мантийных магм, которые оказываются более плотными (тяжелыми), чем вещество континентальной земной коры (2,7-2,8 г/см^3).

Важное значение имеет вязкость магм - свойство, определяющее их подвижность (текучесть). Вязкость магматических расплавов, которая зависит от состава и температуры, варьирует от 1 до 10^8 Па.с. Наименьшей вязкостью (наибольшей подвижностью) обладают высокотемпературные магмы ультраосновного и основного составов, а наибольшая вязкость характерна для кислых магм, возникающих при относительно низкой температуре. Для сравнения заметим, что вязкость воды при комнатной температуре равна 10^{-3} Па.с, а эффективная вязкость твердого вещества коры и верхней мантии достигает 10^{18}-10^{23} Па.с.

Поскольку расплав легче, чем твердые породы (разность плотностей составляет около 0,5 г/см3), а его вязкость на 10-20 порядков ниже, магматические очаги механически неустойчивы, и расплав, возникающий при частичном плавлении, выжимается из связной системы межзерновых пор, наподобие того, как выжимается вода из рыхлого осадка на дне моря или озера. (В том и другом случае жидкость выталкивается из пор под действием силы тяжести.) В результате этого расплав накапливается в верхней части области зарождения магм, а твердый остаток - в нижней. Как показывают расчеты, магматический расплав просачивается вверх со скоростью, измеряемой несколькими сантиметрами или метрами в год.

Скопления относительно легкой жидкости обладают некоторым избыточным давлением и начинают пробивать путь наверх самостоятельно, раздвигая стенки ранее существовавших трещин и заполняя плоские и линзообразные трещинные каналы. При этом скорость подъема не очень вязких магм может достигать километров и даже десятков километров в час.

Глубина, до которой может подняться расплав, определяется общим его количеством, соотношением плотностей расплава и вмещающих твердых пород, а также соотношением между температурой и содержанием растворенной в расплаве воды.

Чем глубже зарождаются магмы, тем обычно меньше степень частичного плавления и меньше общая масса возникшего расплава. По-видимому, многие малые выплавки не достигают приповерхностной зоны и затвердевают на относительно небольшом расстоянии от места зарождения.

Магмы, возникшие выше поверхности Мохоровичича, легче, чем материал земной коры, и такие расплавы сохраняют шанс достичь дневной поверхности. Плотность расплавов мантийного происхождения может быть выше, чем плотность твердых пород, образующих земную кору, и такие расплавы могут не дойти до поверхности. Расплав остановится, когда положительное избыточное давление, накопленное в столбе расплава ниже поверхности Мохоровичича, будет компенсировано отрицательным избыточным давлением выше этого уровня. Очевидно, что при прочих равных условиях магмы, связанные с более глубинными мантийными источниками, могут подняться выше, чем расплавы, образованные непосредственно под нижней кромкой земной коры.

Поскольку температура плавления силикатного вещества, не содержащего воды, уменьшается по мере снятия давления, относительно легкий "сухой" расплав может достичь дневной поверхности. Если же расплав содержит растворенную воду, то предельная высота подъема определяется линией солидуса для насыщенного водой расплава, и водосодержащие магмы, не сильно перегретые относительно солидуса, затвердевают в виде интрузивных тел, не доходя до дневной поверхности. Соотношения, показанные на рисунке 3, находят прямое геологическое подтверждение: среди основных пород, образованных при затвердевании практически безводных высокотемпературных (~1200 °C) расплавов, преобладают вулканические породы - базальты, а среди кислых

пород, возникших при затвердевании водосодержащих магм, нагретых не более чем на 800-900 °С, наиболее распространены интрузивные породы - граниты.

Затвердевание магматических расплавов. Высокая скорость подъема является причиной того, что расплавы начинают затвердевать, лишь достигнув дневной поверхности или заполнив какую-либо промежуточную камеру на глубине. Форма и размер возникающих при этом кристаллов определяется степенью переохлаждения расплава относительно равновесной температуры кристаллизации, что, в свою очередь, зависит от темпа охлаждения. При быстром остывании магматических тел достигается высокая степень переохлаждения, и в этих условиях вместо хорошо ограненных кристаллов появляются скелетные формы причудливых очертаний. О том, что такое скелетный кристалл, можно судить по форме снежинок, которые представляют скелетные кристаллики льда.

При кристаллизации магматических расплавов сначала возникают точечные зародыши кристаллов, которые затем увеличиваются в размерах. Линейные размеры кристаллов определяются соотношением скоростей образования зародышей (количеством зародышей в единице объема в единицу времени) и их последующего роста (приращение длины или ширины кристалла в единицу времени). Обе скорости являются функциями переохлаждения расплава (DT) и достигают экстремума при определенных величинах DT. При малом переохлаждении скорость возникновения зародышей мала, а скорость их роста велика; в результате возникают крупнозернистые кристаллические агрегаты, состоящие из относительно небольшого числа крупных кристаллов. При значительном переохлаждении скорость образования зародышей достигает максимума, а скорость роста каждого зародыша падает; как следствие этого формируются мелкозернистые магматические породы. Максимальное переохлаждение достигается при затвердевании тонких лавовых потоков, а минимальное - при кристаллизации крупных интрузивных тел. Отсюда и разница в структуре вулканических и интрузивных пород.

11. 9. Модели вулканического извержения.

Физика вулканизма остается практически неизвестной. Как образуются вулканы, как они существуют, чем оканчивается их существование, все эти вопросы не имеют однозначных ответов. Ситуация с вулканами примерно такая же, что и с землетрясениями. Очевидно одно, что это «родственные» явления. Они зачастую происходят в одних и тех же регионах. Для того чтобы убедиться в этом, стоит сравнить карты расположения землетрясений и вулканов. По-видимому, справедливо утверждение, что оба явления – это способы сбросить Землей излишнюю тектоническую нагрузку. Если процесс сброса происходит в упругой среде – следует землетрясение, если – вязкой, - вулкан.

В отличие от землетрясения, приносящего значительно больше проблем человеку, чем вулкан, и моделей его образования значительно меньше, меньше и публикаций. Рассмотрим две модели извержения из этого небольшого числа, выполненных сравнительно недавно.

В первой из них автором (Мельник, 2002) была создана новая гидромеханическая теория динамики вулканических извержений (рис. 11-11). Магма истекает из очага извержения, расположенного в земной коре, в котором под давлением находится магма, содержащая расплав, кристаллы и растворенный газ. Течение в канале вулкана, связывающем очаг с земной поверхностью, в общем случае можно разбить на три области (рис. 11-11). В нижней части канала, где давление p больше, чем давление насыщения растворенного газа $p_0 = (c_o/k_o)^2$ (c_o - начальное содержание растворенного газа, k_o-коэффициент растворимости) течение гомогенно и имеет место обычная модель вязкой жидкости. В средней области, где $p<p_o$ имеет место течение пузырьковой жидкости. По мере подъема магмы в следствие ее дегазации и декомпрессии, происходит рост пузырьков. За счет вязкого сопротивления их расширению давление в растущем пузырьке падает медленнее, чем давление в жидкости, что приводит к большим избыточным

давлениям в растущем пузырьке $\Delta p = p_g - p_m$ (p_g - давление в пузырьке, p_m - давление в магме). По-видимому, есть основание считать, что когда Δp превышает критическое значение, происходит разрушение (фрагментация) пузырьковой среды.

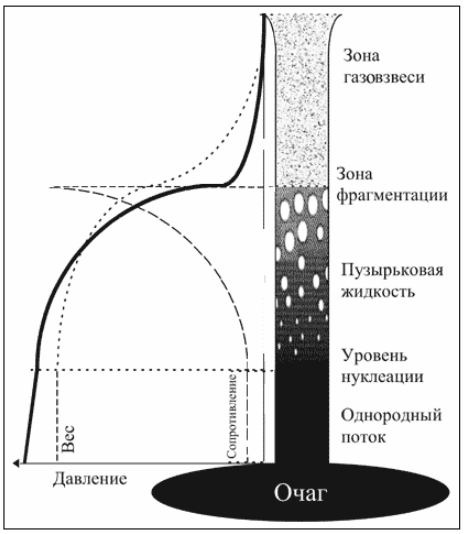


Рис 11-11. Схема течения магмы в канале вулкана в режиме эксплозивного извержения.

Конкурирующим процессом, приводящим к падению избыточного давления, является слияние пузырьков с образованием подвижной пористой среды и оттоком газа через систему взаимосвязанных пузырьков. Ранее такая постановка при моделировании не рассматривалась.

После фрагментации магмы в третьей верхней области происходит течение газовзвеси с мелкими и более крупными частицами. Процессы, происходящие в зоне фрагментации наиболее сложны и во многом определяют характер извержения. Зона фрагментации разделяет область тяжелой высоковязкой магмы и легкой газовзвеси, сопротивление движению которой, определяющееся турбулентной вязкостью газа, пренебрежимо мало. Поэтому суммарное сопротивление канала вулкана и средний вес смеси определяется положением уровня фрагментации в канале.

В другой модели (Ogden, et al. 2008) рассматривается модель извержения в которой колонны взрывного извержения вулкана подразделяются на область газового удара взрывом газа и конвектирующего плюма. Если давление в жерле вулкана выше атмосферного, то в области ударной волны наблюдается избыточное давление, и она развивается в виде набора стоячих ударных волн. Используя пседогауссовское приближение для смеси тефры и газа, можно численно смоделировать влияние ударных волн на область газового удара. Это моделирование рассматривает свободноструйную декомпрессию жерла в неизменном состоянии с высоким давлением при условии отсутствия гравитации. Из результатов (Ogden, et al. 2008) следует, что интенсивность и положение стоячих ударных волн определяется давлением в жерле и его радиусом. Эти факторы контролируют размеры области газового удара и свойство вертикального теплового потока в конвективный плюм (рис. 11-12). При нарастании избыточного давления область газового удара расширяется, образуя внешнюю оболочку, в которой эруптивный материал двигается со скоростью, большей, чем в центре колонны. Радиус этой оболочки линейно зависит от радиуса жерла и от квадратного корня избыточного давления. Структура оболочки приводит к возникновению кольцевого профиля вертикального теплового потока в основании конвективного плюма, что полностью расходится с общепринятым Гауссиановским или цилиндрическим профилем. Нами

показано, что магнитуда расширения больше, чем предсказывалась произведенным ранее анализом, и поэтому после расширения средние вертикальные скорости намного ниже. Эти новые взаимосвязи между давлением в жерле и расширением плюма в сочетании с наблюдениями за диаметром плюма могут быть использованы, чтобы наложить ограничения на давление в жерле.

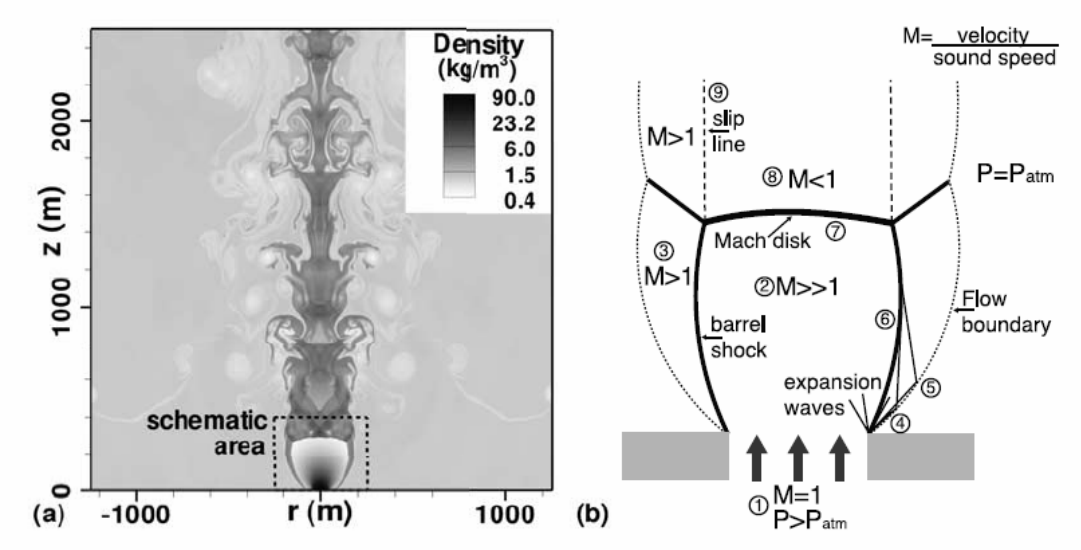


Рис. 11-12. *a*) Общий вид сжатого давлением вулканического потока; *b*) схема, показывающая, как поток жидкости выходит из форсунки со звуковой скоростью и давлением, большим, чем атмосферное (1), поток испытывает расширение Прандтля-Майера и быстро ускоряется, достигая больших чисел Маха: M >> 1 (2, 3), при этом его плотность и давление – уменьшаются. В районе форсунки формируются волны сжатия, которые отражаются от стенки камеры (5). Волны фокусируются и формируют ударную волну в области диска Маха (7) перпендикулярно потоку. Волны с большой скоростью пересекают диск Маха и затем резко замедляются, что приводит к возрастанию плотности и давления в потоке. Поток делится на медленный и быстрый, - с турбулентным переносом вещества вдоль стенки камеры (9). Параметры потока зависят от размера форсунки и режима адиабатического расширения.

11.10. Вулканы и климат.

Оценим влияние одного из самых сильных вулканических извержений, произошедших на Земле на климат. Извержение вулкана Тоба (VEI = 8) произошло примерно 70 тыс. лет тому назад. При этом в стратосферу было выброшено, по разным оценкам, от 500 до 5000 млн. тонн аэрозолей (рис. 11-13). Концентрация пыли, вмороженной в лед, достигала в этот период времени 1 p.p.m. После этого извержения наличие пыли в стратосфере отмечалось практически непрерывно в течение 60 тыс. лет, возрастая после очередного сильного извержения и уменьшаясь в промежутках между ними.

Роль стратосферного аэрозоля вулканического происхождения (вулканической пыли) в изменении климата, в частности – похолодании, - хорошо изучена; это явление получило название «вулканическая зима». Величина понижения температуры поверхности Земли после сильных эксплозивных извержений современных вулканов оценена. Так, например, извержение вулкана Тамбора (Индонезия, 1815) самое сильное (VEI = 7) из произошедших за последние 200 – 300 лет, привело к тому, что в течение 2-3 лет концентрация пыли во льду Гренландии достигала 94 p.p.b. (1 p.p.b. $= 10^{-9}$). Однако, извержения, которые произошли на памяти человека, на порядки уступают извержениям супервулканов.

Оценим концентрацию вулканических аэрозолей в стратосфере, учитывая, что они занимают не весь объем атмосферы, а сосредоточены в слое толщиной, порядка, 1 км на высоте 15 - 20 км. Для начала сделаем общую оценку концентрации пыли. Масса атмосферы, как известно, $\approx 5 \cdot 10^{15}$ тонн, масса СА может достигать, как это было при извержении Тоба, значения $5 \cdot 10^{9}$ тонн, объемная концентрация аэрозолей 10^{-6} = 1 p.p.m. Эта величина, по данным рис. 11-13, соответствует концентрации пыли в слое льда, образовавшегося в период времени извержения Тоба. Казалось бы, мы получили соответствие величин концентраций, однако, учитывая то, что аэрозоль находится в сравнительно тонком слое, объемная концентрация аэрозолей в этом слое должна быть значительно выше.

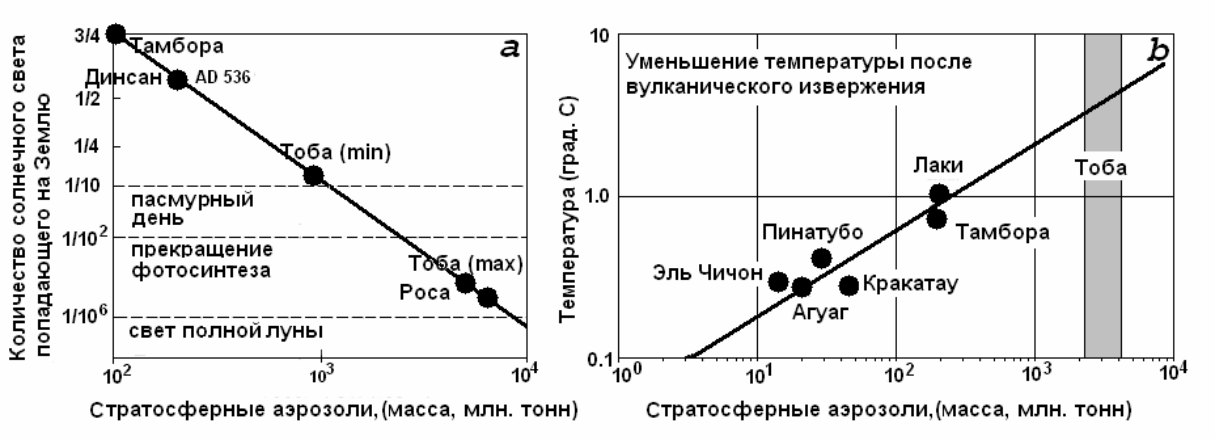


Рис. 11-13. a - экранирование солнечного света СА эксплозивных вулканических извержений. Нижняя шкала: масса аэрозоля, выброшенного в стратосферу, при извержении. Шкала слева: количество солнечного света попадающего на Землю.
b- понижение температуры поверхности Земли в зависимости от массы аэрозоля.

Поверхностная плотность пыли, от которой зависит пропускание солнечного излучения к поверхности Земли, не зависит от того, расположены пылинки в тонком слое или по всему объему атмосферы. Если площадь поверхности Земли равна $5 \cdot 10^{18}$см^2, то поверхностная плотность пыли в случае извержения вулкана Тоба составляет около 10^{-3} г·см$^{-2}$. Попытаемся оценить этот параметр по характеристикам льда. Отметим, что в кернах льда пыль распределена неравномерно. Характерное время нарастания концентрации пыли от извержения Тоба составляет 1 – 2 тыс. лет. Средняя скорость образования льда равна, примерно, 1,5 см в год, и толщина льда, образовавшегося в период накопления пыли от извержения вулкана Тоба, достигает, примерно, 20 м, что соответствует поверхностной плотности пыли во льду $\sim 10^{-3}$ г/см^2. Полагая, что пыль была сосредоточена в слое атмосферы толщиной 1 км, расположенным на высоте 20 км, и если масса пылинки равна 10^{-14} г, то концентрация пыли в этом слое достигала 10^{6} см$^{-3}$. Поскольку плотность воздуха на такой высоте составляет, примерно, 10^{-4} г/см^3, то получим реальную концентрацию пыли в таком слое, равную 100 p.p.m. Таким образом, концентрация пылевого аэрозоля в слое атмосферы может на два порядка превышать концентрацию, регистрируемую во льду и осадках. Поскольку поверхностная плотность пыли составляет 10^{-3} г/см^2, то при плотности вещества в конденсированном состоянии, равной, примерно, 1 г/см^3 толщина слоя этого вещества будет равна 10 мкм. При извержениях супервулканов, таких как Тоба, образуется большое количество мелкодисперсной минеральной вулканической пыли, способной существовать в стратосфере десятки тысяч лет. По оценкам, количество такой пыли достигало 0,8% в веществе извержения при общем количестве пыли, равном почти $2 \cdot 10^{10}$ тонн, то есть около $2 \cdot 10^{8}$ тонн.

11. 11. Вулканическая опасность.

Исследуя давно потухший вулкан Тоба на острове Суматра, геолог Майкл Рампино из Нью-Йоркского университета восстановил картину его катастрофического извержения 73 тысячи лет назад. По его расчетам, из чудовищного кратера вместе с тучами пыли и пепла было выброшено тогда до трех миллиардов тонн сернистого ангидрида. В результате губящие растительность сернистые дожди лились на землю в течение шести лет, — это показали образцы из глубинных слоев ледяного щита Гренландии. Если добавить к этому пылевые тучи, надолго сокрывшие солнце, — то получается нечто похожее на картину “ядерной зимы”. Рампино считает, что это “мега-извержение” и явилось причиной зафиксированного антропологами именно в ту эпоху демографического краха, когда, как считают, на всей Земле осталось не больше десяти тысяч наших первобытных предков.

В 1999 году английский геолог профессор Макгир подготовил для правительства Великобритании специальный доклад, в котором заявил, что, по его расчетам, вулкан Йеллоустон должен взорваться в 2074 году. Конечно, с ним согласны не все вулканологи. Некоторые полагают, что это может случиться значительно раньше.

Рис. 11-14. Оценка зоны поражения США при извержении супервулкана Йелоустон.

Приведем просчитанный сценарий, по которому будут развиваться события при извержении Йелоустона:

За несколько дней до взрыва земная кора «взбухает», то есть поднимется на несколько метров. При этом почва нагреется до 60-70°С. В атмосфере резко вырастет концентрация сероводорода и гелия. Все это послужит сигналом к началу массовой эвакуации населения. Взрыв будет сопровождаться мощнейшим землетрясением, которое будет ощущаться во всех точках планеты. Скальные куски подбросит на высоту до 100 км. Падая, они накроют собой гигантскую территорию – несколько тысяч квадратных километров. После взрыва кальдера начнет извергать лавовые потоки. Скорость потоков составит несколько сот километров в час. В первые же минуты после начала катастрофы будет уничтожено все живое радиусе более 700 км и почти все – в радиусе 1200 км . Причем погибать люди будут в основном не из-за того, что засыплет пеплом или зальет лавой, а из-за удушья и отравления сероводородом. Извержение будет продолжаться несколько суток. За это время улицы Сан-Франциско, Лос-Анджелеса и других городов

Соединенных Штатов Америки будут завалены полутораметровыми «сугробами» из вулканического шлака (эта субстанция есть не что иное, как перемолотая в пыль хорошо всем знакомая пемза). Все Западное побережье США превратится в одну огромную мертвую зону.

Обратимся к фактам последствий катастрофических извержений вулканов, имевших место на Земле:

После 1600 в результате извержений и связанных с ними селей и цунами погибло 168 тыс. человек, жертвами болезней и голода, возникших после извержений, стали 95 тыс. человек. Вследствие извержения вулкана Монтань-Пеле в 1902 погибло 30 тыс. человек. В результате схода селей с вулкана Руис в Колумбии в 1985 погибли 20 тыс. человек. Извержение вулкана Кракатау в 1883 привело к образованию цунами, унесшего жизни 36 тыс. человек.

Характер опасности зависит от действия разных факторов. Лавовые потоки разрушают здания, перекрывают дороги и сельскохозяйственные земли, которые на много столетий исключаются из хозяйственного использования, пока в результате процессов выветривания не сформируется новая почва. Темпы выветривания зависят от количества атмосферных осадков, температурного режима, условий стока и характера поверхности. Так, например, на более увлажненных склонах вулкана Этна в Италии земледелие на лавовых потоках возобновилось только через 300 лет после извержения.

Вследствие вулканических извержений на крышах зданий накапливаются мощные слои пепла, что грозит их обрушением. Попадание в легкие мельчайших частиц пепла приводит к падежу скота. Взвесь пепла в воздухе представляет опасность для автомобильного и воздушного транспорта. Часто на время пеплопадов закрывают аэропорты.

Пепловые потоки, представляющие собой раскаленную смесь взвешенного дисперсного материала и вулканических газов, перемещаются с большой скоростью. В результате от ожогов и удушья погибают люди, животные, растения и разрушаются дома. Древнеримские города Помпеи и Геркуланум попали в зону действия таких потоков и были засыпаны пеплом во время извержения вулкана Везувий.

Вулканические газы, выделяемые вулканами любого типа, поднимаются в атмосферу и обычно не причиняют вреда, однако частично они могут возвращаться на поверхность земли в виде кислотных дождей. Иногда рельеф местности способствует тому, что вулканические газы (сернистый газ, хлористый водород или углекислый газ) распространяются близ поверхности земли, уничтожая растительность или загрязняя воздух в концентрациях, превышающих предельные допустимые нормы. Вулканические газы могут наносить и косвенный вред. Так, содержащиеся в них соединения фтора захватываются пепловыми частицами, а при выпадении последних на земную поверхность заражают пастбища и водоемы, вызывая тяжелые заболевания скота. Таким же образом могут быть загрязнены открытые источники водоснабжения населения.

Рис. 11-15. Камчатские вулканы в окрестности г. Петропавловск-Камчатский: слева Корякский, справа – Авачинский.

На рис. 11-15 показаны два вулкана Корякский, считавшийся до декабря 2008 г. потухшим и Авачинский, взорвавшийся примерно 4 тыс. лет тому назад и вырастающий с того времени. Как показывает реконструкция по древнему конусу вулкана, он был, возможно, одной высоты (или даже выше) с Корякским. Корякский вулкан, считавшийся потухшим, ожил в декабре 2008 года. На боковом склоне, обращенным от города возникли несколько микрократеров (на январь 2009), из которых идет выброс пара с пеплом и незначительное излияние магмы. Разрушение Авачинского вулкана, произошедшее 4 тыс. лет тому назад, привело к перекрытию русла реки Авача, которая, до взрыва, впадала в Авачинский залив. После взрыва и разрушения вулканического конуса, река изменила русло и стала впадать в Авачинскую губу.

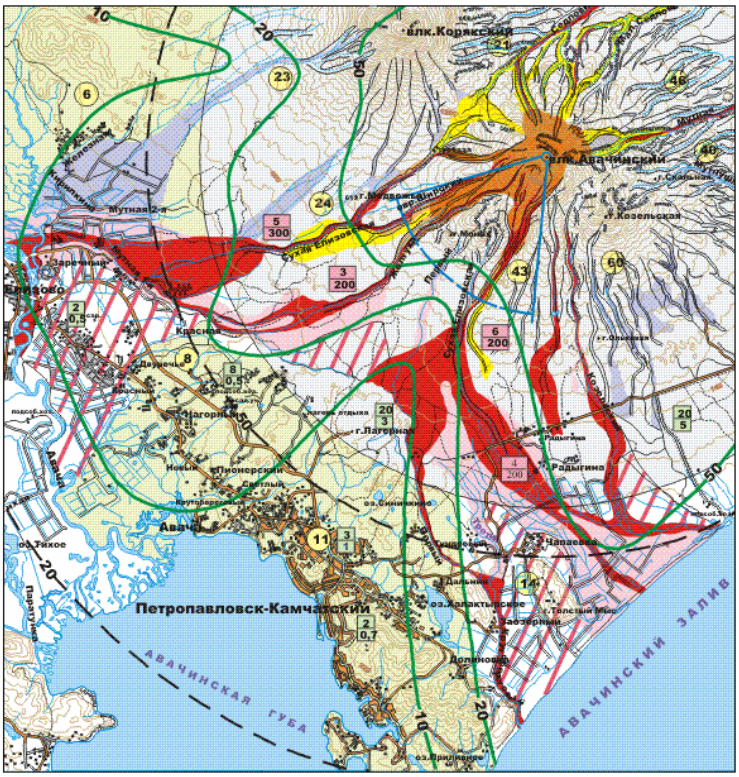


Рис. 11-16. Окрестности вулкана Авача. Коричневые и красные области – потоки лавы. Штрихованная область – поднятия, возникшие за счет выброса материала конуса вулкана.

Прогноз извержений. Для прогноза извержений составляются карты вулканической опасности с показом характера и ареалов распространения продуктов прошлых извержений (рис. 11-16), и ведется мониторинг предвестников извержений. К таким предвестникам относится частота слабых вулканических землетрясений; если обычно их количество не превышает 10 за одни сутки, то непосредственно перед извержением возрастает до нескольких сотен. Ведутся инструментальные наблюдения за самыми незначительными деформациями поверхности. Точность измерений вертикальных перемещений, фиксируемых, например, лазерными приборами, составляет ~0,25 мм, горизонтальных - 6 мм, что позволяет выявлять наклон поверхности всего в 1 мм на полкилометра. Данные об изменениях высоты, расстояния и наклонов используются для выявления центра вспучивания, предшествующего извержению, или прогибанию поверхности после него. Перед извержением повышаются температуры фумарол, иногда изменяется состав вулканических газов и интенсивность их выделения.

Предвестниковые явления, предшествовавшие большинству достаточно полно документированных извержений, сходны между собой. Однако с уверенностью предсказать, когда именно произойдет извержение, очень трудно.

Вулканологические обсерватории. Для предупреждения возможного извержения ведутся систематические инструментальные наблюдения в специальных обсерваториях. Самая старая вулканологическая обсерватория была основана в 1841-1845 на Везувии в Италии, затем с 1912 начала действовать обсерватория на вулкане Килауэа на о.Гавайи и примерно в то же время - несколько обсерваторий в Японии. Мониторинг вулканов проводится также в США (в т.ч. на вулкане Сент-Хеленс), Индонезии в обсерватории у вулкана Мерапи на о. Ява, в Исландии, России Институтом вулканологии РАН (Камчатка), Рабауле (Папуа - Новая Гвинея), на островах Гваделупа и Мартиника в Вест-Индии, начаты программы мониторинга в Коста-Рике и Колумбии.

11. 12. Вулканизм планет и их спутников Солнечной системы.

Вулканы известны не только на Земле. На снимках, сделанных с космических аппаратов, обнаружены огромные древние кратеры на Марсе (рис. 11-17) и множество действующих вулканов на Ио, спутнике Юпитера. Исследование вулканизма на телах Солнечной системы в последние годы привело к массе экзотических открытий и неожиданных находок. Примечательно, что самые захватывающие события и явления связаны с телами, находящимися во внешней части Солнечной системы, точнее - со спутниками планет-гигантов.

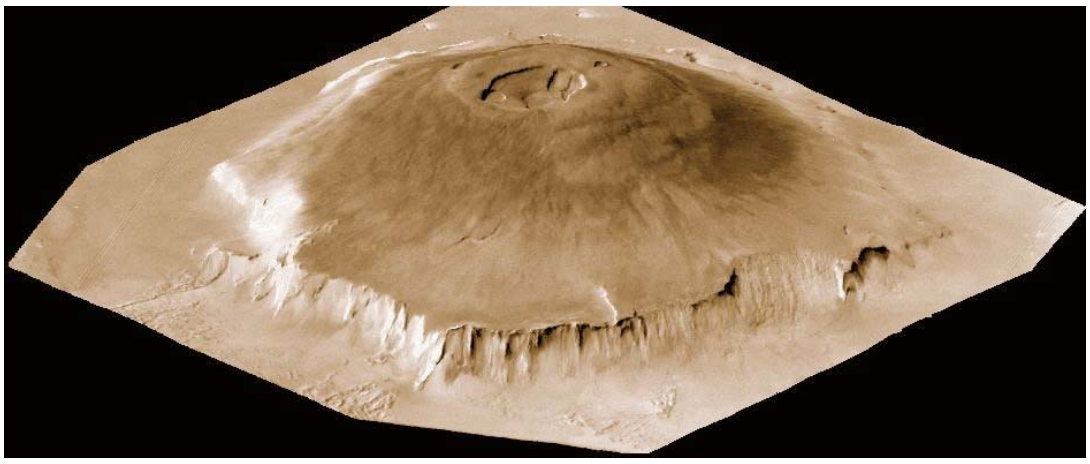


Рис. 11-17. Вулкан Олимп на Марсе.

Луна. Принято считать вулканическими чертами ландшафта на Луне извилистые каналы длиной до 340 км и шириной до 3 км. Н.А. Козырев был одним из немногих, которые считали, что спутники планет не мертвы, а живы «энергией времени» и поэтому должны проявлять вулканическую и тектоническую активность. И действительно, он сам наблюдал вулканическое извержение на Луне в кратере Альфонс.

Меркурий. Во время полета космического зонда «Маринер-10» в 1974-1975 годах были обнаружены лавовые потоки.

Венера. Она обладает очень плотной атмосферой и облачным слоем, не позволяющими наблюдать рельеф в оптическом диапазоне. Радиолокационные наблюдения показывают, что Венера отличается от земли. На ней нет современного активного вулканизма и не

наблюдаются элементы тектоники плит. Вулканы (всего выявлено 1100 вулканов) ещё существовали на Венере примерно 300 млн. лет назад.

Марс. На Марсе, так же как и на Венере, активный вулканизм прекратился. Обнаружено большое количество вулканов, среди них 22 огромных, с диаметром основания 50 км. Среди них самый молодой вулкан в провинции Тарсис и самый крупный в Солнечной системе, это пик Олимп (рис. 11-17).

Ио. Открытие вулканов на Ио было одной из важных вех в изучении Солнечной системы. Впервые они были замечены во время пролета космического зонда «Вояджер-1» в 1979 году и с тех пор были изучены с большой подробностью зондом «Галилей» в 1995 году.

Некоторые факторы, известные до полетов космических аппаратов в область Юпитера, могли бы натолкнуть на мысль о существовании активности недр Ио. Средняя плотность Ио (3,53 г/см^3) указывает на то, что спутник практически целиком состоит из горных пород в отличие от его ближайших соседей - Европы, Ганимеда и Каллисто. Телескопические наблюдения выявили распространяющийся по орбите Ио "газовый шлейф", в составе которого оказались сера, натрий, калий и кислород (как мы теперь знаем это - продукты выбросов из недр спутника). И, тем не менее, когда снимки, полученные с космического аппарата "Вояджер-1", продемонстрировали существование на Ио около десятка действующих вулканов, это стало событием в исследованиях Солнечной системы. Температура в центрах извержений (эруптивных центрах) достигала 700 К и выбросы со скоростью 1000 м/с поднимались на высоту до 300 км над поверхностью. Анализ всей серии изображений показал, что каждую секунду действующие эруптивные центры выбрасывают около 100000 тонн вещества. Этого количества достаточно для того, чтобы покрыть всю поверхность Ио слоем в несколько десятков метров за несколько миллионов лет. По-видимому, этим объясняется полное отсутствие ударных кратеров на изученной поверхности спутника: погребение ударных структур под слоем вулканического материала идет с большей скоростью, чем их появление в результате падения метеороидов или комет.

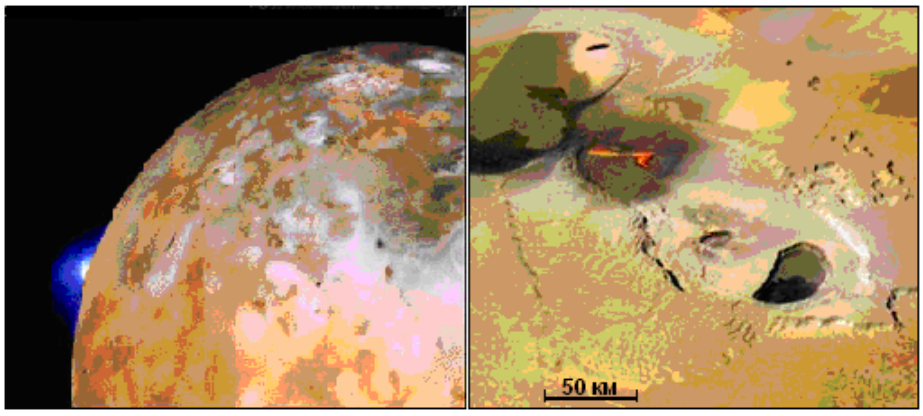


Рис. 11-18. Действующий супервулкан на спутнике Юпитера – Ио.

В настоящее время наиболее вероятным энергетическим источником вулканизма на Ио считают приливный разогрев недр спутника. Как и большинство спутников в Солнечной системе, Ио обращается вокруг Юпитера синхронно, т.е. период осевого вращения спутника равен периоду его обращения вокруг планеты. Ио находится на орбите близко расположенной к Юпитеру, в результате чего образуется приливной горб величиной в несколько километров. Небольшой эксцентриситет орбиты (0,004) приводит к явлениям, аналогичным либрациям Луны в процессе ее вращения вокруг Земли. Одновременно, под влиянием соседних Европы и Ганимеда возникают возмущения

эксцентриситета орбиты, что вызывает периодические изменения амплитуды приливных деформаций в коре Ио. Такая постоянная пульсация предположительно тонкой коры (толщиной не более 20 - 30 км) обеспечивает энерговыделение, достаточное для расплава недр спутника, что и выражается в интенсивной вулканической активности. Оценки, сделанные на основе измерений теплового потока, исходящего из "горячих" областей Ио, показывают, что приливной механизм способен генерировать до 10^8 мегаватт энергии, что более, чем в 10 раз превышает суммарную величину энергии, потребляемой всем человечеством на Земле.

Другие спутники. Модель приливного разогрева недр в некоторой степени применима и к Европе, место которой в системе Юпитера также предполагает существование пульсирующих деформаций этого спутника. Средняя плотность Европы несколько меньше, чем средняя плотность Луны и составляет 2,97 г/см^3. Эта величина связана с тем, что спутник примерно на 20% по массе состоит из водяного льда, образующего мощную (до 100 км) кору и частично расплавленную (водно-ледяную) мантию, и на 80% из силикатных пород, составляющих разогретое ядро. На поверхности Европы нет эруптивных центров и следов недавних выбросов. В то же время, практически нет и ударных кратеров - обнаружено всего лишь три образования размером больше 5 км, имеющих определенно экзогенное происхождение. На соседних Каллисто и Ганимеде плотность ударных кратеров во много раз выше и в отдельных местах приближается к плотности кратеров на Луне. Следовательно, процессы погребения ударных структур на Европе проходят довольно быстро, хотя и не столь бурно, как на Ио.

Свидетельством значительной активности недр служит, в частности, глобальная сеть тектонических разломов, покрывающая всю ледяную поверхность Европы. Трещины, имеющие ширину от 20 до 200 км, простираются на тысячи километров. Перепады высот на поверхности в среднем не превышают 100 м. Подобное отсутствие выраженных форм рельефа (поверхность Европы выглядит как покрытый льдом водоем), по-видимому, служит указанием на существование подповерхностного глобального океана жидкой воды. Его предполагаемая глубина может достигать 50 км, что делает Европу единственным, исключая Землю, телом Солнечной системы, где вода в жидком состоянии встречается в таком огромном объеме.

Другим доказательством движения вещества из недр спутника служит наличие в поверхностном слое примеси горных пород, относящихся, как было указано выше, к составу ядра. Наличие на поверхности вещества из ядра спутника служит общей характеристикой мощности внутренних процессов на Европе, которые способны обеспечить прорыв силикатного материала из глубины через 50-километровый слой водной мантии и 100-километровый слой ледяной коры.

Более загадочным примером может служить вулканическая активность спутника Нептуна - Тритона. Для обозначения этих процессов пришлось ввести специальный экзотический термин - криовулканизм, т.е. вулканизм при низких температурах. Внешние проявления криовулканизма потрясают воображение: из поверхности, покрытой замерзшим азотом и имеющей температуру около 38 К, выбивается гейзер высотой около 8 км при толщине столба выброса от 20 м до 2 км. На снимках, сделанных космическим аппаратом "Вояджер-2" в 1989 г., были зафиксированы два действующих извержения. Выбросы развеивались ветром с востока на запад на значительное расстояние (более 100 км) и, осаждаясь на поверхность, оставляли следы в виде протяженных темных полос-шлейфов. По таким шлейфам в южной полярной области спутника было отождествлено еще около 50 ранее действовавших извержений.

Тритон имеет диаметр около 2700 км и его средняя плотность составляет 2,0 г/см^3. По массе спутник состоит на 70% из силикатов и на 30% из льдов, в состав которых входят N_2, CO и CH_4. Для объяснения криовулканизма, наблюдаемого на Тритоне, предложено несколько механизмов, включая и описанный выше приливной разогрев.

Предполагают также, что криовулканические процессы имеют приповерхностный источник энергии, когда при многослойной структуре верхних слоев льда в одном из слоев происходит аккумуляция слабого здесь солнечного тепла. Постепенно накапливаясь, внутреннее давление достигает уровня, достаточного для гигантского выброса. Какова природа криовулканизма в действительности, еще предстоит решить.

Сайты:
http://www.volcano.si.edu/gvp/
http://www.iavcei.org/
http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/
http://www.hotspot.higp.hawaii.edu/
http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/

Литература
Мельник О.Э. Гидродинамика вулканических извержений сильновязких газонасыщенных магм. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва, МГУ. 2002
Палеомагнитология, под ред. А.Н. Храмова Л.: Недра. 1982. 312 с.
Попов В.С. Магматизм Земли. Соросовский образовательный журнал. 1995. № 1. С. 74-81.
Ротери Д. Вулканы. М.: ФАИР-ПРЕСС. 2004. 377 с.
Фролова Т.И. Вулканизм и его роль в эволюции Земли. Соросовский Образовательный Журнал. 1996. N2. С.74-81.

Ogden D.E., et al. Numerical simulations of volcanic jets: Importance of vent overpressure. J. Geophys. Res. 2008. V. 113, doi: 10.1029/2007/JB005133.

Глава 12. Геомагнетизм.

В главе 12, посвященной геомагнетизму, обсуждаются такие вопросы, как магнитные величины и единицы, магнитное поле Земли и элементы геомагнетизма. Разложение поля по сферическим гармоническим коэффициентам, пространственно энергетический спектр. Приборы для магнитных измерений. Магнитные аномалии, джерки, инверсии, фокусы векового хода и западный дрейф. Дрейф магнитных полюсов. Местоположение и размер источника генерации геомагнитного поля. Магнитное поле планет и спутников.

12. 1. Магнитные величины и их единицы.

Магнитное поле характеризуется двумя векторными величинами: напряженностью H и магнитной индукцией B, связанными уравнением, которое в международной системе единиц СИ записывается как

$$B = \mu_o(H + J),$$

где μ_o -магнитная проницаемость вакуума; J - магнитный момент единицы объема, называемый намагниченностью среды ($J = m/V$).

Уравнения связи между векторами записываются в виде линейных соотношений

$$J = \chi H; B = \mu_o \mu H,$$

где χ - магнитная восприимчивость вещества; μ - его магнитная проницаемость (относительная), причем, $\mu = 1 + \chi$.

Источниками магнитного поля являются замкнутые электрические токи и намагниченные тела. Последние по своему действию эквивалентны совокупности элементарных магнитов или элементарных контуров тока, в обоих случаях называемых диполями.

Связь между силой тока i в замкнутом контуре и возникающим при этом полем напряженностью H дается законом Био-Савара, который для кругового контура радиусом r выражается соотношением

$$H = i/2r$$

где H — напряженность поля в центре кругового контура.

Произведение силы тока на площадь, охватываемую контуром, представляет собой модуль вектора магнитного момента m контура тока, причем векторы m и H направлены по нормали к площади контура. Для кругового контура

$$m = i\pi r^2.$$

Определенные таким образом соотношения между магнитными величинами и электрическим током дают размерности магнитных величин в СИ и соотношения между единицами СИ и СГС (табл. 12.1).

Таблица 12.1. Соотношения между единицами магнитных величин в системах СИ и СГС

Магнитные величины		Единицы СГС	Единицы СИ	Переводные СГС/СИ	множители СИ/СГС
Напряженность магнитного поля	H	Эрстед	А/м	$10^3/4\pi$	$4\pi/10^3$
Магнитный момент	M	-	А·м^2	10^{-3}	10^3
Магнитный поток	Φ	Максвелл	Вебер	10^{-8}	10^8
Индукция	B	Гаусс	Тесла	10^{-4}	10^4
Восприимчивость	χ	-	-	4π	$1/4\pi$
Намагниченность	J	-	А/м	10^3	10^{-3}

Применение единиц СИ для магнитных величин, используемых, в частности, в палеомагнитологии, встречает определенные трудности, что связано с особенностями системы СИ, очень удобной для инженерных расчетов, но, строго говоря, некорректной в отношении электромагнитных единиц, особенно, единиц намагниченности. Дело в том, что есть еще один способ определения магнитного момента токового контура, приводящий к единице намагниченности, выраженной через магнитный поток (вебер на квадратный метр, вместо ампер на метр), тогда как в системе СГС оба способа дают единицы одной размерности. Единица вебер на квадратный метр, называемая тесла, есть в то же время единица магнитной индукции B, а ампер на метр - единица напряженности магнитного поля H. Действующие стандарты пытаются обойти эту трудность, относя первую единицу (тесла) и к величине магнитной поляризованности. Это идет вразрез с прочно установившейся практикой магниторазведки и магнитной картографии, где именно эта величина, связанная с магнитной индукцией, всегда определялась как намагниченность J. С другой стороны, переход магнитной картографии на единицы напряженности СИ практически невозможен, так как переводный множитель содержит коэффициент 4π. Поэтому в магнитной картографии (и магниторазведке) геомагнитное поле стали характеризовать его индукцией, единицы которой в системах СГС и СИ связаны коэффициентом, кратным 10. Трудность, аналогичная ситуации с намагниченностью, возникает и при использовании единиц СИ для магнитной восприимчивости χ.

12. 2. Магнитное поле Земли. Элементы геомагнетизма.

Магнитное поле Земли - диполь, ось которого составляет с осью вращения Земли угол ≈ 10°, не проходит через геометрический центр вращения Земли, а сдвинута на 342 км в сторону, противоположную восточной оконечности Бразилии. Полярность магнитного поля Земли, - противоположна полярности географической: Северный магнитный полюс расположен на юге, в Антарктиде, а Южный - на севере, в Канаде. Так, Москва, расположенная на 56° северной географической широты, имеет южную магнитную широту 51°. Магнитный момент Земли M = 8,1 10^{25} Гс см^3, а средняя напряженность магнитного поля на поверхности Земли составляет ~ 0,4 Гс. Общепризнанной теории происхождения магнитного поля Земли до сих пор нет. Среди имеющихся гипотез наиболее правдоподобны две: поле вызвано вращающимся железным ядром Земли или гигантским электрическим током, опоясывающим Землю на большом расстоянии от центра Земли.

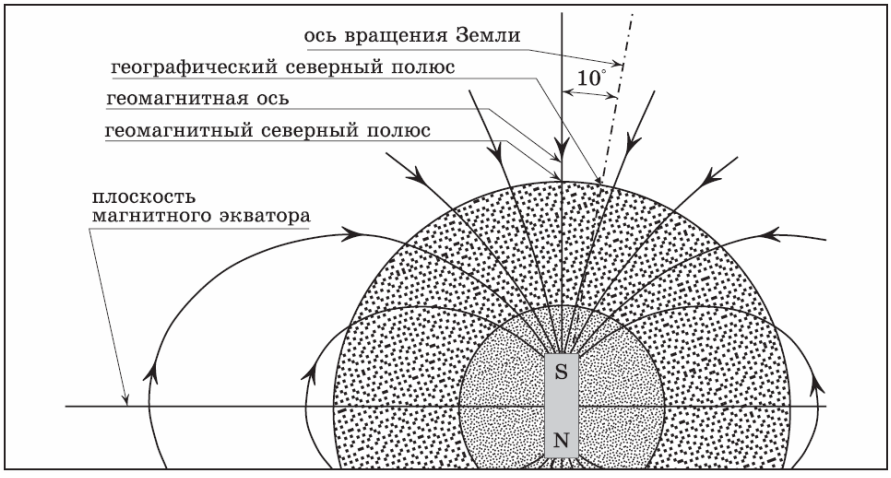


Рис. 12-1. Геомагнитное поле, стрелки – магнитные силовые линии.

Наклон и смещение оси диполя по отношению к оси вращения, а также величина магнитного момента определяют лишь общую картину магнитного поля Земли. На малых расстояниях от Земли поле несколько искажается под влиянием магнитных аномалий: Бразильской, Южноатлантической, Канадской и Восточно-Сибирской. На расстояниях более 6-7 радиусов Земли, - оно существенно искажено солнечным ветром (магнитным полем, вмороженным в плазму солнечного ветра).

Основные определения элементов геомагнетизма:
- Геомагнитные полюсы – точки пересечения магнитной оси Земли с её поверхностью.
- Геомагнитная широта – угловое расстояние от геомагнитного экватора до рассматриваемой точки земной поверхности.
- Магнитный полюс Земли – точка на земной поверхности, в которой магнитная стрелка располагается вертикально. Различают Северный и Южный магнитные полюсы Земли. Положение магнитных полюсов Земли со временем меняется.
- Магнитный экватор – геометрическое место точек на земной поверхности, в которых магнитная стрелка располагается горизонтально относительно поверхности. Магнитный экватор не совпадает с географическим экватором.

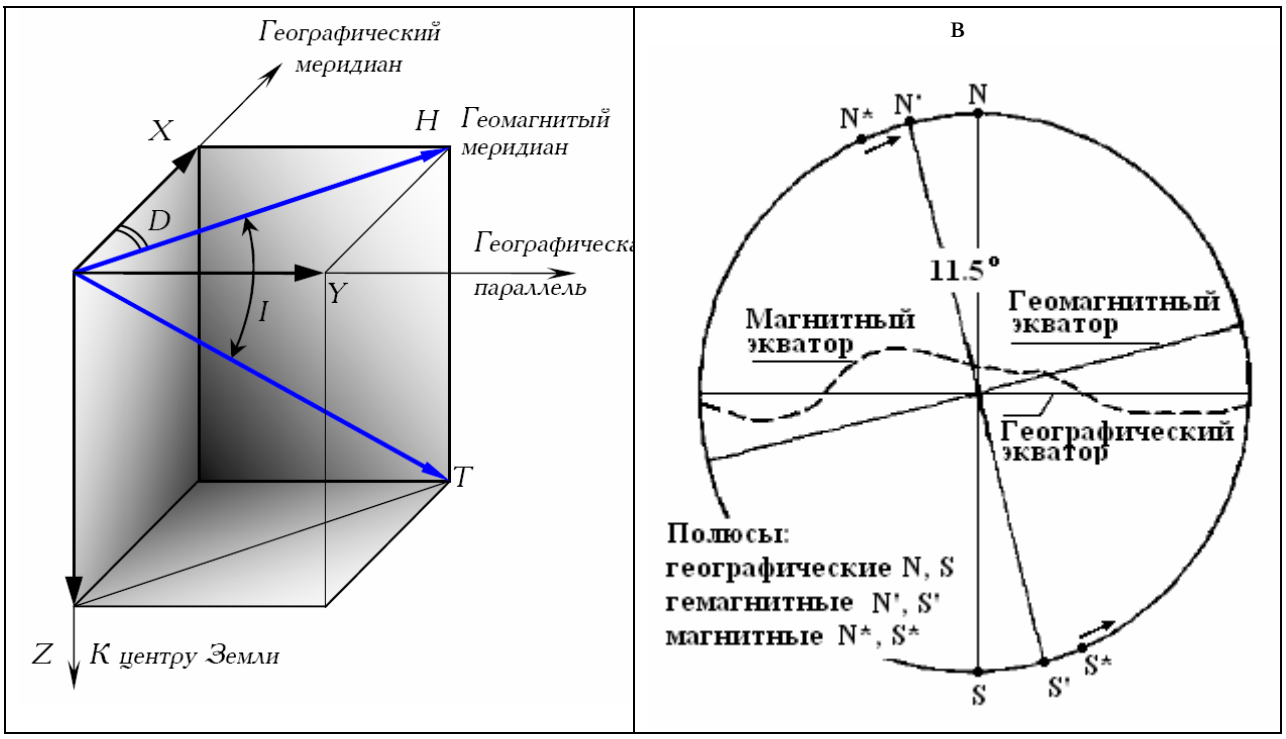


Рис. 12-2. Элементы геомагнитного поля: *X, Y, Z* – компоненты, *T* – полный вектор, *D* – склонение. *I* – наклонение.

- Магнитное склонение (*D*) – угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности. Магнитное склонение считается положительным, если северный конец магнитной стрелки отклонен к востоку от географического меридиана, и отрицательным, - если к западу.
- Магнитное наклонение (*I*) – угол между магнитной силовой линией и горизонтальной плоскостью. На магнитных полюсах Земли, а также в районах крупных магнитных аномалий магнитное наклонение равно 90º.

Карты элементов геомагнитного поля. Главное геомагнитное поле определяется как поле, полученное *усреднением измеренных величин* по временному интервалу около года на площади $\approx 10^6$ км^2.

На рис. 12-3 – 12-6 приведены карты изолиний *T, D, I, H*. Их называют магнитными картами http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml Изолинии склонения - *изогоны*, изолинии наклонения – *изоклины*, изолинии напряженности поля (H, Z, T) – *изодинамы*.

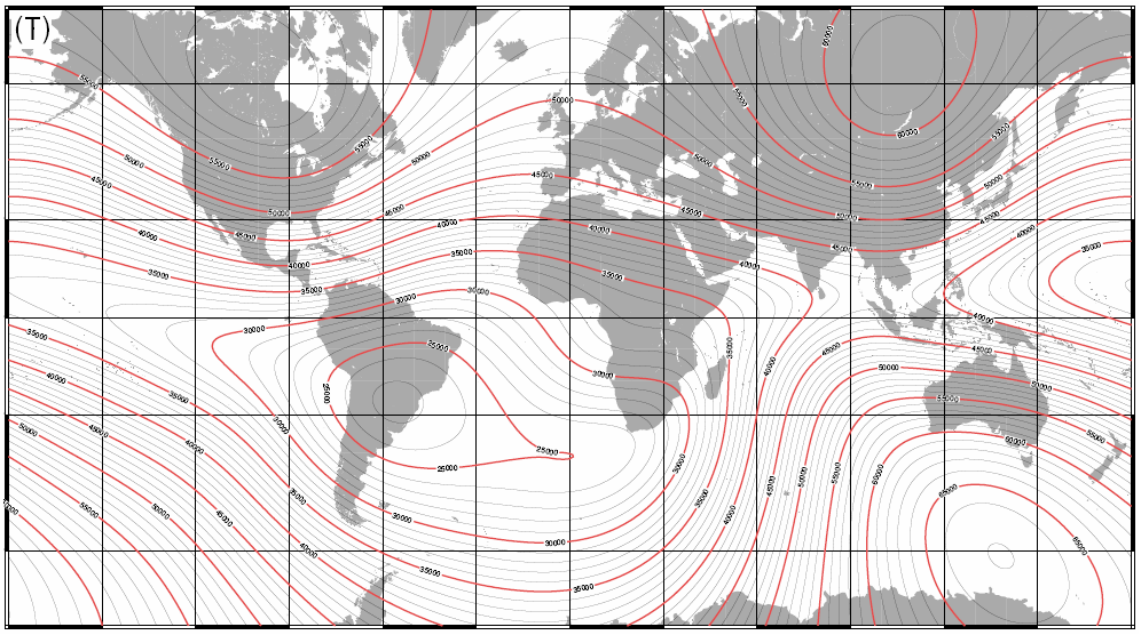


Рис. 12-3. Карта магнитной напряженности *T* мкТл.

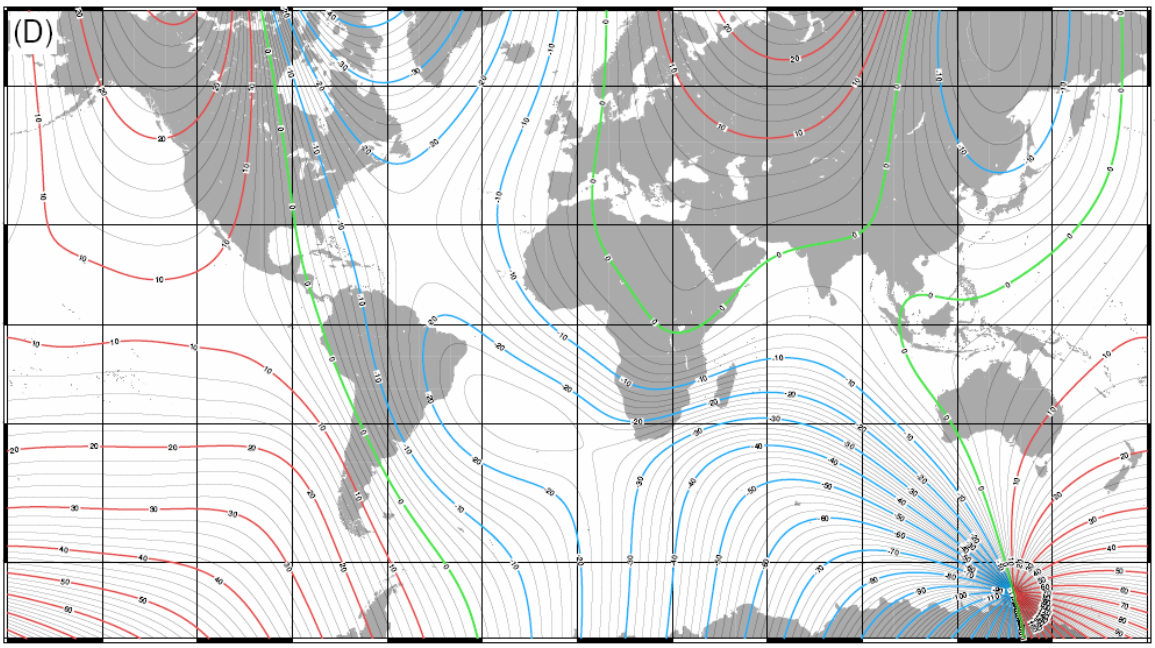


Рис. 12-4. Карта склонения (в градусах) *D*.

Мировые карты обычно получают, синтезируя гармонические составляющие элементов магнитного поля. Изомагнитные карты для меньшей площади, например, для какой-нибудь отдельной страны, часто строят вручную, проводя изолинии наблюденного поля после предварительной коррекции данных с учетом среднегодовых значений и сглаживания по всей площади. Такие карты несут информацию как о главном, так и о локальных полях.

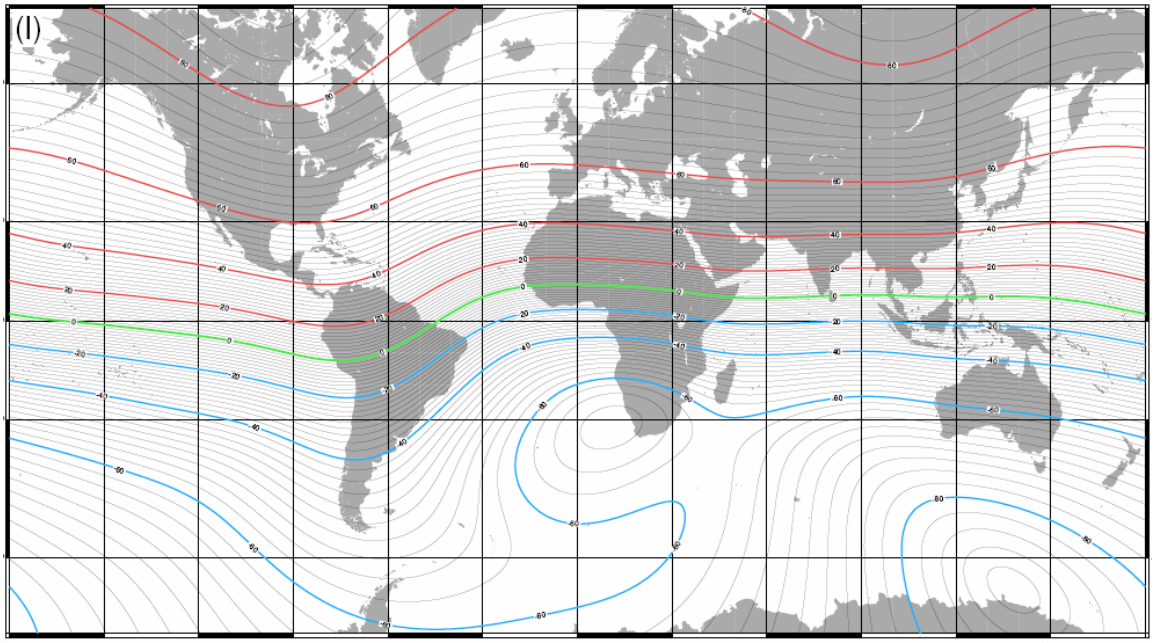


Рис. 12-5. Карта наклонения (в градусах) *I*.

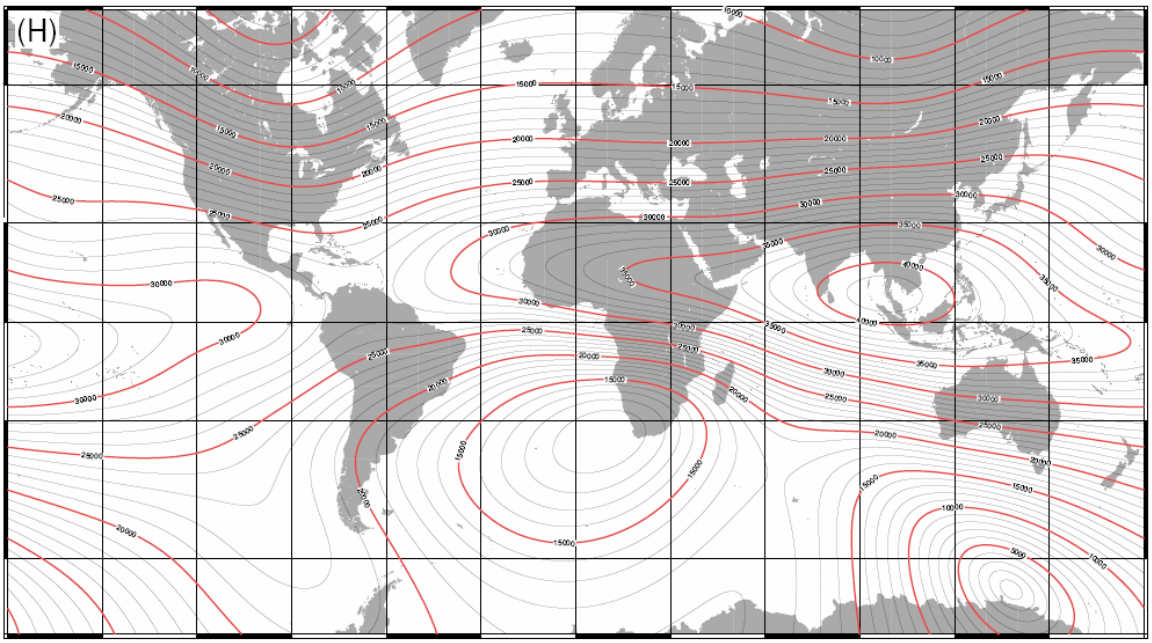


Рис. 12-6. Карта горизонтальной компоненты напряженности *H* мкТл.

Источниками данных являются обсерватории и региональные магнитные съемки. К ним добавляются результаты отдельных элементов. Кроме того, анализируют данные спутниковых измерений полного поля за определенные промежутки времени. Появление таких спутников как MAGCAT, предназначенных для измерения отдельных компонент вектора магнитного поля, позволило значительно повысить качество анализа главного поля.

В конце XVI века Норман и Гильберт предположили, что хорошей аппроксимацией геомагнитного поля является поле диполя, расположенного в центре Земли и направленного по оси вращения. Если бы эта аппроксимация была бы верна, то все силовые линии лежали бы в меридиональных плоскостях, а склонение было бы равно нулю. На самом деле, склонение может достигать 20°, оно положительно в районе Тихого океана, Австралии. Северной Америки и пр., и отрицательно в Атлантическом и

Индийском океанах, Европе и Африке. Лучшую аппроксимацию геомагнитного поля можно получить, наклонив диполь на 11° к оси вращения Земли. Это приближение называют *наклоненным, центральным диполем*.

Из приближения центрального диполя следует, что изодинамы должны иметь вид окружностей с центрами на магнитной оси. На самом деле это не так: значения H в Восточном полушарии - обычно больше, чем в Западном. Лучшего приближения можно добиться, смещая наклоненный диполь от центра Земли примерно в направлении западной части тихого океана. Поле этого диполя называют *полем эксцентричного диполя*. Эксцентричный диполь в 1980 г. располагался на расстоянии 490 км от центра Земли в направлении точки с координатами 21° с.ш. и 147° в.д.

Разложение поля по сферическим гармоническим коэффициентам (Паркинсон, 1986). Магнитные измерения, на которых основан анализ главного поля, проводятся в нижней атмосфере – непосредственно над поверхностью земли. Если допустить, что атмосфера среда непроводящая и немагнитная, то в областях, свободных от источников магнитного поля, скалярный потенциал U удовлетворяет условию

$$\nabla^2 U = 0\,, \tag{12.1}$$

причем магнитное поле B определяется соотношением

$$B = -\nabla U.$$

Потенциал U - удовлетворяет уравнению Лапласа.
В сферической системе координат r, θ, ϕ, - начало которой совпадает с центом Земли, а ось – с её осью вращения, частные решения уравнения Лапласа имеют вид

$$r^k P_n^m(\cos\theta)^{\cos}_{\sin}(m\phi),$$

где k равно n или $-(n+1)$ и $m \le n$, следовательно,

$$\begin{aligned} U(r,\theta,\phi) = &\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}(r^n / a^{n-1})(b_n^m \cos m\phi + c_n^m \sin m\phi)P_n^m(\cos\phi) + \\ &+\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}(a^{n+2} / r^{n+1})(g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi)P_n^m(\cos\phi). \end{aligned} \tag{12.2}$$

Здесь a – радиус Земли, а $b_n^m, c_n^m, g_n^m, h_n^m$ – коэффициенты, с помощью которых можно оптимальным образом аппроксимировать наблюдаемое поле. Суммирование начинается с $n = 1$, поскольку значение $n = 0$ в первой сумме соответствует постоянному, или нулевому, полю U, а во второй сумме – магнитному монополю в центре Земли, существование которого нарушает уравнение Максвелла div $B = 0$. В формуле (12.2) отсутствуют также присоединенные функции Лежандра второго рода (Q_n^m), что связано с сингулярностью поля в полюсе $\theta = 0$.

Обычно околоземное пространство делится на три области: R_1 - нижнее полупространство, R_2 - тонкий слой верхнего полупространства, прилегающий к поверхности Земли, R_3 - область верхнего полупространства, вне R_2. В области R_2 - нет ни одного источника поля, поэтому в ней можно записать потенциал U в форме

$$U = U_\text{i} + U_\text{e}, \tag{12.3}$$

где U_i и U_e- потенциалы полей, источники которых находятся соответственно в R_1 и R_3. Так как в R_3 нет источников поля U_i, то во всех точках R_2 и R_3 оно должно удовлетворять уравнению Лапласа. Однако если представить это поле с помощью (12.2), то при ненулевых коэффициентах b_n^m, c_n^m - все члены первой суммы с ростом r будут неограниченно расти. Следовательно, в представлении поля U_i в виде суммы гармоник в (12.2) должно остаться лишь второе суммирование. Точно так же поле, описываемое

потенциалом U_e, не имеет источников в R_2 и R_1 и, следовательно, удовлетворяем уравнению Лапласа всюду в R_1, включая точку $r = 0$. Поэтому в разложении U_e коэффициенты g_n^m и h_n^m должны быть равны нулю, и в результате остается лишь первое суммирование. Отсюда следует, что если потенциал наблюдаемого поля представлен в форме (12.2), где все коэффициенты определены, то первая сумма должна описывать поле, источники которого находятся в R_3, а вторая сумма соответствует полю, источники которого расположены в R_1. Таким образом, зная коэффициенты $b_n^m, c_n^m, g_n^m, h_n^m$, мы можем с помощью этого метода разделить поле на внутреннее и внешнее.

В связи с этим может возникнуть вопрос о единственности: все ли возможные решения уравнения Лапласа сдержатся в (12.2). Оказывается, что если это выражение описывает потенциал, измеряемый на сфере, то оно содержит все члены, необходимые для описания U всюду, где справедливо само уравнение.

Вместе с тем потенциал U не относится к наблюдаемым величинам. Мы можем измерять лишь компоненты поля $B = -\nabla U$. Пусть X, Y и Z – соответственно северная, восточная и вертикальная (ось OZ направлена вниз) компоненты поля B в точке на сфере. Можно записать

$$\begin{aligned} X &= B_\theta = (1/r)\partial U/\partial\theta, \\ Y &= B_\phi = -(r\sin\theta)^{-1}\partial U/\partial\phi, \\ Z &= -B_r = \partial U/\partial r. \end{aligned} \tag{12.4}$$

Отметим, что θ и r возрастают соответственно к югу и вверх. Дифференцируя (12.2) и полагая $r = a$, на поверхности получаем

$$X = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left[(b_n^m + g_n^m)\cos m\phi + (c_n^m + h_n^m)\sin m\phi\right](d/d\theta)P_n^m(\cos\phi), \tag{12.5}$$

$$Y = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left[m(b_n^m + g_n^m)\sin m\phi - m(c_n^m + h_n^m)\cos m\phi\right]P_n^m(\cos\phi)/\sin\theta, \tag{12.6}$$

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left[\left\{nb_n^m - (n-1)g_n^m\right\}\cos m\phi + \left\{nc_n^m - (n-1)h_n^m\right\}\sin m\phi\right]P_n^m(\cos\phi). \tag{12.7}$$

Если X и Z известны для всех точек поверхности Земли, то с помощью одного из методов подбора можно определить множители при cos mϕ и sin mϕ, а затем найти и коэффициенты $b_n^m, c_n^m, g_n^m, h_n^m$. Анализ полученных результатов показывает, то все коэффициенты b и c намного меньше, чем g и h. Они не больше, чем неопределенность в коэффициентах g и h. Таким образом, из разделения главного поля следует, что оно имеет внутреннее происхождение, как и полагал Гильберт. На основании данных МАГСАТа был сделан вывод о том, что амплитуда внешнего поля составляет ≈ 20нТл.

Международное эталонное геомагнитное поле (Паркинсон, 1986). В физике Земли оказывается полезным иметь некоторый согласованный международный стандарт для наблюдаемой величины. Например, Международное нормальное гравитационное поле, модель Джеффриса-Буллена для времен пробега сейсмических волн, модель стандартной атмосферы и т.п. Стандартное приближение главного геомагнитного поля называют *Международным эталонным геомагнитным полем* (IGRF: International Geomagnetic Reference Field). http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf10coeffs.txt В таблице12.1 приведены коэффициенты Гаусса g_n^m и h_n^m в нТл.

Таблица 12.1. Коэффициенты Гаусса g_n^m и h_n^m в нТл для эпох 1990 – 1975 гг.

g/h	n	m	1900.0	1905.0	1910.0	1915.0	1920.0	1925.0	1930.0	1935.0	1940.0	1945.0	1950.0	1955.0	1960.0	1965.0	1970.0	1975.0
g	1	0	-31543	-31464	-31354	-31212	-31060	-30926	-30805	-30715	-30654	-30594	-30554	-30500	-30421	-30334	-30220	-30100
g	1	1	-2298	-2298	-2297	-2306	-2317	-2318	-2316	-2306	-2292	-2285	-2250	-2215	-2169	-2119	-2068	-2013
h	1	1	5922	5909	5898	5875	5845	5817	5808	5812	5821	5810	5815	5820	5791	5776	5737	5675
g	2	0	-677	-728	-769	-802	-839	-893	-951	-1018	-1106	-1244	-1341	-1440	-1555	-1662	-1781	-1902
g	2	1	2905	2928	2948	2956	2959	2969	2980	2984	2981	2990	2998	3003	3002	2997	3000	3010
h	2	1	-1061	-1086	-1128	-1191	-1259	-1334	-1424	-1520	-1614	-1702	-1810	-1898	-1967	-2016	-2047	-2067
g	2	2	924	1041	1176	1309	1407	1471	1517	1550	1566	1578	1576	1581	1590	1594	1611	1632
h	2	2	1121	1065	1000	917	823	728	644	586	528	477	381	291	206	114	25	-68
g	3	0	1022	1037	1058	1084	1111	1140	1172	1206	1240	1282	1297	1302	1302	1297	1287	1276
g	3	1	-1469	-1494	-1524	-1559	-1600	-1645	-1692	-1740	-1790	-1834	-1889	-1944	-1992	-2038	-2091	-2144
h	3	1	-330	-357	-389	-421	-445	-462	-480	-494	-499	-499	-476	-462	-414	-404	-366	-333
g	3	2	1256	1239	1223	1212	1205	1202	1205	1215	1232	1255	1274	1288	1289	1292	1278	1260
h	3	2	3	34	62	84	103	119	133	146	163	186	206	216	224	240	251	262
g	3	3	572	635	705	778	839	881	907	918	916	913	896	882	878	856	838	830
h	3	3	523	480	425	360	293	229	166	101	43	-11	-46	-83	-130	-165	-196	-223
g	4	0	876	880	884	887	889	891	896	903	914	944	954	958	957	957	952	946
g	4	1	628	643	660	678	695	711	727	744	762	776	792	796	800	804	800	791
h	4	1	195	203	211	218	220	216	205	188	169	144	136	133	135	148	167	191
g	4	2	660	653	644	631	616	601	584	565	550	544	528	510	504	479	461	438
h	4	2	-69	-77	-90	-109	-134	-163	-195	-226	-252	-276	-278	-274	-278	-269	-266	-265
g	4	3	-361	-380	-400	-416	-424	-426	-422	-415	-405	-421	-408	-397	-394	-390	-395	-405
h	4	3	-210	-201	-189	-173	-153	-130	-109	-90	-72	-55	-37	-23	3	13	26	39
g	4	4	134	146	160	178	199	217	234	249	265	304	303	290	269	252	234	216
h	4	4	-75	-65	-55	-51	-57	-70	-90	-114	-141	-178	-210	-230	-255	-269	-279	-288
g	5	0	-184	-192	-201	-211	-221	-230	-237	-241	-241	-253	-240	-229	-222	-219	-216	-218
g	5	1	328	328	327	327	326	326	327	329	334	346	349	360	362	358	359	356
h	5	1	-210	-193	-172	-148	-122	-96	-72	-51	-33	-12	3	15	16	19	26	31
g	5	2	264	259	253	245	236	226	218	211	208	194	211	230	242	254	262	264
h	5	2	53	56	57	58	58	58	60	64	71	95	103	110	125	128	139	148
g	5	3	5	-1	-9	-16	-23	-28	-32	-33	-33	-20	-20	-23	-26	-31	-42	-59
h	5	3	-33	-32	-33	-34	-38	-44	-53	-64	-75	-67	-87	-98	-117	-126	-139	-152
g	5	4	-86	-93	-102	-111	-119	-125	-131	-136	-141	-142	-147	-152	-156	-157	-160	-159
h	5	4	-124	-125	-126	-126	-125	-122	-118	-115	-113	-119	-122	-121	-114	-97	-91	-83
g	5	5	-16	-26	-38	-51	-62	-69	-74	-76	-76	-82	-76	-69	-63	-62	-56	-49
h	5	5	3	11	21	32	43	51	58	64	69	82	80	78	81	81	83	88
g	6	0	63	62	62	61	61	61	60	59	57	59	54	47	46	45	43	45
g	6	1	61	60	58	57	55	54	53	53	54	57	57	57	58	61	64	66
h	6	1	-9	-7	-5	-2	0	3	4	4	4	6	-1	-9	-10	-11	-12	-13
g	6	2	-11	-11	-11	-10	-10	-9	-9	-8	-7	6	4	3	1	8	15	28
h	6	2	83	86	89	93	96	99	102	104	105	100	99	96	99	100	100	99
g	6	3	-217	-221	-224	-228	-233	-238	-242	-246	-249	-246	-247	-247	-237	-228	-212	-198
h	6	3	2	4	5	8	11	14	19	25	33	16	33	48	60	68	72	75
g	6	4	-58	-57	-54	-51	-46	-40	-32	-25	-18	-25	-16	-8	-1	4	2	1
h	6	4	-35	-32	-29	-26	-22	-18	-16	-15	-15	-9	-12	-16	-20	-32	-37	-41
g	6	5	59	57	54	49	44	39	32	25	18	21	12	7	-2	1	3	6
h	6	5	36	32	28	23	18	13	8	4	0	-16	-12	-12	-11	-8	-6	-4

Непотенциальное поле. Формулы для X и Y (12.5; 12.6) идентичны. Если северная компонента известна, то, измеряя восточную компоненту. Мы не получим никакой дополнительной информации. Это связано с предположением о том, что в нижней атмосфере токи не текут. Если рассмотреть сферический треугольник, одной вершиной которого является северный полюс, две другие вершины лежат на одной широте. Через треугольник токи не протекают, тогда, согласно,

$$\int rotB \cdot dS = \oint Bdr = 0. \qquad (12.8)$$

Отсюда следует, что линейный интеграл вдоль параллели, представляющий собой среднее значение Y, умноженное на соответствующее расстояние, равен разности между линейными интегралами вдоль меридианов от компоненты X.

Принято считать, что предположение об отсутствии токов через поверхность полностью подтверждено измерениями токов на границе между атмосферой и Землей. Обычно это объясняется следующим образом. В районах, где наблюдается хорошая погода, плотность тока составляет 4 мкА/км^2. При грозах образуется проводящая цепочка, однако, если даже все грозы произошли бы одновременно и в одном месте, максимальное поле, вызванное током гроз, не превысило бы 0.03 нТл.

Тем не менее, тщательный анализ главного поля, выполненный в 20-х годах прошлого века, показал, что существует большое различие между потенциалами, вычисленными по X- и Y-компонентам. Для объяснения кажущегося тока, о существовании которого можно судить по его магнитным проявлениям (токи Шмидта-Бауэра), но который не удавалось обнаружить непосредственно, были предложены некоторые теории. Однако как считает Паркинсон, с улучшением качества мировых магнитных карт после примерно 1950 г. эта разность уменьшилась и теперь ясно, что величина непотенциального поля чрезвычайно мала (но не нулевая).

Отсутствие непотенциального (или тороидального) поля можно использовать как тест для проверки выполнения уравнений Максвелла. Наблюдаемые результаты указывают (по мнению Паркинсона) на отсутствие отклонений от классической модели.

Конечно, по одной восточной компоненте нельзя судить о коэффициентах с $m = 0$ и, следовательно, знания компонент Y и Z недостаточно для определения внутренней и внешней частей поля. Однако если предположить, что поле имеет полностью внутреннее происхождение, то для его нахождения необходимо знание или X- или Z-компоненты.

Значение отдельных членов разложения. Рассмотрим физический смысл отдельных членов уравнения (12.2). Отпуская коэффициенты b и c и записывая присоединенные полиномы Лежандра в явном виде, получим

$$\begin{aligned} U = {} & g_1(a^3/r^2)\cos\theta + (a^3/r^2)g_1^1\cos\phi + h_1^1\sin\theta + \\ & + (a^4/r^3)g_2 1/2(3\cos^2\theta - 1) + \\ & + (a^4/r^3)(g_2^1\cos\theta + h_2^1\sin\theta)(3)^{1/2}\sin\theta\cos\theta + \\ & + (a^4/r^3)(g_2^2\cos 2\theta + h_2^2\sin 2\theta)(3/4)^{1/2}\sin^2\theta + \ldots \end{aligned} \qquad (12.9)$$

Коэффициенты в (12.9) называют *коэффициентами Гаусса.* Первый член представляет собой диполь с моментом

$$m = (4\pi/\mu_0)a^3 g_1,$$

ось которого совпадает с осью системы координат, т.е. с осью вращения Земли. Второй член соответствует диполю, расположенному в экваториальной плоскости в направлении точки с долготой $arctg(h_1^1/g_1^1)$.

Таким образом, объединив два первых члена, можно получить поле наклоненного диполя, составляющего с осью вращения угол $arctg\left\{\left[(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2\right]^{1/2}/g_1\right\}$.

Следующие три члена, содержащие множитель $r^{-3,}$ составляют поле квадруполя. Первый из них связан с осесимметричным квадруполем, т.е. двумя аксиальными диполями, направленными вдоль оси в противоположных направлениях. Второй член соответствует аксиальным диполям, расположенным в экваториальной плоскости, а третий – экваториальным диполям в той же плоскости. Следующие пять членов, зависящие от r^{-4}, представляют октупольную часть поля. Таким образом, с помощью мультиполей всё более высокого порядка, расположенных в центре Земли, можно давать всё более подробное описание поля.

Пользуясь подобными представлениями геомагнитного поля как суммы диполя, квадруполя и октуполя, немецкий геофизик Глацмайер обнаружил, что в настоящее время дипольная компонента поля уменьшается, а диполи высших порядков – возрастают. Если эта тенденция сохранится, то, как показано на рис. 12-7, можно ожидать продолжения этих процессов в будущем.

Дипольный и квадрупольный члены определяют эксцентричный диполь, который обладает шестью степенями свободы: три координаты, два угла и момент. Если сдвинуть начало системы координат в точку расположения эксцентричного диполя (в магнитный центр), а ось направить так, чтобы она совпадала с осью диполя, тогда коэффициенты $g_1^1, h_1^1, g_2, g_2^1, h_2^1$ можно сделать равными нулю.

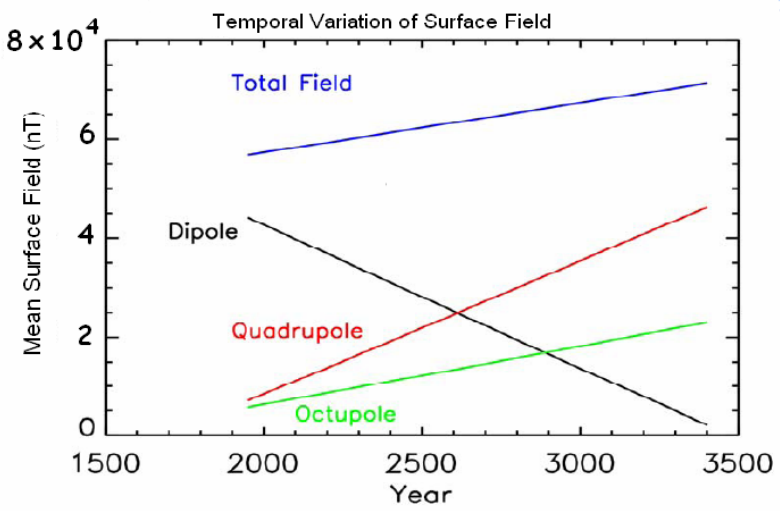


Рис. 12-7. Прогноз поведения компонент геомагнитного поля.

Дипольное поле, виртуальный геомагнитный диполь. Две противоположные точки, в которых ось центрального диполя пересекает поверхность Земли, называются *геомагнитными полюсами*. Геомагнитные полюса отличаются от *магнитных полюсов*, которые определяются как точки, в которых усредненное по времени магнитное поле - направлено вертикально. Геомагнитные полюса находят в результате анализа мировых данных и определения первых двух членов в представлении (12.8). Магнитные полюса могут быть найдены только путем непосредственных измерений, поскольку на их положение влияют не только квадруполь и более высокие гармоники главного поля, но и локальное поле, особенно в тех точках, где мала горизонтальная составляющая.

Ни один из упомянутых выше полюсов не имеет ничего общего с полюсами (монополями) магнита. Модель, которую иногда рисуют в научно-популярных книжках, длинный магнит, пронзающий Землю от севера до юга – совершенно неверна.

Недипольное поле – это главное поле за вычетом поля центрального диполя. Оно аппроксимируется всеми членами из табл. 12.1, за исключением первых трех. Дипольное и недипольное поле ведут себя несколько по-разному, и есть основание считать, что каждое из них имеет свой физический источник. На рис. 12-8 приведены карты

вертикальной (вверху) и восточной (внизу) компонент недипольного поля. Отметим сравнительно малую амплитуду этого поля над акваторией Тихого океана.

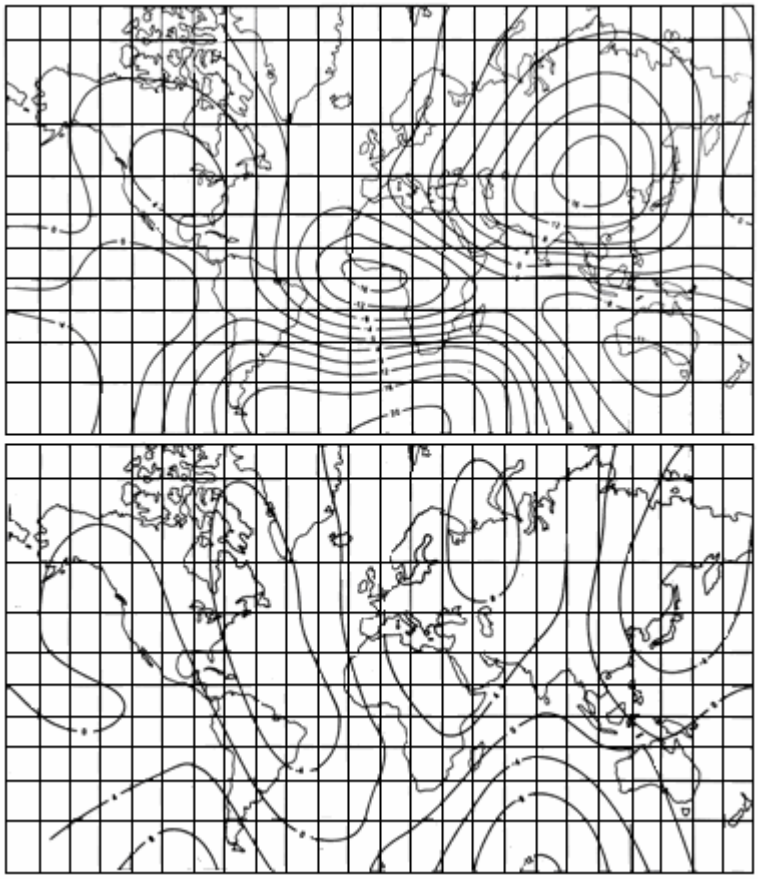


Рис. 12-8.Карты вертикальной (вверху) и восточной (внизу) компонент недипольного поля (Паркинсон, 1986).

12. 3. Вековые вариации геомагнитного поля.

Величины склонения и наклонения измерялись обсерваторией в Лондоне, начиная с 1540 года. Было отмечено, что в течение всего времени наблюдений эти параметры непрерывно изменялись (рис. 12-9).

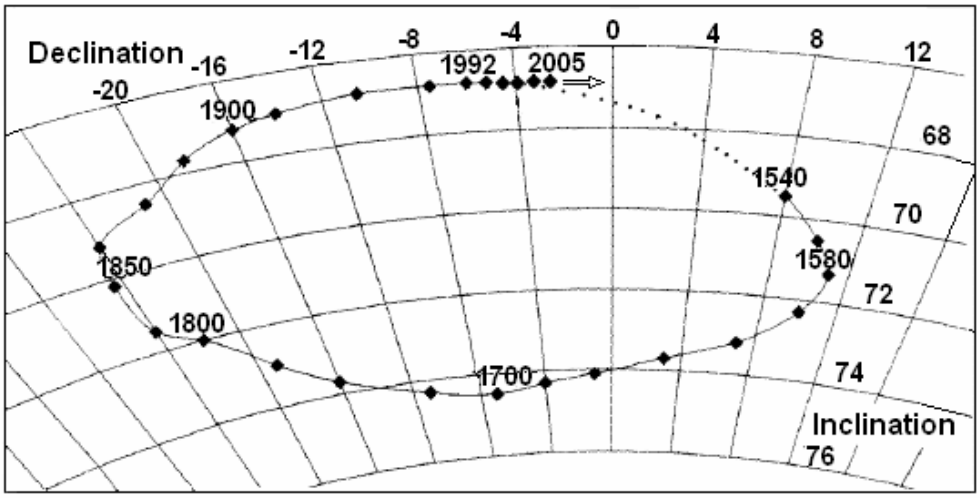


Рис. 12-9. Изменение склонения (*D*) и наклонения (I) в Лондоне.

Если среднегодовые значения любого из параметров геомагнитного поля нанести на график, то окажется, что значение плавно увеличиваются, а потом так же плавно уменьшаются. Медленное изменение, происходящее в течение многих лет, называют *вековой вариацией* (secular variation) или *вековым ходом*.

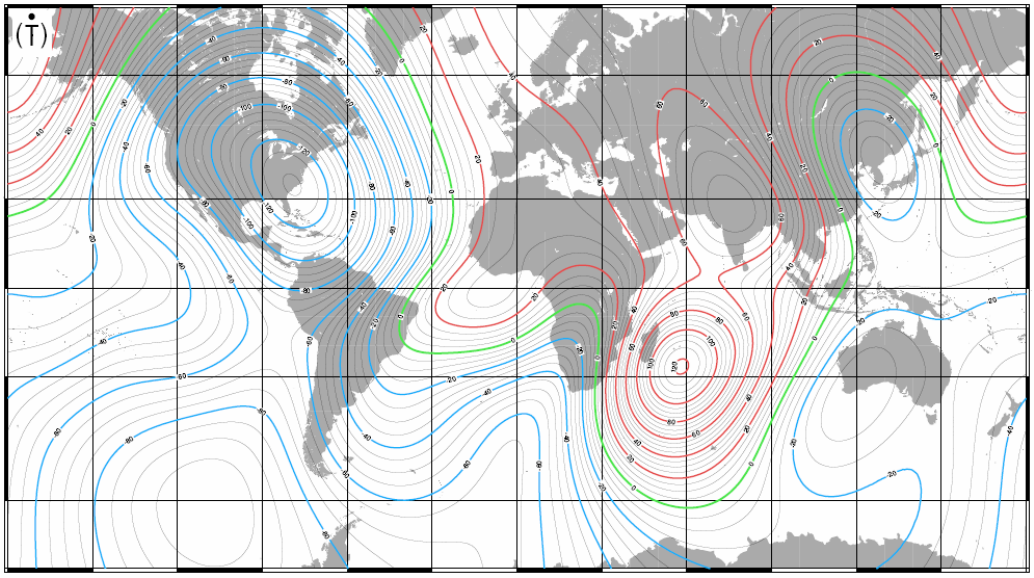


Рис. 12-10. Карта векового хода модуля поля *dT/dt*.

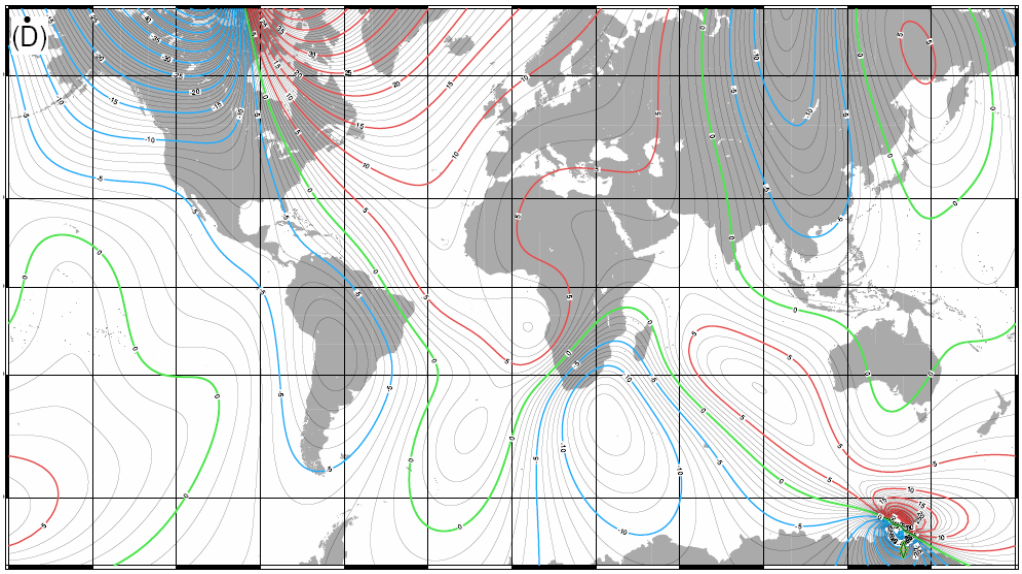


Рис. 12-11. Карта векового хода склонения *dD/dt*.

Вековую вариацию можно адекватно описать, опираясь на четыре явления:

1. Уменьшение магнитного момента диполя, описываемое коэффициентами $\partial g_1/\partial t$, $\partial g_1^1/\partial t$, $\partial h_1/\partial t$.
2. Западный дрейф недипольного поля.
3. Сдвиг аномального диполя к северу, который описывается коэффициентом $\partial g_2/\partial t$.
4. Отсутствие дрейфа вековой вариации.

Остановимся на некоторых особенностях карт изопор. Первая из них состоит в том, что в случае вековой вариации дипольные члены не являются доминирующими, как это было при анализе главного поля. Соответственно и изменения дипольного поля намного меньше, чем недипольного. Дипольные члены разложения вековой вариации

относительно меньше, чем недипольные. Однако, несмотря на это, изменение амплитуды дипольного члена довольно значительно. За столетие она изменяется на 8 % - очень быстро для глобального геофизического явления.

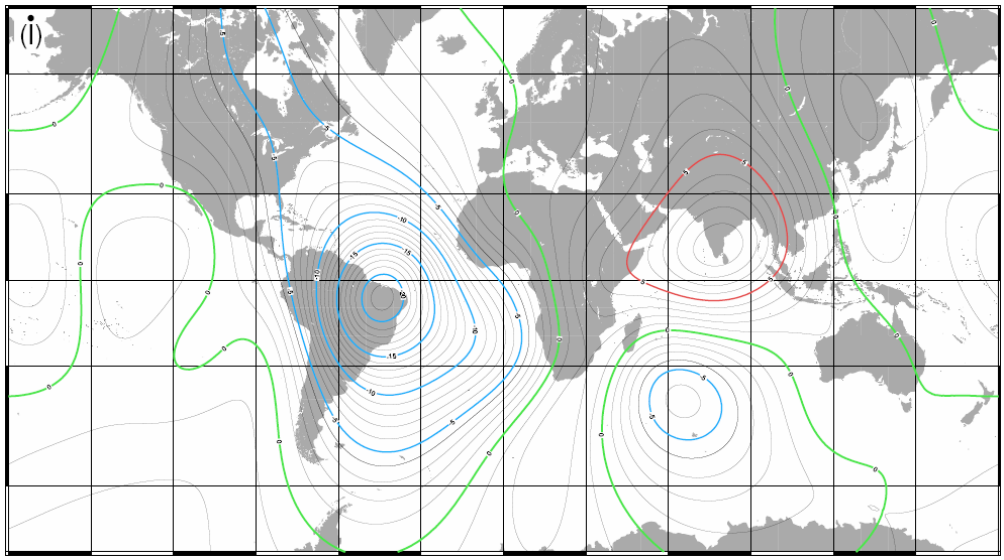


Рис. 12-12. Карта векового хода наклонения *dI/dt*.

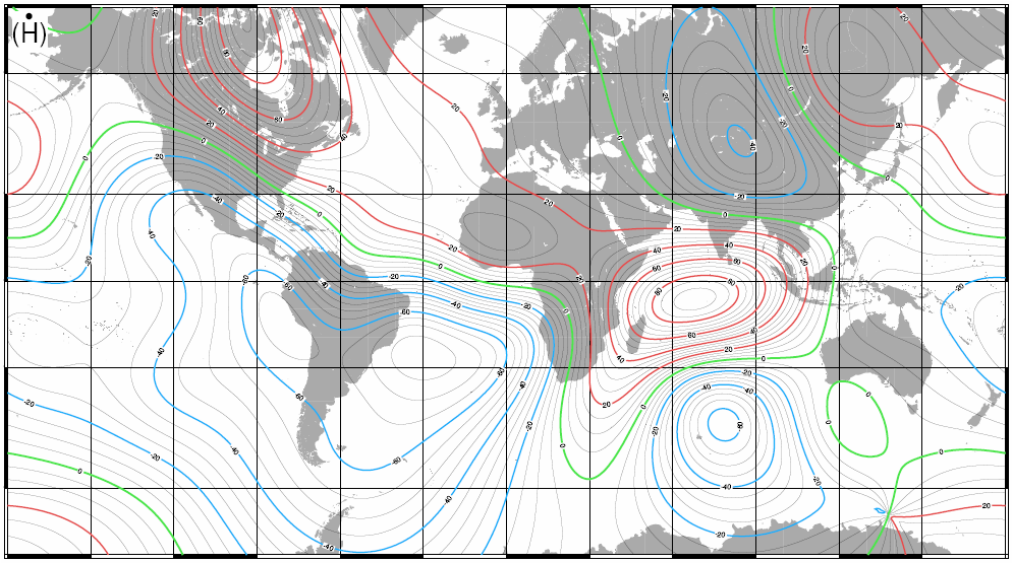


Рис. 12-13. Карта векового хода горизонтальной компоненты поля *dH/dt*.
(Коэффициенты IGRF10 - http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf10coeffs.txt)

Второй особенностью карт изопор является наличие областей, где скорость изменений максимальна. Такие области называют *фокусами векового хода* (фокусами изопор). Фокусы перемещаются на запад со скоростью долей градуса в год.

Третья особенность карт изопор состоит в том, что амплитуда вековой вариации в полушарии, где находится Тихий океан, обычно меньше, чем в другом полушарии Земли. На этот район не приходится ни один из фокусов карты изопор. Недипольное поле там также ослаблено. Неясно, является ли это характерной особенностью или же временным состоянием региона.

Западный дрейф. В конце XVII в. Э. Галлей высказал предположение, что вековой ход геомагнитного поля можно объяснить западным дрейфом. С тех пор эта гипотеза стала общепринятой. Западный дрейф наиболее заметен по перемещению на запад фокусов

изопор. Заметим, что нет никаких теоретических обоснований того факта, что дрейф должен происходить на запад, а не на восток (Паркисон, 1986).

12. 4. Проблема происхождения главного поля.

Магнитное поле вращающихся объектов. (Рамит Азад, 2001). Уильям Гильберт в 1600 г. описал свои опыты по изучению магнитных сил вокруг намагниченного железного шара в книге: «О магните, магнитных телах и о большом магните - Земле» (переведенный на русский язык в 1956 г.). В этих опытах он установил, что направление магнитных сил вблизи намагниченного железного шара такое же, как у Земли, и это навело его на мысль, что намагниченный шар — уменьшенная в десятки миллионов раз копия намагниченной Земли. Следствием этой гениальной догадки ученого было важнейшее для науки заключение: причина земного магнетизма находится внутри нашей планеты, а Земля — огромный магнит.

Но почему Земля магнит? Почему магнитные поля есть у других планет и у звезд? Что представляют собой их источники? Эти вопросы, возникшие еще в эпоху классического естествознания, пока не нашли полного ответа. Между тем, разгадав их, удалось бы не только решить важнейшую познавательную задачу, но и больше узнать об образовании и развитии планет солнечной системы и других небесных тел.

Среди российских магнитологов одной из первых ярких фигур был Михаил Васильевич Ломоносов. Размышляя о магнетизме, Ломоносов пришел к выводу, что это самый сложный раздел физики, и поэтому призывал всех ученых очень скрупулезно изучать все проявления магнетизма Земли. Он писал по этому поводу: «Из наблюдения устанавливать теорию, исправлять наблюдения есть лучший всего способ к изысканию правды. По сему поче всего в магнитной теории, тончайшей из всех материй, что ни есть в физике, поступать должно». В 1759 г. в своем труде «Рассуждения о большей точности морского пути» он дал решение ряда вопросов, относящихся к земному магнетизму.

В попытках найти механизм, управляющий процессом намагничивания небесных тел, как и при решений других проблем естествознания, ученые начинали с создания гипотез, базирующихся на результатах наблюдений и экспериментов.

В 1820 г. Ханс Эрстед обнаружил, что поле, возбуждаемое током, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку. Это поле получило название «магнитное». Из его опыта следует, что магнитное поле порождается движущимися зарядами. Через одиннадцать лет английский физик М. Фарадей обнаружил, что в проводнике возникает моментальный ток, если в другом проводнике, находящемся вблизи него, ток включается или выключается; а затем он обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. Американский ученый Зосеф Генри, обнаружил подобный эффект независимо от Фарадея. Таким образом, была установлена взаимосвязь электрического и магнитного полей.

Поиски объяснения возможных причин возникновения магнетизма у макрообъектов продолжались. Одно из направлений этих поисков — генерация магнитного поля вследствие вращения. Изучению вопроса возникновения магнитного поля у вращающихся объектов как лабораторного, так и космического масштаба посвящены работы таких исследователей, как Гаусс, Фарадей, Шустер, Лебедев, Эйнштейн и т. д.

В 1838 г. Карл Фридрих Гаусс опубликовал важнейшую для геомагнетизма книгу «Общая теория земного магнетизма», в которой ставил совершенно по-иному задачу об интерпретации магнитного поля Земли, допустив единственное предположение, что наблюдаемое на поверхности нашей Земли магнитное поле почти полностью обязано источникам, расположенным где-то внутри Земного шара. Таким образом, он заложил теоретическую базу возникновения магнитного поля у вращающихся объектов.

Джон Перри в свой книге «Вращающийся волчок», изданной в 1890 г. в США, поместил примечание: «Если большой кусок железа заставить быстро вращаться сначала в одну, а потом в другую сторону вблизи свободно подвешенной магнитной стрелки, которая хорошо защищена от действия воздушных течений, то я думаю, должны произойти явления, представляющие величайший интерес для теории магнетизма. До сих пор мне не удалось при этих исследованиях обнаружить какого-либо магнитного действия, но я приписываю этот неуспех относительной медленности вращения, которое я применил, а также недостаточной чувствительностью магнитометра».

Однако в 1891 Шустер, предсказав существование магнитного поля Солнца исходя из наблюдения его короны, поставил вопрос: «Является ли любая значительная вращающаяся масса магнитом?» Для объяснения существования такого поля был использован гиромагнитный эффект, в соответствие с которым каждое вращающееся тело намагничивается. Однако сам Шустер показал, что величина такого поля очень мала. И, кроме того, величина поля не зависит от радиуса. Поэтому такой механизм был отвергнут.

Шустер сделал общий обзор работ по этой проблеме, опубликованных вплоть до 1912 года. В частности, он рассмотрел теорию, схожую с теорией Сазерленда, который предполагал, что Земля обладает объемным положительным зарядом и отрицательным поверхностным зарядом.

В 1911 г. опытами Резерфорда было установлено, что атомы всех веществ состоят из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Было установлено также, что кроме орбитальных моментов электрон обладает собственными механическими и магнитными моментами. Собственный магнитный момент порождается моментом количества движения частицы, которое получил особое название — спин. Таким образом, можно ожидать, что все атомы должны обладать магнитными свойствами, что на самом деле эквивалентно предположению, впервые сделанному Ампером в 1820 г., что магнитные свойства материи являются результатом молекулярных токов.

После опытов Резерфорда стала понятна природа молекулярных токов. В связи с этим, у Эйнштейна и нидерландского ученого Вандера де Гааза родилась идея опыта по определению магнитных свойств атомов, вызвавшего большой интерес у физиков начала нашего столетия. Опыт Эйнштейна и де Гааза осуществлялся следующим образом. Тонкий железный стержень подвешивался на упругой нити и помещался внутри соленоида. Закручивание нити при намагничивании стержня постоянным магнитным полем получилось весьма малым. Для усиления эффекта был применен метод резонанса — соленоид запитывался переменным током, частота которого подбиралась равной собственной частоте механических колебании системы. При этих условиях амплитуда колебаний достигала значения, которое можно было измерить, наблюдая смещения светового зайчика, отраженного от зеркальца, укрепленного на стержне.

Из данных опыта было вычислено магнитомеханическое отношение, которое оказалось равным — e/m (e — заряд электрона, m — масса электрона). Таким образом, знак носителей, создающих молекулярные токи, совпал с знаком электрона. Однако полученный результат превысил ожидаемое значение магнитомеханического отношения ($pm/M = -e/2m$; pm - магнитный момент, M - орбитальный механический момент) в два раза.

Анализируя результаты проведенного эксперимента, Эйнштейн пришел к выводу, что должен существовать и обратный эффект: при вращении ферромагнитного тела в отсутствие внешнего магнитного поля это тело будет самопроизвольно намагничиваться, так как магнитные моменты электронов-волчков будут ориентироваться по направлению оси вращения ферромагнетика.

Упомянутый выше Джон Перри был близок к открытию интереснейшего эффекта, но несовершенства в постановке опыта не позволили ему сделать это. Позднее этот эксперимент осуществил американский ученый Сэмуел Барнетт. Он приводил железный стержень в очень быстрое вращение вокруг его оси и измерял возникающее при этом

намагничивание. Из результатов этого опыта Барнетт также получил для магнетомеханического отношения величину, в два раза превышающую значение -e/2m.
Но магнитомеханическое явление относится только к ферромагнетикам, а как обстоит дело с другими веществами? Как мы видели ранее, такой вопрос естественным образом возник у Шустера. В связи с этим, было высказано также предположение о существовании еще одного важного закона: всякое вращающееся тело (не ферромагнитное) создает вокруг себя магнитное поле. Проверка истинности этого утверждения требовала постановки сложнейших опытов, и поэтому их в течение долгого времени не могли осуществить.

Известный русский физик П.Н. Лебедев опубликовал результаты экспериментального исследования, - может ли порождаться магнитное поле из-за вращения электронейтральных тел (1911 г). Побудительным мотивом явились работы Сазерленда, выдвинувшего гипотезу о том, «... что в каждом нейтральном атоме центры тяжести его разноименных зарядов не совпадают и так сдвинуты друг относительно друга, что центры отрицательных зарядов описывают большие пути, чем положительные...». Физическая же причина смещения зарядов по гипотезе Сазерленда - гравитационное воздействие. Механизм этого воздействия оставался нераскрытым. Он не получил последовательного и достаточно полного объяснения, в тот доквантовый период, - в 1903 - 1904 г. По существу, Сазерленд попросту пытался подобрать такую зависимость между электрической поляризацией и напряженностью гравитационного поля, которая позволила бы получить наблюдаемые значения для магнитных полей небесных тел, в первую очередь, - Солнца.

П.Н. Лебедев выдвинул предположение, что аналогичное смещение зарядов должно возникать под действием не только гравитационных, но и центробежных сил. Поставленные им эксперименты и имели целью проверку этого предположения. Уместно подчеркнуть, что эта проблема имела принципиальное значение: обнаружение магнитного эффекта от «центробежной поляризации» могло бы явиться ключом к пониманию её сути и того значения, которое последняя имеет для формирований магнитных полей планет и звезд.

П.Н. Лебедев создал установку для проверки истинности предполагаемого закона. С ее помощью ему удалось вращать медное кольцо с огромной угловой скоростью - до 5-6 тыс. об/с и фиксировать изменение магнитного поля вблизи этого кольца. Однако ни эксперимент П.Н. Лебедева, ни более поздние попытки американских физиков, пытавшихся повторить эти опыты, повысив чувствительность аппаратуры, не привели к обнаружению ожидавшегося эффекта. Американский физик Ригель в 1970 пытался повторить опыты Лебедева, повысив чувствительность аппаратуры, но опять не обнаружил ожидавшегося эффекта. Последствия этого очевидны: «поляризационная гипотеза», не имевшая надежного теоретического обоснования и не подтвержденная экспериментально, стала восприниматься все более скептически.

Были и другие попытки построить механизм возникновения магнитного поля. Сурдин в 1971 г. предположил, что флуктуации магнитного поля Вселенной при абсолютном нуле индуцируют в атомах вращающихся тел электрические диполи. Эти диполи с равной вероятностью появляются и исчезают случайным образом. Магнитное поле, создаваемое этими диполями, вращающимися вокруг оси, является суммой двух магнитных полей, создаваемых положительными и отрицательными зарядами диполей.
Эти предположения и тот факт, что речь идет о случайном процессе, позволяют вычислить функцию автокорреляции результирующего магнитного поля. Автор получил формулы значений среднего квадрата амплитуды магнитного поля в центре вращающегося тела различных геометрических конфигураций, таких как плоский диск, сфера и т. д.

Кумар и Нандин в 1973 рассмотрели возможность электрической поляризации, связанной с гравитацией. Для вращающегося тела им удалось получить результаты, согласующиеся с величинами магнитных полей некоторых небесных тел.

Все выше названные предположения и гипотезы связывали возникновение магнитного поля с движением электрических зарядов. Однако ряд исследователей делали попытки найти другие причины возникновения магнитного поля, не связанные явно с последними. Так, Вильсон в 1923 г. допускал возможность возникновения магнитного поля вследствие движения масс по аналогии с возникновением магнитного поля вокруг движущихся электрических зарядов.

Было получено выражение для магнитного момента и магнитного поля на полюсе, для однородного вращающегося сфероида. Как следствие, из этой модели вытекало существование магнитного поля у масс, движущихся прямолинейно.

Сванн в 1927 г, введя произвольную модификацию уравнений электродинамики, получил два выражения для магнитного поля на поверхности вращающегося сфероида. По одному из этих выражений напряженность магнитного поля была пропорциональна первой степени массы и радиусу сфероида и четвертой степени его угловой скорости вращения. Неизвестный коэффициент пропорциональности был получен в результате применения этого выражения к магнитному полю Земли.

В 1928 Сванн и Лонгакаакр провели эксперимент с медным шаром радиусом 20 см, вращающимся со скоростью 200 об/с. Согласно формуле Сванна магнитное поле должно было составлять величину порядка $5 \cdot 10^{-3}$ Гаусс. Однако, используя прибор с чувствительностью 10^{-4} Гаусс, они не обнаружили магнитного поля.

Блекетт в 1947 г., используя аналогию и размерный анализ, предложил другое выражение для сфероида. Он рассматривал свою формулу как фундаментальный закон, однако не предлагал механизм возникновения магнитного поля.

Тем не менее, формула Блекетта согласовалась с величиной магнитного поля Солнца, Земли, и Магнитных Звезд, известных к тому времени. Это подвигнуло ученых на проведение в 1952 г. лабораторного эксперимента, в котором массивный цилиндр из золота радиусом 5 см, высотой 10 см и массой 15 кг, покоящийся относительно лабораторий в Манчестере, рассматривался вращающейся вместе с Землей вокруг ее оси в мировом пространстве. Прибор с чувствительностью 10-10 Гаусс дал отрицательный результат, который легко объяснялся формулой Вильсона-Блекета, предсказывающей величину эффекта порядка 10^{-15} Гаусс.

Эльзассер и Булард (1946, 1947, 1949) для объяснения возникновения магнитного поля вращающихся тел предложили «теорию динамо», которая предполагает процесс электрической индукции в жидких проводниках. Это позволяет рассматривать самогенерацию электрических токов, связанных с магнитными полями, компенсирующими таким образом омические потери. Необходимая механическая энергия для перемещения жидкого проводника должна происходить из внутреннего источника, например тепловой энергии, связанной с радиоактивностью.

Люшак в 1951 г., проанализировав теорию Вилсона и Сванна, показал, что эти теории не являются ковариантными. Он предложил ковариантную релятивистскую теорию, обобщив уравнения Максвелла таким образом, что туда вошло и гравитационное поле. Такой результат получается при записи уравнений Максвелла в пятимерном пространстве, что позволяет ввести 9 новых физических величин, описывающих гравитационное поле.

Впервые наиболее близко к экспериментальному подтверждению эффекта «намагничивания вращением» неферромагнитных материалов подошел Б. В. Васильев в 1984 г. в Дубне. По своей идее, его опыты были близки к тем, которые задумал и провел П.Н. Лебедев. Экспериментальная техника претерпела качественные изменения: для исключения влияния геомагнитного поля Лебедев пользовался компенсирующими катушками Гельмгольца, а Васильев к этому добавлял сверхпроводящий экран; измерение магнитного потока осуществлялось при помощи высокочувствительной магнитометрической аппаратуры (СКВИД), запись и обработка результатов измерений были автоматизированы. Однако и в этом случае достигнуть полного исключения

магнитного поля в рабочем объеме затруднительно. Возможно, в процессе эксперимента возникало «паразитное» магнитное поле, которое маскирует изучаемый эффект. По мнению самого Б.В. Васильева его установка позволяет обнаружить эффект, но для его количественного изучения следует добиваться дальнейшего увеличения чувствительности: после первых опытов 1984 г. установка была модернизирована, но и следующая серия измерений не устранила сомнений в количественной стороне полученных ранее результатов.

Выше указывалось, что вопрос возникновения магнитного поля при вращении изучается не только для объектов лабораторного масштаба, но и для объектов космического масштаба. К числу последних, в первую очередь привлекших внимание исследователей, относится, несомненно, Земля и Солнце.

Изучению природы геомагнетизма уже много лет уделяется большое внимание. В 1724 г. после того как была основана Петербургская Академия Наук, уже на первом ее заседании земной магнетизм был отнесен к разряду важнейших наук. Многие из членов Академии Наук с особым интересом изучали магнитное поле Земли, среди них такие знаменитые, как Эйлер и Ломоносов.

Эйлер был одним из первых, кто с помощью математических формул стремился строго рассчитать распределение магнитного поля вокруг Земли.

М.В. Ломоносов считал Землю магнитом, но в отличие от мнения Гильберта не везде одинаково намагниченным, а составленным из множества магнитов, имеющих различную силу и незакономерно ориентированных, поэтому он полагал, «что без многих и верных наблюдений каждого места общая картина о переменах магнитной силы утверждена быть не может».

Прежде чем ознакомиться с перечнем выдвинутых гипотез о происхождении геомагнетизма надо перечислить некоторые важные свойства геомагнитного поля, обнаруженные до настоящего времени. Земля себя ведет как большой сферический магнит, окруженный магнитным полем. Геомагнитное поле, в общем, похоже на магнитное поле, созданное дипольным магнитом (т. е. стержнем с южным и северным полюсом), находящимся в центре Земли. Широко известно, что магнитные полюса не совпадают с географическими полюсами. Дипольная ось склоняется относительно оси вращения Земли на 11 градусов. Элементы земного магнетизма: чтобы определить магнитное поле в какой-то точке земного шара, мы должны измерить направление и напряженность поля. Параметрами, описывающими направление, являются склонение(D) и наклонение (I). D и I измеряется в градусах. Напряженность (F) поля определяется величинами горизонтальной (H), вертикальной (Z) компонентами, и северной (X) и восточной (Y) компонентами горизонтальной напряженности. Напряженность магнитного поля Земли 25000 - 65000 наноТесла - нТл (0.25-0.65 Эрстед). Магнитное поле Земли в разных точках различно и оно так нерегулярно, что для получения удовлетворительной картины его конфигурации его измерения приходится проводить во многих точках, что и делается на почти двухстах магнитных обсерваториях. Магнитные полюсы и магнитный экватор медленно изменяются. Существует два вида магнитных полюсов — наблюдаемые (surveyed), где измеряемое магнитное поле вертикальное и моделированное, где вертикальным является вычисленное магнитное поле Земли. В действительности наблюдаемое магнитное поле нормально к плоскости касательной к Земле не в единственной точке, скорее всего можно говорить, что это область, где существует много наблюдаемых магнитных полюсов. Согласно обследованию, проведенному (1990) «Канадской Геологической службой наблюдения» и «Океанографическим Штабом Военно-морских Сил США», наблюдаемые полюса: 78.5° северной широты и 103.4° западной долготы, около Острова Эллеф Рингнес, Канада; и 65° южной широты и 139° восточной долготы, в заливе Содружества, Антарктида. Согласно IGRF (Международное Геомагнитное Поле Отсчета) точки нахождения моделированных полюсов: 79.0° северный широты и 105.1° западный долготы; и 64.7° южный широты и 138.6° восточный

долготы. Магнитное поле Земли является суммой нескольких магнитных полей, индуцированных разными источниками. Важнейшие из них: а) магнитное поле, порождаемое жидкой внешней короной ядра Земли, б) намагниченные горные породы в земной коре, в) поле, возникающее вне земного шара в ионосфере и магнитосфере, г) магнитное поле, порождаемое токами, текущими в земной коре под влиянием внешних вариационных полей и д) магнитные эффекты океанского тока. Надо отметить, что 90% геомагнитного поля порождается жидкой внешней короной ядра Земли. Магнитное поле Земли постоянно изменяется. И почти невозможно предсказать каково, оно будет в какой-то точке земного шара в будущем. С помощью регулярных измерений поля можно понять характер его изменения с течением времени. Используя эту информацию, можно создать математическое представление о доминирующем магнитном поле Земли и об его изменении. В этой связи создаются различные модели магнитного поля. Палеомагнитные данные показывает, что геомагнитное поле усиливается, ослабляется и часто изменяет полярность, т. е. северный и южный полюс меняются местами. Некоторые ученые даже считают, что не магнитная ось движется относительно Земли, а Земля движется относительно магнитной оси.

Очевидно, что существенное влияние на геомагнетизм оказывает структура внутреннего строения Земли. По данным современной науки внутреннее строение Земли представляется следующим образом: кора, составляющая 1% массы Земли, содержит в основном Al, Si и O. Верхние слои коры — это окаменевшие осадочные породы, толщиной до 15-20 км. Далее следует второй слой зоны, состоящий из кристаллических пород — гранитов, диабазов, базальтов, имеющий мощность от 8 до 50 км. Зона плохо проводит электрический ток. Мантия Земли находится на глубине от 50 км до 2900 км. Она состоит главным образом из Mg-Fe, Si, O и составляет 70% массы Земли. В этой зоне температура повышается до 3000° К. Электропроводность вещества зоны такая же, как у металлов. Ядро Земли состоит главным образом из Fe и в небольших количествах содержит Ni и S. Ядро имеет радиус около 3500 км (2900км-6370км), почти размер Марса. Верхняя часть ядра жидкая, а сердцевина ядра — это твердый раскаленный до 5000-6000К шар радиусом около 1200 км. Электропроводность ядра заметно больше, чем мантии.

В ряде работ продемонстрированы различные подходы к решению вопроса физической природы геомагнетизма. За последние 100 - 150 лет было предложено много гипотез, казавшихся сначала более или менее правдоподобными. Но вскоре становилось ясно, что вывод большинства из них или противоречит ряду наблюдаемых фактов, или простой расчет показывал несостоятельность принятых предположений. Среди выдвинутых гипотез были и такие, которые для обоснованной оценки требовали более глубокого теоретического анализа или проведения тончайших, трудоемких экспериментов.

Все выдвинутые гипотезы можно разделить на две группы: одна из них связана с рассмотрением внутренних причин возникновения магнитного поля Земли, и вторая группа гипотез связана с рассмотрением внешних причин.

Вначале мы упоминали, что Гильберт предполагал, что именно Земля порождает действующий вокруг нее магнетизм. Автор важнейшей для геомагнетизма книги «Общая теория земного магнетизма», изданной в 1839 г. Карл Фридрих Гаусс, так же утверждал, что наблюдаемое на поверхности нашей Земли магнитное поле почти полностью обязано источникам, расположенным где-то внутри Земного шара.

На заседании Парижской Академии Наук французский академик Андре Ампер сказал: «Простая мысль, которая могла естественно возникнуть у того, кто хотел бы объяснять постоянное направление магнитной стрелки с юга на север, это предположить в Земле электрические токи». Эта мысль была высказана, когда наука о происхождении геомагнетизма делала лишь первые шаги. Вслед за ним было выдвинуто много «электрических» гипотез о происхождении магнитного поля Земли.

Но они не были приняты, так как не могли объяснить большинство уже известных фактов изменений геомагнитного поля.

В 1835 г. профессор Казанского университета Иван Михайлович Симонов опубликовал свой труд «Опыт математической теории земного магнетизма», в котором строго доказал, что геомагнитное поле в общих чертах подобно полю особого магнита, расположенного в центре Земли. Расстояние между полюсами такого магнита считается бесконечно малым, и поэтому он получил специальное наименование — магнитный диполь, а его поле названо дипольным. Симонов показал, что магнитное поле диполя совпадает вне земного шара и на его поверхности с полем однородного его намагничивания, т. е. с суммарным магнитным полем одинаково намагниченных частиц, занимающих весь объем Земли.

Постепенно ученые начали приходить к мысли, что при объяснении геомагнетизма необходимо учитывать сложную структуру внутреннего строения самой Земли. Американский геофизик Вальтер Эльзассер учел особенности строения Земли - наличие в ее ядре жидкого металлического слоя. В 1939 г. он предложил гипотезу, согласно которой горячая жидкая масса ядра, благодаря разности температур в нижней и верхней его частях, - образует огромные вихри, вращающиеся первоначально в вертикальных плоскостях. Под действием сил Кориолиса вихри изменяют свое положение в пространстве и устанавливаются в плоскостях, почти перпендикулярных к земной оси. Между верхними и нижними участками вихревых колец существует значительная разность температур. Поэтому в этих кольцах должна возникать электродвижущая сила, порождающая термотоки.

Но, такая электродвижущая сила может появляться только в том случае, если в замкнутом проводящем кольце имеются участки, неодинаковые по своим физическим свойствам. Кроме того, эта гипотеза не может объяснить ранее упомянутые факты резких изменений направления геомагнитного поля, как раньше упомянуто, многократно происходящих за всю историю нашей планеты.

Существует гипотеза дрейфующих токов, в основе которой лежит предположение о существовании свободных частиц внутри земного шара и их потоков, возникающих благодаря наличию высоких температур. Гипотеза радиальной электронной поляризации земного шара, основанная на предположении, что электроны в атомах, благодаря центробежным силам, обусловленным вращением Земли, смещаются по отношению к центрам атомов, полагаемых несмещающимися. Гипотеза о поляризации вещества под действием гравитационного поля, порождаемого массивным телом, предполагает, что ядро и внутренние электронные оболочки должны смещаться в направлении центра тяготения, так что объемная усреднения плотность заряда должно быть положительной, а плотность поверхностных зарядов — отрицательной.

В 1831 г. вышла работа английского физика М. Фарадея, в которой он описал ставшие теперь классическими эксперименты, открывшие новую главу электродинамики. В этих экспериментах он обнаружил единство и взаимосвязь электрического и магнитного полей, здесь мы впервые встречаемся с качественно новым объектом — электромагнитным полем. Один из этих экспериментов: в металлическом диске, вращающемся в постоянном магнитном поле, возникает разность потенциалов между центром и периферийной частью. Если прижать щетки к оси и периферийной части, то в контуре появится ток, который создает магнитное поле. Оно при соответствующем направлении витков усилит поле, пронизывающее диск, что приводит к росту разности потенциалов между щетками, а, следовательно, к увеличению тока и суммарного магнитного поля: начальное поле + вторичное поле. Такое устройство называется «динамо диск Фарадея» или просто «динамо». (Фарадей пришел к выводу, что при всяком пересечении проводником линий магнитной индукции, - в последнем появляется индукционный ток, причем протекший заряд пропорционален числу пересеченных силовых линии и обратно пропорционален электрическому сопротивлению проводника). Одна из гипотез о

геомагнетизме сравнивается с динамо, и это дало основание назвать её «гипотезой динамо-эффекта», или «традиционной теорией динамо». По этой теории, во внешней короне ядра Земли движется жидкое железо в уже существующем слабом магнитном поле и генерирует ток. Этот ток в свою очередь создает вторичное магнитное поле. Эти два поля складываются.

Исследования, посвященные динамо-генерации магнитных полей небесных тел, весьма многочисленны. Первые указания на возможность такой генерации принадлежат Дж. Лармору. В СССР такая гипотеза была высказана в 1947 г. Яковом Ильичом Френкелем.

Среди моделей возникновения магнитного поля Земли, связанных с традиционной теорией, динамо занимают сильные позиции. Как написано в британской энциклопедии: «Наблюдения магнитного поля Земли указывают, что 90% этого поля возникает от источника, находящегося внутри этой планеты. Предложены различные механизмы возникновения такого поля, но в настоящее время только геомагнитное динамо серьезно рассматривается в качестве основной причины».

Для некоторых частных случаев было найдено, что классический динамо-эффект не может объяснить природу геомагнетизма. Американский астрофизик Э. Паркер предложил принять, что генерация геомагнитного поля обусловлена наличием в проводящей жидкости земного ядра огромного числа мелкомасштабных вихрей. Модель детально было изучена немецким ученым Максом Штеенбеком и его сотрудниками. Они теоретически показали и экспериментально подтвердили правомерность такой модели. Кроме того, они сумели на основании этой модели объяснить, что может вызывать инверсию геомагнитного поля.

Еще об одной гипотезе, относящейся к внутренней причине возникновения геомагнетизма, можно прочитать в труде Б.М. Яновского «Земной магнетизм», о "гипотезе разделяющихся зарядов". По этой гипотезе магнетизм планет и звезд — хотя бы частично обязан тому, что в этих небесных телах происходит перераспределение зарядов: электроны вытесняются в приповерхностную область, так что внутренняя часть оказывается заряженной положительно. Движение этих перераспределившихся зарядов вместе с вращающимся телом и порождает магнитное поле. Перераспределение зарядов может вызываться и химическими неоднородностями и температурными градиентами, и другими факторами, рассматривавшимися различными авторами. Т. е. перераспределение зарядов может возникать благодаря наличию градиентов различных параметров, определяющих состояние среды. Из этих параметров в труде В.И. Григорьев, Е.В. Григорьева выделено «давление». Авторы считают, что если какой-то объект химически однороден, все его участки имеют одинаковую температуру и другие параметры всюду одинаковы, но давление распределено неоднородно, в таком случае даже при равновесии имеет место перераспределение зарядов: электроны оказываются вытесненными из области больших давлений в области, где внутренние напряжения меньше. Такой эффект называется «бароэлектрическим эффектом (БЭ)».

Если кроме давления и другие параметры объекта меняются от точки к точке, то на БЭ наслаиваются, конечно, и другие эффекты; однако для некоторого круга задач БЭ является доминирующим.

Однако существуют гипотезы, относящиеся к внешней причине возникновения геомагнетизма. Одна из них — «внешняя теория динамо». Ранее говорилось, что по традиционной теории динамо магнитное поле обязано источникам, расположенным где-то внутри Земного шара, однако начало развития космических исследований дали новые доказательства возможности существования ещё одного альтернативного источника для модели динамо. В 1958 возник новый термин в понятии земного магнетизма, «магнитосфера»: область заряженных частиц вокруг небесного объекта, в которой удерживаются заряженные частицы его магнитным полем. В 1958 г. были открыты радиационные пояса Ван Аллена, которые являются альтернативным источникам для

усиления мощности поля в модели динамо. В результате этого открытия появилась новая теория возникновения магнитного поля Земли: «внешняя теория динамо». Полная теория внешнего динамо очень сложная. Компоненты «внешнего динамо»: поток заряженных частиц высокой энергией от Солнца, радиационные пояса Ван Аллена и сама Земля. Система получает энергию от потока заряженных частиц, переносимых солнечным ветром к Земле. Радиационные пояса генерируют магнитные силовые линии, которые захватывают заряженные частицы и заставляют их двигаться между северным и южным магнитным полюсами Земли. Однако не все заряженные частицы участвуют в этом движении, а формируют «плазменный диск». Этот плазменный диск находится в плоскости магнитного экватора. Так как диск вращается вместе с Землей, магнитные силовые линии взаимодействуют с ним, что порождает ток и в результате чего возникает более интенсивное магнитное поле.

Однако Земля не единственная планета, имеющая магнитное поле. Космические исследования показали, что у большинства планет солнечной системы есть магнитные поля. Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун имеют существенные магнитные поля; а Меркурий и Марс имеют очень слабое магнитное поле, Венера возможно вообще не имеет магнитного поля. Считается, что Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун имеют магнитные поля благодаря системе динамо, хотя они не имеют железного ядра. Напряженности магнитных полей планет сильно отличаются друг от друга. Так, например, Меркурий — 310 нТл, Сатурн — 22000 нТл, Уран - 23000 нТл и Юпитер 428000 нТл. Магнитная ось Земли очень близка к оси ее вращения. Такая близость между магнитными осями и осям вращения планеты найдена для Юпитера и Меркурия. У Сатурна магнитная ось и ось его вращения совпадают и также совпадают плоскости его магнитного и географического экваторов. Четыре планеты солнечной системы: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун имеют магнитные поля, сравнимые с магнитным полем Земли, хотя их внутреннее строение сильно отличается от строения Земли. Это означает, что гипотезы возникновения магнитного поля планет не должны непосредственно базироваться на особенностях их внутреннего строения.

Что касается магнетизма Солнца, то здесь следует упомянуть работу Американского астрофизика Э. Паркера, который использовал эффект «вмороженности» магнитного поля в веществе для объяснения происхождения магнитных полей на Солнце. Согласно ему, генерация магнитного поля на Солнце обязана не регулярному турбулентному движению солнечной плазмы .

Все выше изложенное, строго говоря, не является полноценным обзором по рассматриваемой проблеме, а лишь кратким перечнем основных результатов и имён. Однако приведенные здесь данные о результатах научных исследований ясно показывают, что проблема возникновения магнитного поля у вращающихся объектов далека от своего решения. Необходимы дальнейшие более глубокие исследования, как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. По нашему убеждению эти исследования должны базироваться на результатах исследования простейших теоретических и экспериментальных моделей в классической нерелятивистской области. Мы надеемся, что дальнейший учет квантовых и релятивистских эффектов даст лишь малые поправки к результатам, полученным на этих простейших моделях.

В работах автора обзора продолжается анализ одного из возможных механизмов возникновения магнитного поля у вращающихся объектов. Автор берет две модели: а) модель лабораторного масштаба и б) модель космического масштаба.

В качестве модели лабораторного масштаба берется тонкий металлический диск, покрытый идеальным изолятором, чтобы избежать обмена электронами с внешней средой. Кристаллическая решетка считается абсолютно твердой (не деформируется под влиянием центробежных сил). Кинематическая теория электропроводимости металлов (твердых тел) основывается на гипотезе, что электроны перемещаются свободно между ионами кристаллической решетки, по отношению к которой «свободные электроны» ведут себя

как «газ» (электронный газ). Однако эти электроны, перемещающиеся по кристаллической решетке вследствие теплового движения, остаются, тем не менее, в сфере электрического влияния ионов. Если на электроны проводимости не действуют никакие силы, кроме сил электрического взаимодействия с ионами, то в любой достаточно малой области вещества диска остаются электрически нейтральным.

Ситуация меняется, когда на электроны начинают действовать дополнительные силы. Ввиду того, что электроны подвижны, возникает распределение плотности, зависящее от характера дополнительных сил.

Совокупность валентных электронов рассматривается как идеальный классический газ, подчиняющийся распределению Больцмана. При вращении диска происходит смещение свободных электронов под действием центробежных сил. При смещении электронов возникает радиальное электрическое поле направленное против центробежных сил. Смещенный (нескомпенсированный) аксиальный симметричный заряд вследствие вращения диска порождает совокупность аксиально-симметричных круговых токов, плотность которых зависит от радиуса. Эти токи, в свою очередь, порождают аксиально-симметричное магнитное поле, которое своим действием (сила Лоренца) влияет на распределение смещенных зарядов. Таким образом, задача отыскания плотности смещенных зарядов есть самосогласованная задача о распределении плотности, возникающей вследствие совместного действия 3-х типов сил: центробежной силы, собственной электрической силы и силы собственного магнитного поля.

В качестве модели космического масштаба авторы берут металлический химический однородный шар массы порядка массы Земли. При этом также как и в случае с моделью лабораторного масштаба, считается, что не происходит обмена зарядами с внешней средой. Как и в случае с моделью лабораторного масштаба, автор считает, что кристаллическое вещество, составляющее шар, - недеформируемое. Распределение плотности свободных носителей заряда в этой модели в общем случае зависит от гравитационных (сферических симметричных) сил, направленных к центру шара, от центробежной аксиально-симметричной силы, направленной от оси вращения, и от сил собственного электрического и собственного магнитного полей, направление которых зависит от фактически сложившегося распределения зарядов.

Таким образом, в случае массивного гравитирующего шара для отыскания плотности смещенных зарядов должна быть решена самосогласованная задача, учитывающая влияние на их распределение одновременно гравитационной, центробежной, электрической и магнитной сил.

На данном этапе исследований автор сознательно не рассматривает возможность влияния на распределение смещенных зарядов и создаваемое магнитное поле таких эффектов, как бароэлектрический эффект, дифференциальное вращение и т.д.

Теория динамо (Джекобс, 1979; Паркинсон, 1986). Теория возбуждения земного магнитного поля механизмом динамо восходит ещё к Лармору. В 1919 г. он высказал предположение о том, что магнитное поле Солнца может создаваться механизмом, подобный механизму самовозбуждающегося динамо. В дальнейшем основополагающие работы по теории динамо выполнили Эльзасер и Буллард. Жидкое ядро Земли является хорошим проводником электрического тока, причем взаимодействие механических движений жидкой среды и электрических токов может создавать самоподдерживающее магнитное поле. Действие подобного динамо невозможно наблюдать в лабораторных условиях. Если чашку со ртутью подогреть снизу, в ртути будет развиваться тепловая конвекция, однако при этом не обнаруживается никаких электрических или магнитных явлений. Этот модельный эксперимент оказывается неудачным потому, что электрические и механические процессы имеют в данном опыте различные характерные времена. В чашке со ртутью диаметром 30 см электрический ток должен иметь время релаксации

порядка 0.01 с. Однако, поскольку время релаксации увеличивается как квадрат диаметра, электрический ток в земном ядре должен существовать в течение 10 тыс. лет. Этого времени более чем достаточно для того, чтобы электрический ток и связанное с ним магнитное поле могли, хотя и медленно, изменяться и усиливаться за счет механических движений в жидкости.

Даже если энергии источников, находящихся внутри земного ядра, достаточно для поддержания поля, остается решающая проблема знака, т.е. необходимо ещё показать, что индукция будет регенерировать первоначальное поле. Существующие в технике динамомашины весьма неоднородны, содержат роторы, статоры, провода и т.п., тогда как жидкое ядро Земли обладает простой электрической связью и по существу однородно и изотропно. Следовательно, можно предположить, что любой механизм динамо, возможный в проводящей жидкости, должен быт в некотором смысле короткозамкнутым. Однако совершенно не очевидно, что такое однородное динамо может работать при любых условиях.

Действительно, в 1934 г. Каулинг показал, что магнитное поле, обладающее осью симметрии, не может создаваться действием динамо. А протяжении многих лет этот результат ошибочно истолковывали как утверждение, что осесимметричное динамо не может генерировать магнитное поле. В дальнейшем было показано, что при определенных условиях это неверно. Ограничения, налагаемые теоремой Каулинга (и её некоторыми обобщениями), вызывали одно время опасения, что в действительности динамо не может возбуждаться ни при каких условиях: вдруг существуют некоторые, более общие теоремы каулинговского типа, запрещающие действие динамо. Это оказалось не так. Результаты, полученные Каулингом, были дополнены исследованиями Бэкуса и Чандрасекара. В настоящее время принято считать, что механизмы однородного динамо должны обладать низкой степенью симметрии. Были получены и другие теоремы для сферы, запрещающие определенные движения при действии динамо. Некоторые из результатов приведены в таблицах 12.2 и 12.3. По-видимому, большинство типов симметрии должно быть исключено. Некоторые из этих теорем накладывают ограничения на типы возможных движений, другие – на возникающее поле.

Теоремы, запрещающие динамо для стационарных магнитных полей.
Пары полей (**v**, **H**) с*о следующими характеристиками не могут являться решениями кинематической проблемы динамо при условии, что* $\partial H/\partial t = 0$.

Таблица 12.2.

Скорость **v**	Магнитное поле **H**
Произвольная	Осесимметричное
	Двумерное
	Полоидальное
	Тороидальное
Направлена по радиусу и обращается в нуль на границе	Произвольное

Таблица 12.3.

Поле скоростей **v**	Магнитное поле **H**
Тороидальное (в сфере)	Произвольное
Осесимметричное	Осесимметричное
Зависит только от угла оси симметрии **H**	Приблизительно осесимметричное
Малые скорости Rm < 1	Произвольное
Малые скорости деформаций $\partial u_i/\partial x_i$	Произвольное
Произвольное поле скоростей в ограниченном идеально проводящем теле	Поле распространяется за пределы проводника

Динамика ядра определяется силами Лоренца и Кориолиса. Предполагается, что движение в жидкости включает в себя *некоторое дифференциальное вращение*, которое преобразует любое имеющееся дипольное поле в тороидальное поле (см. рис. 5-14). Этот механизм весьма эффективен и представляет собой простой способ усиления поля за счет движений в жидкости: поле может неограниченно расти, при ускорении движений в жидкости. Однако это не решает проблему динамо. Необходимо ещё, чтобы дипольное поле тем или иным способом генерировалось за счет тороидального поля, тем самым завершая цикл, с помощью которого энергия может передаваться полю. Этот второй этап цикла объяснить намного труднее. Часто принимают, что действие силы Лоренца направлено в основном на ограничение дифференциального вращения, а не на подавление других движений, как это предполагается в некоторых современных динамических теориях. В настоящее время известно, что мелкомасштабные изменения скоростей (периодические движения или турбулентность) могут приводить к действию динамо, а возникающие мелкомасштабные изменения магнитного поля могут способствовать значительному возрастанию силы Лоренца. Различными авторами: Бусе, Бэкус, Герценберг, Лоус и Уилкинсон, Рикитаке, Паркер и др., были разработаны многочисленные модели, основанные на преобразовании полоидального поля в тороидальное.

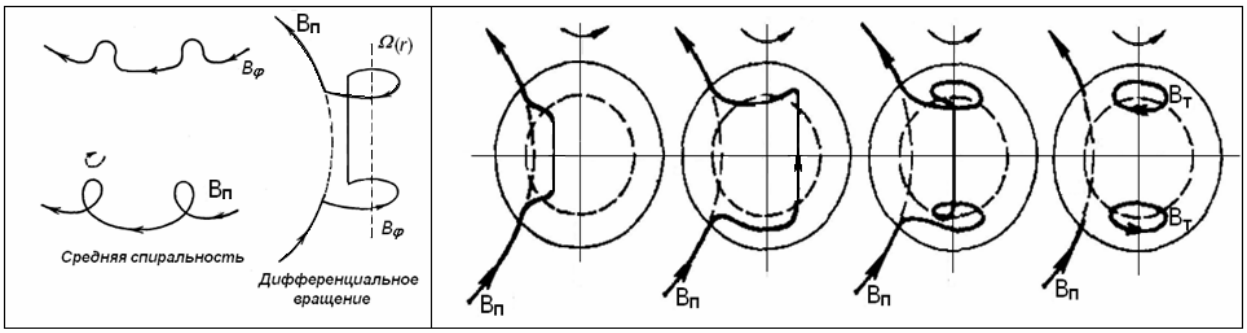


Рис. 12-14. Преобразование полоидального поля в тороидальное.

Уравнения однородного динамо. Проблема однородного динамо включает в себя решение сложной системы связанных уравнений в частных производных. Уравнения разделяются на четыре основные группы:

1. *Электродинамические уравнения.* Сюда относятся уравнения Максвелла, соотношения между различными электрическими и магнитными полями, закон Ома и преобразование, связывающее поля, наблюдаемые в одной системе отсчета, и поля, наблюдаемые в другой системе, движущейся относительно первой.
2. *Гидродинамические уравнения.* Уравнения, выражающие закон сохранения массы и закон сохранения момента количества движения, а также уравнение, определяющее полный тензор напряжений.
3. *Термодинамические уравнения* включают постулат о локальном термодинамическом равновесии, уравнение теплопроводности и уравнение, определяющее вектор теплового потока. Вместе с уравнениями первых двух групп они полностью описывают изменение энергии в рассматриваемой системе.
4. *Граничные и начальные условия*. Принято считать пренебрежимо малыми токи смещения, электростатические и релятивистские эффекты.

Электромагнитные уравнения, обычные уравнения Максвелла:

$$rotE = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \qquad (12.10)$$

$$rotH = 4\pi j, \tag{12.11}$$

$$divH = 0, \tag{12.12}$$

где H и E – векторы напряженности магнитного и электрического полей, а j - плотность электрического тока. Магнитная проницаемость μ и электропроводность σ – константы. Величина полного тока равна:

$$j = \sigma(E + \mu v \times H). \tag{12.13}$$

Применяя оператор rot к обеим частям уравнения12.11 и используя 12.13 и 12.10, можно исключить E и получить уравнение:

$$rotrotH = 4\pi\mu\sigma\left(-\frac{\partial H}{\partial t} + rotv \times H\right). \tag{12.14}$$

Поскольку *rot rot H = grad div H* - $\nabla^2 H$ = - $\nabla^2 H$, в силу уравнения 5.12 получаем:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = rot(v \times H) + \nu_m \nabla^2 H. \tag{12.15}$$

где ν_m – коэффициент магнитной вязкости $\nu_m = 1/4\pi\sigma\mu$.

Уравнения 12.12 и 12.15 определяют соотношения между величинами H и v, которые должны выполняться из электродинамических соображений. Член $\nabla^2 H$ обусловлен затуханием поля. Для действия динамо необходимо, чтобы этот член был скомпенсирован членом *rot* ($v \times H$), описывающим взаимодействие поля скоростей и магнитного поля и препятствующим затуханию последнего.

Если вещество находится в покое, уравнение 12.15 переходит в соотношение, имеющее вид обычного уравнения диффузии:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nu_m \nabla^2 H. \tag{12.16}$$

В этом случае магнитное поле распространяется как диффузия. Если принять L как характерный размер области, через которую течет электрический ток, то время затухания поля имеет порядок $L^2/\ \nu_m$. Для проводников, исследуемых в лабораторных условиях, это время оказывается очень малым: менее 10 с - для медной сферы радиусом 1 м. По оценке Эльзассера, в предположении, что ядро Земли состоит из расплава железа, характерное время затухания составляет порядка 15 тыс. лет (Палеомагнитология, 1979). По оценке Паркинсона (1986), это время может быть на порядок больше (10^5 лет).

Другой предельный случай соответствует предположению о том, что вещество, находящееся в движении, обладает малым электрическим сопротивлением. Уравнение 12.15 в этом случае запишется следующим образом:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = rot(v \times H). \tag{12.17}$$

Это уравнение имеет вид уравнения вихря в гидродинамической теории идеальной жидкости, где показано, что вихревые линии движутся вместе с жидкостью. Поэтому, если магнитное поле удовлетворяет уравнению 12.17, значит - поле изменяется так, как в случае, если бы магнитные силовые линии были «вморожены» в движущееся вещество (рис. 12-14).

Если в правой части (12.15) нельзя пренебречь ни одним из двух членов, то наблюдаются оба эффекта, т.е. магнитные силовые линии переносятся движущейся жидкостью и в тоже время как бы протекают сквозь неё.

L, T и V представляют собой размер, время и скорость, перенос силовых линий будет преобладать над их течением сквозь вещество, если $LV >> \nu_m$. Условие возникновения в жидкости турбулентных течений определяется большой величиной числа Рейнольдса $Re = LV/\nu$ (ν - кинематическая вязкость жидкости). По аналогии можно определить магнитное число Рейнольдса

$$Rm = LV/\nu_m. \tag{12.18}$$

Следовательно, условие преобладания переноса над течением магнитных силовых линий определяется неравенством $Rm >> 1$. Это условие исключительно редко соблюдается в лабораторных опытах. Однако для космических тел, вследствие огромных величин L оно может без труда выполняться. Таким образом, можно полагать, что в планетах и звездах силовые линии «вморожены» в вещество.

Гидродинамические равнения, описывающее движение в земном ядре – уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности. Это уравнение в случае несжимаемой жидкости, когда скорость течения в ядре много меньше скорости звука, записывается в виде:

$$div\, v = 0 \qquad (12.19)$$

Уравнение Навье-Стокса имеет вид:

$$\rho\left\{\frac{\partial v}{\partial t} + (v\cdot\nabla)v + 2(\Omega\times v) - \upsilon\nabla^2 v\right\} - \frac{\mu}{4\pi} rotH\times H = -\nabla p + \rho\nabla W, \qquad (12.20)$$

где v – скорость жидкости в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Ω, p – давление. W – гравитационный потенциал, в который включена центробежная сила, ρ - плотность и υ – кинематическая вязкость. Уравнения 12.15 и 12.20 содержат только векторы v и H и являются основными уравнениями магнитной гидродинамики.

Из-за сложностей уравнений магнитной гидродинамики усилия исследователей были направлены на поиск решения уравнений Максвелла для заданных распределений скоростей. Такой подход составляет проблему линейного кинематического динамо, являющуюся предметом многочисленных исследований. Разложение в ряд по сферическим гармоникам сводит уравнение 12.15 к бесконечной системе дифференциальных уравнений, содержащих радиальные функции для каждой гармоники, их первые и вторые производные по радиусу и первые производные по времени. Однако в этом направлении успехов не было достигнуто, и исследователи переключились на поиски установившихся решений, полагая $\partial H/\partial t = 0$.

Проблема кинематического динамо. Основным вкладом теории кинематического динамо является доказательство того, что должны существовать структуры потока, которые могут генерировать постоянное магнитное поле. Если геометрия структуры достаточно сложна, и она расположена к самовозбуждению, то по определению самовозбуждающееся динамо может существовать. Один из самых простых механизмов такого динамо был предложен Герценбергом. В нем развивается идея Рикитаки о динамо, состоящем из двух дисков (рис. 12-17). Два цилиндра, оси которых перпендикулярны друг другу, вращаются в проводящей жидкости. Поле, которое возбуждается к каждом из них, усиливает поле в другом. Это *единственная схема гидромагнитного динамо, по которой была создана действующая модель*. Однако характер потока, который необходим для работы такого динамо, хотя и не является невозможным в небольшом масштабе, маловероятен в ядре Земли.

Концепция «вмороженных» силовых линий, перемещающихся вместе с движущейся жидкостью, полезна для наглядного представления многих идей из теории динамо. Если ядро испытывает дифференциальное вращение, то оно приводит к «вытягиванию» силовых линий из меридиональной плоскости создавая тем самым тороидальное поле, которое в отсутствии дифференциального вращения оставалось бы полоидальным. Эффект, приводящий к такому преобразованию полей называется «ω-эффектом».

Генерация полоидального поля из тороидального называется «α – эффектом». Представим $j = \sigma\alpha B$, где $\alpha = v\cdot rotv$ – спиральность. Спиральность положительна - для восходящего потока в Северном полушарии и для нисходящего – в Южном, и, наоборот, отрицательна для нисходящего потока в Северном полушарии и восходящего – в Южном. Механизмы, в которых используются оба рассмотренных выше эффекта, называют $\alpha\omega$ -

динамо. Существует класс механизмов, в которых α-эффект используется дважды, это т.н. α^2-*динамо*.

Турбулентное динамо. Принято считать, что поток, пространственный период которого соответствует небольшой длине волны, может генерировать крупномасштабные магнитные поля. Иначе, это означает, что генерация магнитного поля может происходить при мелкомасштабном турбулентном движении жидкости в ядре. При рассмотрении турбулентных сред обычно определяют средние величины и отклонения от них. В зависимости от вида турбулентности усреднение может проводиться или по пространству, или по времени. С теоретической точки зрения преимущество турбулентных динамо состоит в том, что осредненные поля B и v могут быть осесимметричными, поскольку на данный случай не распространяются запреты теорем о невозможности динамо. Теорию магнитной гидродинамики турбулентного потока иногда называют *электродинамикой усредненного поля.*

В модели за счет влияния отклонений от среднего, возникают «турбулентное» электрическое поле, «турбулентная» электропроводность и, соответственно, турбулентная диффузия. Наличие турбулентности уменьшает эффективную электропроводность и увеличивает эффективную вязкость. В этом направлении достигнут определенный успех, однако, *никто ещё не предложил решения, которое могло бы претендовать на отражение действительной ситуации в земном ядре*. Уравнение, которое при этом необходимо решать, это уравнение Навье-Стокса, включающее силы Лоренца и Кориолиса. Эти силы оказывают определяющее влияние на турбулентность и т.п.

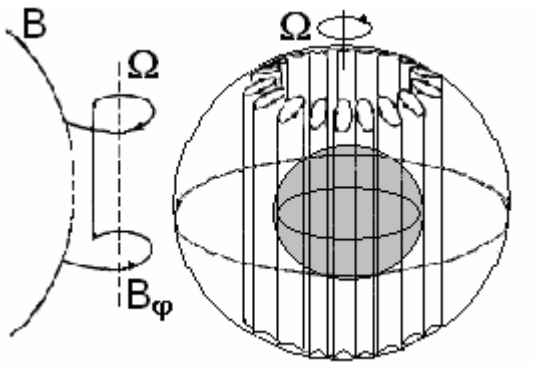


Рис. 12-15. Схема конвекции в быстро вращающейся сфере (Паркинсон, 1986).

К настоящему времени показано, что самовозбуждающееся динамо могут возникать при различных конфигурациях течений (Паркинсон, 1986, с. 165). Почти не осталось сомнений в том, что в основе образования главного поля лежит некоторая разновидность механизма динамо в ядре. При этом *источник энергии остается неизвестным,* однако если предположить, что происходит конвекция, то основное течение, по-видимому, принимает форму конвективных цилиндров, проходящих через внешнее ядро параллельно оси вращения (рис. 12-15). Надежность этих выводов зависит от того, имеется ли тороидальное поле в ядре и какова его напряженность, что неизвестно.

Геодинамо. Модели инверсии. К 40-м гг. прошлого столетия физики признавали три необходимых условия образования магнитного поля планеты, и последующие научные построения исходили из данных положений. Первое условие - большой объем *электропроводящей жидкой массы, насыщенной железом,* образующей внешнее ядро Земли. Под ним расположено внутреннее ядро Земли, состоящее почти из чистого железа, а над ним - 2900 км твердых пород плотной мантии и тонкой земной коры, образующей континенты и ложе океана. Давление на ядро, создаваемое земной корой и мантией, в 2

млн. раз выше, чем на поверхности Земли. Температура ядра также крайне высока - около 5000 ° С, как и температура поверхности Солнца.

Второе требование к работе геодинамо: *необходимость источника энергии* для приведения в движение жидкой массы. Внутренняя энергия отчасти термального, отчасти химического происхождения создает внутри ядра условия выталкивания. Ядро больше разогревается внизу, чем наверху. (Высокие температуры "замурованы" внутри него со времен образования Земли.) Это означает, что более разогретая, менее плотная металлическая составляющая ядра стремится вверх. Когда жидкая масса достигает верхних слоев, она теряет часть своего тепла, отдавая его вышележащей мантии. Затем жидкое железо остывает, становясь плотнее, чем окружающая масса, и опускается. Процесс перемещения тепла путем поднятия и опускания жидкой массы получил название тепловой конвекции.

В 60-х г. прошлого века С. Брагинский (ИФЗ, Москва) предположил, что тепло, выделяемое из верхних слоев жидкой массы, также вызывает расширение внутреннего кристаллического ядра и снабжает конвекцию двумя дополнительными источниками подъемной силы. Затвердение жидкой массы вокруг кристаллического ядра сопровождается выделением скрытого тепла, которое усиливает выталкивание. Кроме того, менее плотные химические соединения, так же как сульфид и окись железа, устремляются из внутреннего ядра наверх, провоцируя конвекцию.

Третье необходимое условие поддержания магнитного поля - *вращение Земли.* Возникающая при этом сила Кориолиса отклоняет движение поднимающейся жидкой массы внутри Земли так же, как она поворачивает океанические течения и тропические циклоны и вихри, перемещения которых видны на космических снимках. В центре Земли сила Кориолиса закручивает поднимающуюся жидкую массу в штопор или спираль, подобно оторвавшейся пружине.

Принято считать, что Земля обладает энергией, достаточной для поддержания конвекции, и силой Кориолиса, закручивающей конвекционные потоки. Данный фактор крайне важен для поддержания работы геодинамо на протяжении миллионов лет. Но нужны новые знания, чтобы ответить на вопрос о том, *как образуется магнитное поле и почему время от времени полюса меняются местами.*

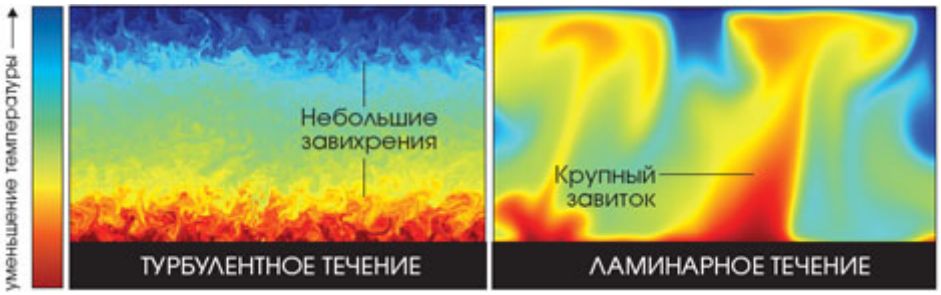


Рис. 12-16. Характер течения в ядре Земли.

Поток внутри расплавленного внешнего ядра Земли по своей сложной структуре напоминает турбулентную конвекцию, создаваемую на двухмерных компьютерных моделях (слева). На трехмерных моделях геодинамо наблюдаются более крупные завитки, присущие ламинарному течению (справа). Обратим внимание на то, что до сих пор *невозможно вычислить трехмерный турбулентный поток, создаваемый внутри ядра.*

Модель инверсии Рикитаки. Инверсии магнитного поля - это смена знака осесимметричного диполя. В 1906 году Б. Брюнес, измеряя магнитные свойства неогеновых, сравнительно молодых лав в центральной Франции, обнаружил, что их намагниченность противоположна по направлению современному геомагнитному полю,

то есть Северный и Южный магнитные полюса как бы поменялись местами. Наличие обратно намагниченных горных пород является следствием не каких-то необычных условий в момент ее образования, а результатом инверсии магнитного поля Земли в данный момент. Обращение полярности геомагнитного поля - важнейшее открытие в палеомагнитологии, позволившее создать новую науку магнитостратиграфию, изучающую расчленение отложений горных пород на основе их прямой или обращенной намагниченности. И главное здесь заключается в доказательстве синхронности этих обращений знака в пределах всего земного шара. В таком случае в руках геологов оказывается весьма действенный метод корреляции отложений и событий. Обращение знака геомагнитного поля, как уже говорилось, не могло быть объяснено в рамках теории однодискового динамо. В 60-х годах нашего века известный японский геофизик Т. Рикитаки предположил, что каждую конвективную ячейку или вихрь в жидком внешнем ядре можно считать как бы одним диском динамо. Модель простейшего двухдискового динамо (рис. 12-17, II) показала, что ток I_1 от диска 1 перетекает в диск 2, генерируя магнитное поле - ток I_2 , от которого, в свою очередь, усиливается магнитное поле около диска 1 (рис. 12-17, III). Токовая (I), а, следовательно, и магнитная переменная колеблются сначала около некоторого стационарного состояния, а затем, увеличивая амплитуду, внезапно начинают испытывать колебания уже вокруг другого стационарного состояния (по Т. Рикитаки). Таким образом, моделируется возможность инверсий магнитного поля.

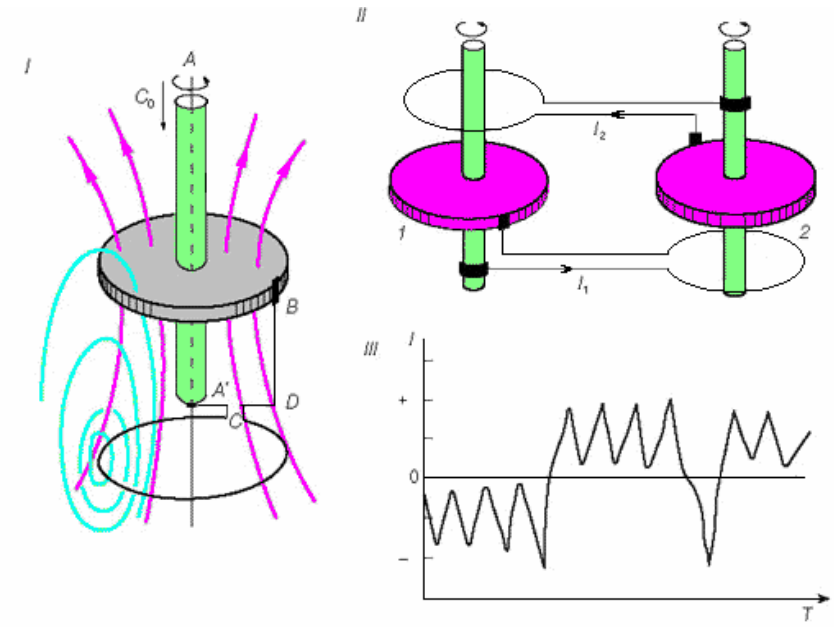


Рис. 12-17. Двухдисковое динамо Рикитаки.

Инверсии турбулентного динамо. Карты магнитного поля. Полученные за последние двадцать лет точные карты геомагнитного поля были сделаны со спутников Magsat (1980), и Oersted (1999). Используя математические методы, исследователи экстраполировали данные спутников на поверхность ядра, исходя из положения, что электрические токи в мантии ничтожно малы. **Магнитное поле**, значительно интенсивнее и сложнее поля ядра, внутри которого и образуются магнитные колебания, **было обнаружено на границе мантии и ядра**. Возникающие в сердцевине электротоки препятствуют непосредственным измерениям его магнитного поля.

Важно, что большая часть геомагнитного поля образуется только в четырех обширных областях на границе ядра и мантии. Хотя геодинамо продуцирует очень сильное магнитное поле, только 1% его энергии распространяется за пределами ядра. Общая конфигурация магнитного поля, измеренного на поверхности, носит название диполя, который большую часть времени ориентирован по земной оси вращения. Как и в

поле линейного магнита, основной геомагнитный поток направлен от центра Земли в Южном полушарии и к центру - в Северном. (Стрелка компаса указывает на северный географический полюс, поскольку рядом находится южный магнитный полюс диполя.) Космические наблюдения показали, что магнитный поток имеет неравномерное глобальное распределение, наибольшая напряженность прослеживается на Антарктическом побережье, под Северной Америкой и Сибирью.

Ulrich R. Christensen считает, что эти обширные участки земли существуют тысячи лет и поддерживаются постоянно развивающейся конвекцией внутри ядра. Могут ли аналогичные явления быть причиной смены полюсов? Историческая геология свидетельствует, что смены полюсов происходили в относительно короткие промежутки времени - от 4 тыс. до 10 тыс. лет. **Если бы геодинамо прекратило свою работу, то диполь существовал бы еще 100 тыс. лет.** Быстрая же смена полярности дает основание полагать, что некое неустойчивое положение нарушает первоначальную полярность и вызывает новую смену полюсов.

В отдельных случаях *таинственная неустойчивость* может объясняться некоторым хаотическим изменением структуры магнитного потока, которое лишь случайно приводит к инверсии. Однако, частота смены полярности, проявляющаяся все более устойчиво за последние 120 млн. лет, говорит о возможности внешнего регулирования. Одной из причин его может быть перепад температуры в нижнем слое мантии, и вследствие этого - изменение в характере излияний ядра.

Некоторые симптомы инверсии были выявлены при анализе карт, полученных со спутников Magsat и Oersted. Gauthier Hulot и его коллеги из Парижского геофизического института отметили, что длительные изменения геомагнитного поля возникают на границе ядра и мантии в тех местах, где направление геомагнитного потока обратно нормальному для данного полушария. Наибольший из так называемых участков обратного магнитного поля протянулся из южной оконечности Африки на запад к Южной Америке. На данном участке магнитный поток направлен внутрь, к ядру, в то время как большая часть его в Южном полушарии направлена из центра.

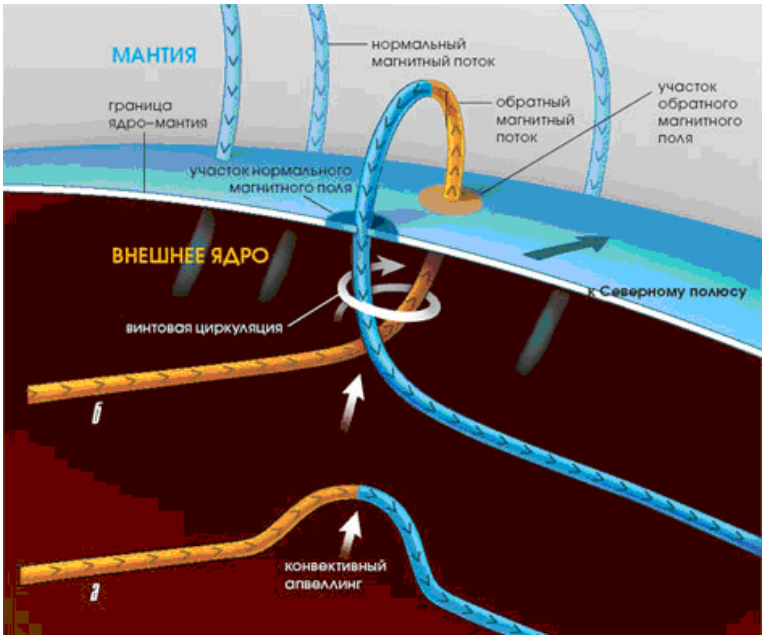


Рис. 12-18. Образование участков обратного магнитного поля

Районы, где магнитное поле направлено в противоположную для данного полушария сторону, возникают при случайном прорыве закрученных и петляющих линий магнитного поля за пределы ядра Земли. Участки обратного магнитного поля могут существенно ослабить магнитное поле на поверхности Земли, называемое диполем, и

свидетельствовать о начале смены земных полюсов. Они появляются, когда поднимающаяся жидкая масса проталкивает горизонтальные магнитные линии вверх в расплавленном внешнем ядре. Такое конвективное излияние иногда закручивает и выдавливает магнитную линию. Одновременно силы вращения Земли вызывают винтовую циркуляцию расплава, которая может затянуть петлю на выдавленной магнитной линии. Когда выталкивающая сила достаточно велика, чтобы выбросить петлю из ядра, на границе ядро-мантия образуется пара участков магнитного потока.

Самое серьезное открытие, сделанное при сравнении последних измерений, полученных с Oersted (1980), заключалось в том, что новые участки обратного магнитного поля продолжают формироваться, например, на границе ядро-мантия под восточным побережьем Северной Америки и Арктикой. Более того, ранее выявленные участки выросли и немного сдвинулись в сторону полюсов. В конце 80-х гг. XX в. Дэвид Габбинс (David Gubbins) из Лидского университета в Англии, изучая старые карты геомагнитного поля, отметил, что распространение, рост и смещение в сторону полюсов участков обратного магнитного поля объясняет снижение силы диполя в историческом времени.

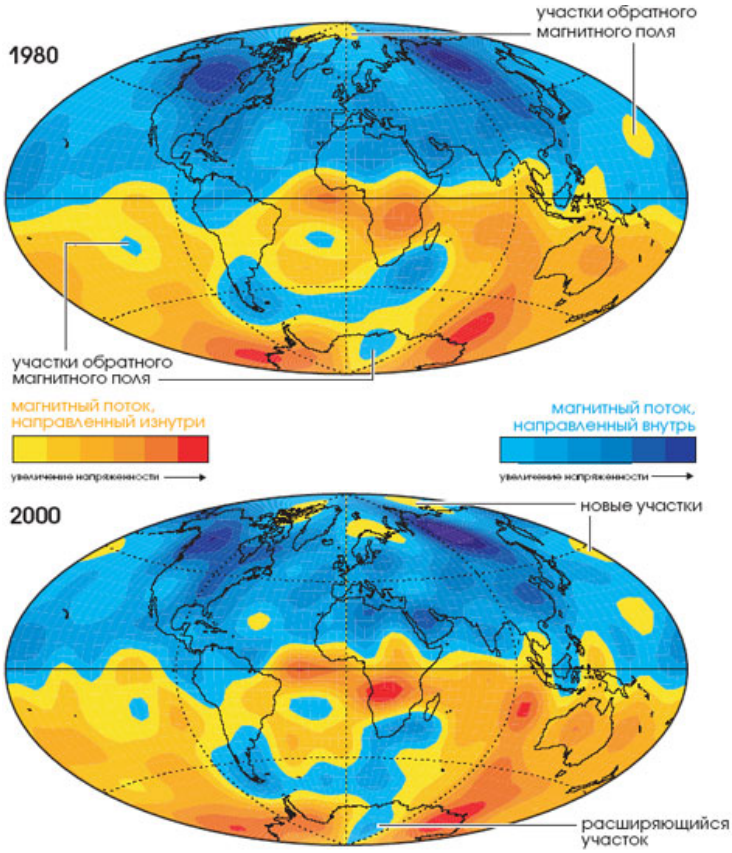


Рис. 12-19. Карты магнитного поля за 1980 и 2000 гг.

Согласно теоретическим положениям о силовых магнитных линиях, возникающие в жидкой среде ядра под действием силы Кориолиса малые и большие вихри закручивают силовые линии в узел. Каждый поворот собирает все больше силовых линий в ядре, усиливая, таким образом, энергию магнитного поля. Если процесс продолжается беспрепятственно, то магнитное поле усиливается бесконечно. Однако электрическое сопротивление рассеивает и выравнивает витки силовых линий настолько, чтобы остановить самопроизвольный рост магнитного поля и продолжить воспроизводство внутренней энергии.

Участки с интенсивным магнитным нормальным и обратным полем формируются на границе ядро-мантия, где малые и большие завихрения взаимодействуют с магнитными полями восточно-западного направления, описываемыми как тороидальные, которые проникают внутрь ядра. Турбулентные жидкостные перемещения могут закручивать линии тороидальных полей в петли, называемые полоидальными полями, имеющими ориентацию север-юг. Иногда закручивание происходит при поднятии текучей массы. Если такое излияние достаточно мощно, то вершина полоидальной петли выталкивается из ядра (см. рис. 12-18). В результате такого выталкивания образуются два участка, на которых петля пересекает границу ядро-мантия. На одном из них возникает направление магнитного потока, совпадающее с общим направлением поля диполя в данном полушарии; на другом же участке поток направлен противоположно.

Когда вращение относит участок обратного магнитного поля ближе к географическому полюсу, чем участок с нормальным потоком, наблюдается ослабление диполя, который более уязвим вблизи своих полюсов. Таким образом, можно объяснить обратное магнитное поле на юге Африки. При глобальном наступлении смены полюсов участки обратного магнитного поля могут разрастаться по всему региону вблизи географических полюсов.

Контурные карты магнитного поля Земли на границе ядро-мантия, составленные по измерениям, сделанным со спутника, показывают, что большая часть магнитного потока направлена от центра Земли в Южном полушарии и к центру в Северном. Но в некоторых районах складывается обратная картина. Участки обратного магнитного поля росли в числе и размерах между 1980 и 2000 г. Если они заполонят все пространство у обоих полюсов, то может произойти инверсия.

Компьютерное моделирование. Чтобы узнать, как участки обратного магнитного поля могут предупреждать о наступлении следующей инверсии, было смоделировано геодинамо на суперкомпьютере. Три группы ученых из различных стран независимо друг от друга разработали цифровые модели магнитных полей, схожих с существующими - на поверхности Земли. На моделях был воспроизведен процесс, показывающий, как на границе ядро-мантия в течение сотни тысяч лет конвекция может создавать участки обратного магнитного поля, которые появляются перед спонтанной сменой полюсов диполя, которую также можно смоделировать.

Моделирование инверсии дает первое представление о том, как могут возникать и развиваться такие переключения. На одной из трехмерных моделей, которая должна была выполняться по 12 часов в день более года, чтобы воспроизвести 300 тыс. лет, начало смены полюсов выразилось как падение напряженности поля диполя. Затем стали появляться участки обратного магнитного поля, похожие на те, что образуются сегодня на границе ядра и мантии. Но вместо того, чтобы погасить магнитное поле совсем, эти участки в переходный период создали слабое поле с разнородной полярностью.

При моделировании смена полюсов диполя на поверхности Земли наблюдалась в то время, когда на границе ядро-мантия участки обратного магнитного поля начинали превалировать над участками с первоначальной полярностью. В целом исчезновение прежней полярности и возникновение новой внутри ядра заняло 9 тыс. лет.

Модели смены полюсов. Современные трехмерные компьютерные модели геодинамо могут воспроизводить инверсию магнитного диполя Земли. Одна из моделируемых смен произошла с интервалом в 9 тыс. лет. Модели с изображением магнитных силовых линий позволят представить смену полюсов.

На картах магнитного поля представлено, как при нормальной полярности большая часть магнитного потока направлена от центра Земли (желтый цвет) в Южном полушарии

и к ее центру (голубой цвет) в Северном. Начало инверсии отмечается появлением нескольких ареалов обратного магнитного поля (голубой цвет в Южном полушарии и желтый в Северном), напоминающих об образовании его участков на границе ядро-мантия. Приблизительно за 3 тыс. лет они уменьшили напряженность поля диполя, которое сменилось более слабым, но более сложным переходным полем на границе ядро-мантия. Смена полюсов стала частым явлением через 6 тыс. лет, когда на границе ядро-мантия стали преобладать участки обратного магнитного поля (в). К этому времени полная смена полюсов проявилась и на поверхности Земли. Но только еще через 3 тыс. лет произошла полная замена диполя, включая ядро Земли.

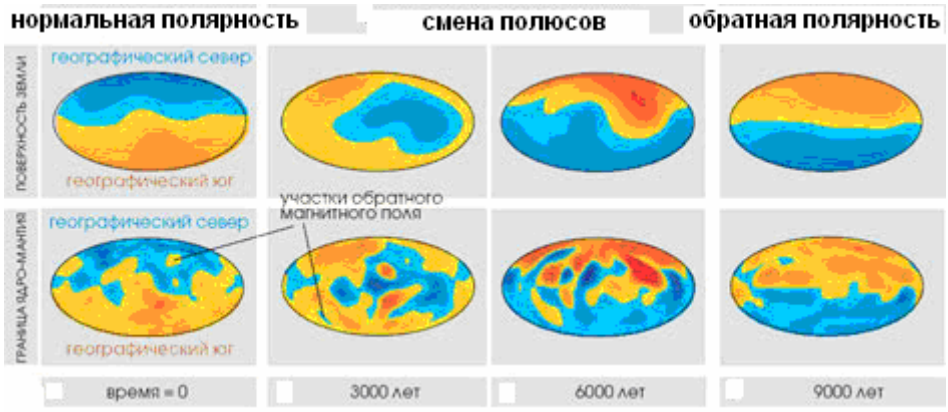


Рис. 12-20. Схема смены полюсов геомагнитного поля.

На модели (рис. 12-21) представлено магнитное поле внутри ядра (пучок силовых линий в центре) и появление диполя (длинные изогнутые линии) за 500 лет (а) до середины инверсии магнитного диполя (б) и спустя 500 лет на этапе ее завершения (в).

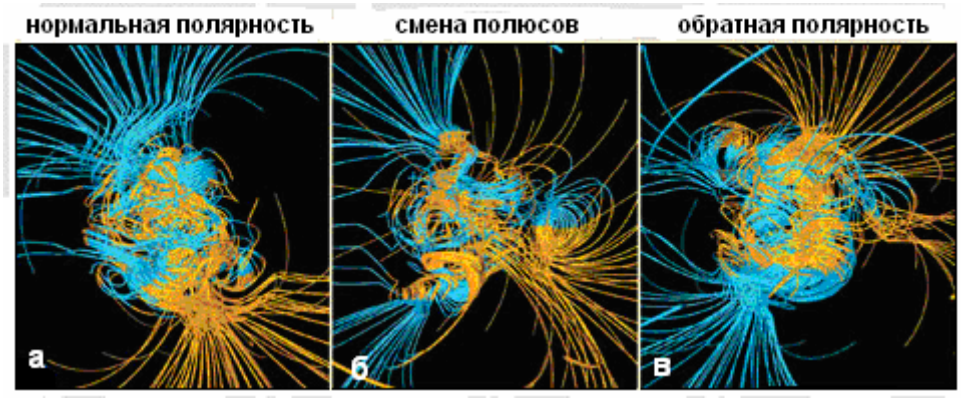


Рис. 12-21. Переполюсовка по Глацмайеру и Робертсу.

Что могло быть не учтено. Насколько достоверно отражают модели *внутреннюю энергетику Земли, никто не знает*. Ни одна модель не воспроизвела турбулентность в недрах планеты, поскольку пока невозможно смоделировать магнитную турбулентность, сохраняя физические параметры в трех измерениях. Вихревые малые и большие движения, закручивающие магнитные силовые линии, измеряются в метрах, а наилучшее разрешение современного компьютера составляет 10 км. Это означает, что все трехмерные компьютерные модели геодинамо до сих пор воспроизводили крупномасштабные ламинарные течения. При изучении некоторых свойств жидкой субстанции ядра для более точного определения турбулентного потока на ламинарной

модели ученые могут воспользоваться большими величинами, которые на самом деле будут слишком малы для цифрового решения. Чтобы получить достоверную картину, исследователи должны использовать двухмерное изображение, однако поток в двухмерной модели не сможет поддерживать работу геодинамо. Моделируемые сегодня ламинарные течения спокойнее, чем турбулентные потоки, вероятно, присутствующие внутри земного ядра.

Лабораторные генераторы динамо. Для того чтобы понять работу геодинамо, необходимо сравнить динамо-машины, созданные на компьютерах и в лабораториях. Первые лишены турбулентности, вторые - конвекции. Впервые лабораторные исследования начались в 60-х гг. XX в., но дорога к успеху оказалась длинной. Слишком велика разница в размерах между лабораторными аппаратами и реальным ядром планеты. Для воспроизводства внутренней энергии в жидкой среде необходимо, чтобы магнитное число Рейнольдса (безразмерная величина) превысило значение, приблизительно равное 10.

Магнитное число Рейнольдса ядра Земли, вероятно, из-за его больших линейных размеров (радиус около 3485 км) составляет 1000. Большое магнитное число Рейнольдса трудно создать в малых объемах жидкой массы, если не добиться высокой скорости ее движения.

В 2000 г. ряд ученых из университетов Германии и Латвии (A. Gailitis. R. Stieglitz, U. Muller, F. Busse) независимо получили самопроизвольное поле в больших объемах жидкого натрия. Обе группы добились высоких скоростей течения в винтообразных трубах длиной 1-2 м и критического значения магнитного числа Рейнольдса около 10. Сейчас многие группы исследователей заняты разработкой следующего поколения генераторов внутренней энергии. Стараясь как можно точнее сформулировать геодинамо, ученые перемешивают жидкий натрий в огромных сферах трехметрового диаметра.

Спутник CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) проводит съемку геомагнитного поля, непосредственно измеряя его изменения в реальном времени на границе ядро-мантия. Ученые рассчитывают в течение пяти лет получить изображение геомагнитного поля, что поможет им в исследованиях участков обратного геомагнитного поля и других признаков ослабевания диполя Земли.

Таким образом, наблюдения со спутника, компьютерное моделирование и лабораторные опыты позволят создать более полную картину работы геодинамо и объяснят смену полюсов. Трехмерные модели, способные отразить турбулентные течения, карты магнитного поля, сделанные со спутников, и лабораторные опыты в области конвекции позволят приблизить разгадку работы геодинамо. Движение жидкости на этих моделях существенно проще, чем турбулентные течения, существующие внутри Земли. *Пока остается неясным, насколько полученные результаты соответствуют действительности.*

12. 5. Местоположение и размер источника генерации геомагнитного поля.

В модели геодинамо дипольный источник геомагнитного поля расположен во внешнем ядре, ближе к границе с мантией, или на самой границе. Вопрос о местоположении источника генерации, как правило, не обсуждается, тем не менее, попытки определить размер источника (глубину его расположения, в долях земного радиуса R), - существуют. Оценить его можно на основании имеющихся данных о структуре геомагнитного поля. Рассмотрим несколько способов оценки размера источника генерации магнитного поля Земли.

Компьютерная модель. В цикле работ Олдриджа (Alldredge, Hurwitz, 1964; Alldridge, Stearns, 1969; Alldridge, 1980; Alldridge, 1987), а так же в работе (Peddie, Zunde, 1987) проводилось компьютерное моделирование геомагнитного поля набором токовых колец

(carrent-loop). Подбиралось оптимальное число колец и радиус их расположения. Во всех этих исследованиях был получен однозначный результат: источник геомагнитного поля располагается на радиусе $x = 0.2\ R$, где R – радиус Земли.

Оценка по размеру диполя. Размер области генерации магнитного поля Земли оценивался Жижимовым (1988) на основе анализа сферических коэффициентов. В этой работе он полагал, что разложение поля по сферическим функциям на поверхности Земли и разложение этого поля по малому параметру, - отношению размера источника к расстоянию до него, эквивалентны. Зная величину малого параметра, можно оценить характерный размер источника, если предположить, что источник генерирует лишь самые низшие мультиполи в виде магнитных зарядов, диполей и квадруполей. При моделировании на четных и нечетных гармониках разложения геомагнитного поля получался один однозначный результат: глубина генерации магнитного поля оказывалась равной 0.2 R.

Оценка по расстоянию между виртуальными геомагнитными полюсами - ВГП. В работе (Кузнецов и др. 1987), посвященной недипольности источника геомагнитного поля, исследовалась зависимость расстояний между различными ВГП и точками, в которых они определялись. Если бы все ВГП попадали в одну точку, то расстояние между ними было бы равно нулю. Если бы расстояния между парами ВГП оказались равными расстояниям между этими же парами точек их определения, то это показывало бы на отсутствие дипольного характера поля. В таком случае, ни о какой дипольности поля нельзя вести речь, т.к. наклон такой прямой был бы равен 45°. В действительности этот угол значительно меньше, что говорит о дипольности геомагнитного поля. Если расстояние между точками определения ВГП принять равным величине земного радиуса, то расстояние между самими ВГП оказывается 0.2 R. Это еще раз подтверждает справедливость нашей оценки.

Оценка по пространственному размеру аномалий. ГМА в нашей модели представляется магнитным диполем. Известно, что если это центральный диполь (его центр на оси вращения Земли), то компоненты его:

$$Z = (2m/4\pi)\times cos\ \theta/r^3\ ;\ H = (m/4\pi)\times sin\ \theta/r^3, \qquad (12.24)$$

где m дипольный момент, а угол θ между точкой на земной поверхности, куда "смотрит" диполь и где Z = max и точкой, в которой мы хотим определить значения поля диполя (см. рис. 12-22). Из этого рисунка следует, что на картах E- и N-компонент геомагнитного поля мы должны наблюдать максимумы и минимумы этих компонент, отстоящих от центра диполя. (Надо сказать, что такие максимумы и минимумы на картах действительно есть). Если нам удастся оценить расстояния (в географических градусах) от центра диполя до максимумов этих компонент, то мы могли бы оценить глубину, на которой происходит генерация ГМА. Нас интересует величина угла θ, однако, для оценки величины x (см. рис. 12-22), мы обязаны пользоваться величиной угла α (в географических градусах). Заметим, что зависимости координат поля диполя ГМА не совпадает с формой центрального диполя. Получим эти зависимости, приравняв радиус Земли единице (R = 1), полагая, что:

$$H_\theta = sin\theta/r^3 = max.$$

и учитывая очевидную зависимость: $sin\theta = sin\ \alpha\ /r$**,** получаем:

$$H_\theta = sin\ \alpha/r^4\ .$$

Угол между векторами H_α и H_θ обозначим как: β ($\beta = \theta - \alpha$), тогда величина H_θ должна быть умножена на: $cos\ \beta = (1 - x\ cos\ \alpha)/r$.

В результате получаем:

$$H_\alpha = sin\ \alpha(1 - x\ cos\alpha)/r^5,\ r = (1 + x^2 - 2\ x\ cos\ \alpha)^{1/2}. \qquad (12.25)$$

Определив по картам E- и N-компонент магнитного поля Земли величины углов α для ГМА и современных ФВХ, получаем среднее значение величины *x*. Она оказывается равной: $x = 0.2\ (\pm 0.1)\ R$.

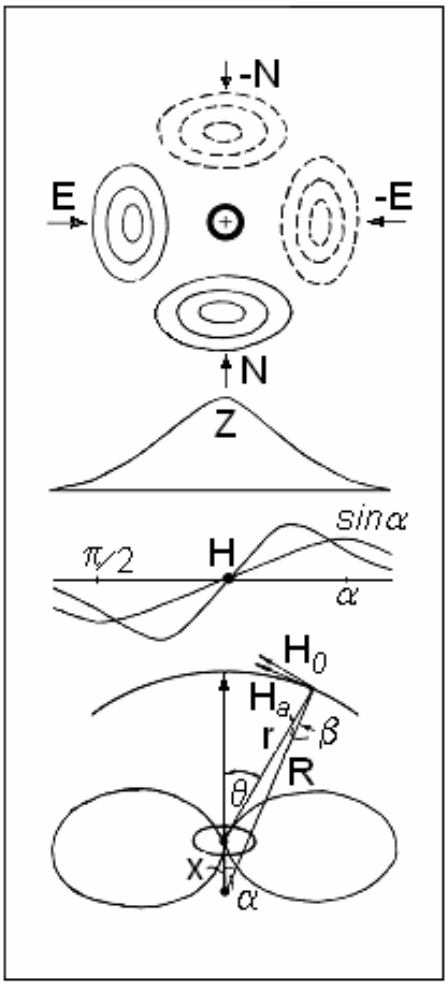


Рис.12-22. Оценка размера источника генерации поля магнитных аномалий.

Моделирование с помощью магнитных диполей и токовых контуров. При моделировании использовался итерационный демпфированный метод Ньютона-Гаусса для минимизации целевой функции. В качестве целевой функции использован усредненный по поверхности Земли квадрат остаточного поля - разностного между модельным и наблюдаемым (Ботвиновский, 2000). Показано, что наиболее оптимальный генератор представляет собой дифференциальную токовую структуру с небольшим расстоянием между круговыми контурами. Получено, что главная (доминирующая) часть магнитного момента Земли создаётся в объёме, непосредственно окружающем внутреннее ядро.

Таким образом, все известные нам способы оценки размера источника дают один и тот же результат: *генерация геомагнитного поля происходит на границе внутреннего ядра.* Этот фундаментальный результат противоречит классической модели геодинамо.

12. 6. Палеомагнетизм.

Магнетизм горных пород (Паркинсон, 1986). Магнитное поле Земли сохраняется и «помнит», каким оно было во время его «записи» в образце горной породы. Способность

запоминать поле обусловлено наличием в горных породах очень распространенного магнитного минерала – магнетита.

Свойства ферромагнетизма объясняется наличием собственного магнитного момента электрона. Величина этого момента составляет $0.3 \cdot 10^{-24}$ А/м^2 или один *магнетон Бора* (фундаментальная единица магнитного момента).

Важнейшим элементом, определяющим магнетизм горных пород, является железо. Оно встречается в минералах в форме окисных ионов железа (Fe^{2+} и Fe^{3+}). По тому, как складываются магнитные моменты, вещества разделяются на *антиферромагнетиков* (антипараллельные моменты скомпенсированы) и *ферримагнетики* (суммарный момент в одном направлении больше, чем в - противоположном).

Полная ориентация дипольных моментов происходит лишь при нулевой абсолютной температуре. При некоторой температуре, определенной для каждого минерала, упорядочение электронных спинов сменяется разупорядочением, и *ферромагнетизм* исчезает, материал становится *парамагнетиком*. Эта температура называется *точкой Кюри*. Соответствующая температура, характеризующая переход «порядок-беспорядок» для антиферромагнетика, носит название *«точки Неля»*.

Явление ферромагнетизма во многом определяется различными видами анизотропии, связанными с кристаллической структурой или формой тела. Наиболее важным видом анизотропии является магнитокристаллическая анизотропия – влияние кристаллической структуры на взаимодействие спинового и орбитального угловых моментов в ионах железа. Этот эффект проявляется в том, что энергия магнитокрасталлографической анизотропии зависит от направления спонтанной намагниченности по отношению к осям кристаллической решетки. Направления с минимальными значениями этой энергии называют *осями легкого намагничивания,* поскольку кристалл легче намагнитить именно в этих направлениях. В отсутствие посторонних влияний, таких как напряжение или внешнее поле, спонтанная намагниченность направлена вдоль одной из осей легкого намагничивания.

Анизотропию создает форма магнитного тела, т.е. форма зерна минерала. Если кристалл намагничен, его форма несколько изменяется, это явление известно как *магнитострикция*. Изменение магнитных свойств под давлением известно как *пьезомагнитный эффект*. Перемещение магнитных доменов в зерне имеет скачкообразный характер процесса намагничивания, известный как *скачки Баркгаузена*.

Когда приложенное поле уменьшается до нуля, доменные стенки остаются в положениях, предпочтительных для доменов, спонтанная намагниченность которых параллельна приложенному перед этим полю. Оставшаяся намагниченность называется *остаточной намагниченностью насыщения*.

Магнитные материалы. Магнитные материалы, играющие существенную роль в геофизике, представляют собой окиси железа и сульфиды железа, содержащие некоторое количество титана: TiO_2, FeO, Fe_2O_3:
Магнетит – (Fe_3O_4), *Титаномагнетит* – (Fe_2TiO_4). *Маггемит* (*гематит*) – (Fe_2O_3). Кроме этого: титаномагнетиты, титаногематиты, пирротины и пр.

Приобретение намагниченности. Остаточную намагниченность образцов горных пород, отобранных в поле, называют *естественной остаточной намагниченностью* (NRM – natural remains magnetization). В зависимости от способа приобретения намагниченности употребляются различные наименования видов намагниченности:
Термоостаточная намагниченность (TRM – thermal remanent magnetization). Изверженные горные породы выходят на поверхность в жидком состоянии при высоких температурах. Температура плавления для большинства горных пород выше точки Кюри магнитных материалов, поэтому магнитные материалы изверженных горных пород при выходе на поверхность находятся в парамагнитном состоянии. При переходе через точку

Кюри в процессе остывания возникает спонтанная намагниченность, однако её направление неустойчиво, пока каждое зерно не остынет до своей блокирующей температуры, при которой возникает эффект «вмороженного» в зерна магнитного поля. Блокирующая температура порядка 250 °С обеспечивает стабильность в течение более чем 10^8 лет.

Седиментационная остаточная намагниченность (DRM – detrital remains magnetization). Процесс намагничивания заключается в том, что зерна магнитных минералов, осаждающихся на дно водоема, стремятся ориентироваться по магнитному полю, существующему в период осаждения.

Химическая остаточная намагниченность (CRM – chemical remains magnetization). Если магнитный минерал образуется в результате химической реакции в магнитном поле, он может приобрести остаточную намагниченность, параллельную этому полю.

Идеальная (*безгестирезесная*) *остаточная намагниченность* (ARM – anhysteretic remains magnetization). Если ферромагнетик подергается воздействию переменного поля одновременно с наложением постоянного поля, то он приобретает стабильную остаточную намагниченность, параллельную и пропорциональную этому постоянному полю. Даже если последнее очень мало. Именно по этой причине при использовании методики магнитной чистки переменным полем необходимо добиваться того. Чтобы приложенное переменное поле не содержало постоянной составляющей.

Вязкая остаточная намагниченность (VRM – viscous remains magnetization). По своей природе это скорее мягкая намагниченность, чем жесткая.

Нормальная остаточная намагниченность (IRM – isothermal remains magnetization). Намагниченность, приобретаемая при низкой температуре после воздействия сильного постоянного поля.

Объекты палеомагнитных исследований (Паркинсон, 1986; Палемагнитология, 1982)**.** Палеомагнитные исследования ведутся на горных породах самого разного состава и происхождения, слагающих осадочные, эффузивно-осадочные толщи, эффузивные и интрузивные комплексы, а в некоторых случаях и метаморфические комплексы и руды. Выбор объекта палеомагнитного изучения целиком определяется поставленной задачей - прямой или обратной. Кроме того, существуют общие требования, ограничивающие класс пригодных для исследования объектов. Эти ограничения вызывают главным образом следующие причины: 1) слабая намагниченность пород, трудноизмеримая с достаточной точностью на современных магнитометрах, 2) плохая сохранность первичной намагниченности, невозможность ее выделения существующими методами или полная потеря намагниченности породами, 3) неполнота палеомагнитной записи в данном объекте. Точность любого палеомагнитного определения обусловливается точностью не только нахождения составляющих древнего геомагнитного поля, но и установления момента, к которому относятся данные, т. е. времени возникновения древней намагниченности. Это время немыслимо узнать без сведений о возрасте самой породы, поэтому объекты палеомагнитного изучения выбирают так, чтобы они имели надежную привязку к геохронологической шкале (чтобы были известны, по меньшей мере, даты начала и конца образования объекта). Если задачей исследования как раз и является определение возраста породы, необходимо иметь надежные эталоны для сравнения, т. е. палеомагнитные данные по объектам с хорошей стратиграфической привязкой.

При решении прикладных геологических задач возможно использование вторичных компонент намагниченности пород. В частности, при изучении локальных и региональных тектонических движений пригодна любая стабильная доскладчатая древняя намагниченность. В ряде случаев, например для датирования верхнего предела возраста складчатости, можно обращаться к послескладчатой

намагниченности. Для изучения же тонкой структуры изменений геомагнитного поля (вековых вариаций и морфологии инверсий) необходимо выделение не только первичной намагниченности, но и ее строго синхронной компоненты. Более того, в этом случае процессом формирования выбранного геологического объекта должна быть обеспечена достаточно подробная и непрерывная палеомагнитная запись.

Таким образом, пригодность объектов палеомагнитного изучения следует оценивать с точки зрения решения прямой и обратной задач палеомагнитологии или конкретной геологической задачи.

Система отбора ориентированных образцов из геологических тел определяется, прежде всего, поставленной задачей и объектами палеомагнитного изучения. Существуют несколько систем отбора:

1. Равномерный отбор образцов по двум-трем полным разрезам (обнажениям). В каждой точке отбирают один - два штуфа породы, из которых изготовляют два-три образца для магнитометрических измерений. Эта система применяется в том случае, если первой задачей исследования является получение возможно более обоснованного среднего направления намагниченности J_n изучаемого тела, а знание точного направления J_n в каждой точке разреза не существенно. Так изучаются однородные осадочные толщи, отдельные пласты, лавовые потоки, пластовые интрузии и дайки. Интервал отбора определяется мощностью геологического тела и минимальным числом требуемых для статистической обработки образцов, которых в каждом обнажении должно быть не меньше 15—20.
2. Подробный отбор образцов по разрезу толщи. Проводится при изучении более детальных последовательностей изменения склонения и наклонения вектора J_n например, для исследования вековых вариаций или геомагнитных инверсий). Через малые интервалы истинной мощности, зависящие от темпа накопления осадка, строго на одном и том же стратиграфическом уровне отбирают не менее трех штуфов, из которых приготовляют не менее восьми ориентированных образцов.
3. Выборочный отбор образцов определенных типов пород. Эта система применяется, если в разрезе толщи только некоторые породы могли сохранить первичную намагниченность; не отличается от первой системы, если благоприятные породы встречаются в разрезе часто. Если для изучения пригодны только немногие пласты, число штуфов из каждого пласта увеличивают, чтобы получить необходимые 15—20 образцов в каждом обнажении.
4. Отбор немногих штуфов в разных местах залегания объекта. Применяется при рекогносцировочных исследованиях. Рационально из каждого штуфа приготовить в лабораторных условиях возможно большее число образцов. При любой системе кроме отбора серийных образцов необходимо составление специальных коллекций, главным образом для изучения происхождения компонент I_n и времени их образования. Берут образцы из складок (5 - 10 штуфов вдоль каждого из двух - трех прослоев в различных точках складки), гальки изучаемых пород в вышележащих отложениях, обожженные породы. Кроме того, нужны образцы на петрографические, минералогические и химические анализы, а также образцы фауны и флоры.

В зависимости от задач исследования каждая система отбора имеет свою специфику. При изучении временных изменений древнего геомагнитного поля применяются первая и вторая системы. Детальность отбора образцов диктуется мощностью разрезов, скоростью осадконакопления и поставленной задачей. При исследовании тонкой структуры изменений древнего геомагнитного поля применяется вторая система отбора. Обычно при решении этой задачи, а также обратной задачи

сверхдетальной корреляции разрезов проводится сплошной отбор образцов (расстояние между центрами образцов по истинной мощности равно высоте образца, т. е. 2,5—5 см); в геосинклинальных разрезах интервал отбора будет большим.

Для решения задач глобальной тектоники отбор проводится по нескольким разрезам (по двум-трем) на площади 100×100 км (в пределах единого жесткого блока). Желательно, чтобы образцы по разрезам были взяты равномерно, что является необходимым условием значимости среднего палеомагнитного направления. Стратиграфические интервалы палеомагнитного изучения здесь определяются временем, для которого выполняются реконструкции (период, эпоха, век и т. д.). Объекты исследований внутри региона следует выбирать так, чтобы свести к минимуму влияние локальной тектоники, локальных магнитных аномалий и других помех. При изучении локальной и региональной тектоники крайне важно проводить отбор образцов по разным крыльям складки, чтобы можно было найти направление доскладчатой намагниченности. Частота отбора образцов по разрезам при исследовании тектоники любого масштаба должна обеспечить такую точность определения средних векторов *Jn** которая необходима для решения поставленной задачи.

Специфику системы изучения геологических тел кроме задачи исследования определяют также происхождение этих тел и условия их залегания.

В вулканогенно-осадочных толщах отбор образцов проводят так же, как и в осадочных толщах. Из лавовых потоков образцы следует отбирать равномерно по плоскостям естественного среза. Так как первичная намагниченность пород лавового потока, как правило, лучше сохраняется в его краевых частях, где, однако, наблюдается значительный разброс направлений /п, для уверенного определения среднего направления *In* потока здесь часто требуется до 15 образцов (штуфов). В интрузивных телах лучше всего проводить отбор образцов по профилям, пересекающим это тело, что дает возможность проследить однородность намагниченности в середине и на периферии объекта. Число образцов из каждого интрузивного тела должно быть не меньше 15—20. В метаморфизованных образованиях наиболее рационален равномерный отбор по нескольким профилям через все тело, чтобы выявить в обнажении участки, где возможно сохранение реликтовой (дометаморфической) намагниченности пород. Число образцов должно обеспечить выполнение всех необходимых анализов для достоверного определения направления древней намагниченности. Образцы керна скважин для решения стратиграфических задач отбирают равномерно по разрезу вскрытой толщи. Шаг отбора такой же, как и при изучении осадочных толщ в обнажениях.

Ориентировка штуфов и изготовление образцов. Палеомагнитология имеет дело с векторными величинами, поэтому образцы для палеомагнитных исследований должны быть ориентированы в пространстве. Для этого выбирают плоскость маркировки и измеряют азимут и угол наклона линии падения (линии наибольшего наклона) этой плоскости. Измерения обычно выполняют с помощью горного компаса. Только при отборе штуфов сильномагнитных пород ($J_n \geq 1$ А/м) и в районах значительных локальных магнитных аномалий, где ориентировка по горному компасу становится невозможной, пользуются геодезическим (с помощью теодолита) или астрономическим способом ориентировки (с помощью солнечного компаса).

В зависимости от условий залегания пород, их свойств и применяемой техники полевых и лабораторных работ используется несколько систем получения ориентированных образцов. Любая из них должна обеспечить восстановление в образце положения плоскости, горизонтальной в момент образования породы, и линии современного меридиана на этой плоскости в то время. Поэтому, если плоскость

маркировки не есть первично горизонтальная плоскость (плоскость напластования в осадочных породах), необходимо знать элементы залегания пород (тектонического наклона) для пересчета результатов измерений в систему координат, связанную с первично горизонтальной плоскостью. Чтобы избежать такого пересчета и вносимых при этом погрешностей, при изучении слоистых осадочных пород в качестве плоскости маркировки стараются выбирать плоскость напластования. Для неслоистых твердых пород плоскостью маркировки может служить любая удобная поверхность отдельности. Линию падения наносят на плоскость маркировки со стрелкой в сторону падения, азимут этой линии и угол ее наклона измеряют и записывают (рис. 12-23-(1-3)). В горизонтально залегающих пластах на плоскости напластования обычно отмечают линию магнитного меридиана со стрелкой на север.

Образцы для магнитометрических измерений изготовляются разными способами:
1. От обнажения откалывают штуф породы; плоскостью маркировки служит верхняя грань со стрелкой на ней, оббивают штуф до получения примерно изометрической формы с отношением наибольшей оси к наименьшей, не более 2: 1.
2. Штуф разрезают на одинаково ориентированные кубики или вручную (сразу же на обнажении для мягких пород), или на камнерезном станке (для твердых пород); показывают ориентировку кубиков и направления осей для магнитометрических измерений (рис. 12-23-4).
3. Из штуфа перпендикулярно к плоскости маркировки выбуривают керны, которые затем разрезают с помощью камнерезного станка на цилиндры одинаковой высоты.
4. Такие же керны выбуривают непосредственно на обнажении» минуя процесс отбора штуфов. Для мягких пород применяют пуансоны, позволяющие получать кубики также непосредственно из обнажения.

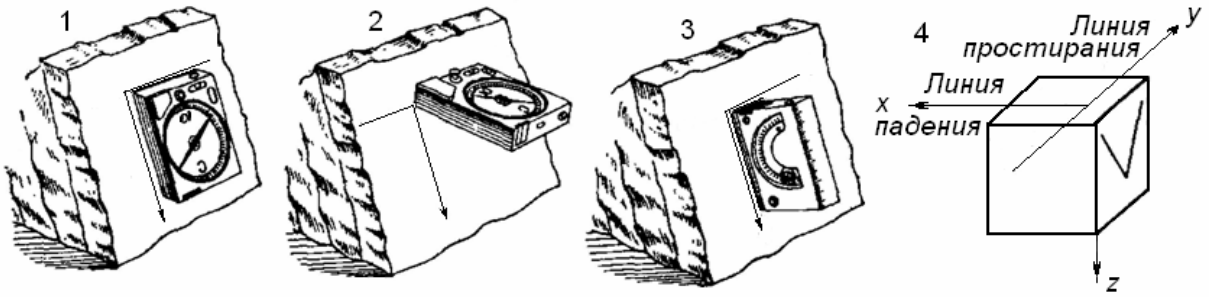


Рис. 12-23. Последовательность операции при ориентировке штуфа с помощью горного компаса с уровнем (1 – 3). Ориентировка кубика для магнитометрических измерений – 4.

Правильная форма образцов предпочтительнее, так как позволяет на порядок повысить точность на нижнем пределе измеряемых на магнитометре величин. Размеры кубиков зависят от применяемого магнитометра, обычно они составляют 2—5 см по ребру. В тех же пределах находятся и размеры цилиндров, наибольшая точность измерений, обеспечивается при отношении высоты к диаметру 7 : 8.

Керн буровых скважин может быть использован для палеомагнитных исследований, если он ориентирован. Существуют магнитные методы ориентации керна, однако независимо от этого привлекают все другие возможности для его ориентировки. Успех будет в значительной степени обеспечен, если образцы керна отбираются в ходе бурения. Сразу после подъема керна на нем отмечается «верх—низ». Признаком, чаще всего позволяющим ориентировать керн в горизонтальной плоскости, является наклонная слоистость породы при известных элементах ее залегания в точке отбора или данные

инклинометрии при наклонных скважинах. В образцах керна, находящихся в кернохранилищах, ориентировка «верх—низ» часто бывает перепутана. Она может быть, однако» восстановлена по положению фауны, закруглению на конце керна и другим признакам; горизонтальная ориентировка определяется опять-таки по наклонной слоистости. Успех магнитной ориентации керна в большинстве случаев зависит от времени, прошедшего от бурения до магнитометрических измерений; этот интервал надо стараться сократить до минимума.

12. 7. Приборы и обсерватории.

Измерение магнитного поля Земли (МПЗ) всегда выполняется с какой-либо конкретной целью. У. Паркинсон (1986) выделяет восемь направлений: 1) магнитные обсерватории, 2) региональная съемка, 3) локальные съемки, 4) векторные измерения при морской и аэромагнитной съемке, 5) измерения с помощью спутников и космических зондов, 6) палеомагнитные измерения, 7) регистрация пульсаций и "шума" и 8) площадные магнитовариационные исследования. По-видимому, в этот список можно кое-что добавить, например, выделить как особое направление проведение тектономагнитных наблюдений как предвестников землетрясений. Однако практически любую мыслимую цель магнитных измерений можно отнести к одной (или нескольким) - из перечисленных Паркинсоном.

***Обзоры по магнитометрам для обсерваторий, ПВХ и методикам*:**

- Jankowski J., Sucksdorff C. IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. 1996, 232 p.
- L.R. Newitt, C.E. Barton, and J. Bitterly. IAGA Guide for Magnetic Repeat Station Surveys. 1997, 120 p.
- Нечаев С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2006, 140 с.

Феррозонды - это, по существу, трансформаторы с ядром из сплава, магнитные кристаллы которого легко ориентируются в линию (например, никель-железный сплав пермаллой). Если ток в ведущем проводе (называемом обмотка подмагничивания или ведущая обмотка) изменяется, то ток в добавочной обмотке (сенсорной обмотке) будет изменяться в соответствии с окружающим магнитным полем. Основным принципом измерения такого поля является сравнение тока в ведущей обмотке, необходимым для насыщения ядра в одном направлении с током, необходимым для насыщения в противоположном направлении. Различие определяется окружающим полем.

Ядро такого рода устройств может быть в виде стержня или тороидального сердечника. В случае использования стержня ведущая и сенсорная обмотки наматываются рядом или поверх друг друга, и датчик реагирует на поле, расположенное вдоль стержня. Можно также использовать тороидальный сердечник. Это позволит измерить две ортогональные составляющие поля (двойную ось), намотав две сенсорные обмотки вокруг внешней стороны сердечника под прямым углом друг к другу.

Виктор Ваквиер изобрел такой магнитометр в 1930-х годах во время работы в Gulf Research Laboratories. Его инновационный прибор привел к применению магнитометров в ряде прикладных задач, включая геофизические поисково-разведочные работы по добыче полезных ископаемых и углеводородов, обнаружение субмарин, а также мониторинг и составление карт магнитного поля Земли с помощью датчиков, расположенных на земле, самолетах и спутниках.

Для создания компаса необходим двухосевой датчик “fluxgate”. Одна сенсорная обмотка определяет составляющую поля Земли вдоль одной оси (назовем ее осью x), а другая определяет составляющую вдоль оси y. Угол между направлением на северный магнитный полюс и осью x равен арктангенсу от деления значения y на значение x.

Очевидно, что датчик “fluxgate” должен находиться в горизонтальном положении для точного определении направления. Любое колебание датчика, которое может произойти на плывущем судне, значительно уменьшает его точность. Для предотвращения потери точности, наклоны датчика должны компенсироваться, например, с помощью карданных шарниров, таким образом, чтобы он всегда оставался в горизонтальном положении. И зафиксированные и закрепленные с помощью карданных шарниров датчики “fluxgate” в настоящее время находятся в свободной продаже, также как и полностью сформированные модули компасов. Некоторые модели имеют соответствующий промышленным стандартам Национальной Ассоциации Морской Электроники выход для вывода цифровых данных.

Нечувствительный к колебаниям компас можно создать из трехосевого датчика “fluxgate”, совмещенного с электронным креномером. У такого компаса нет движущихся частей, и он известен как виброустойчивый компас.

Основная идея феррозондового прибора (fluxgate) состоит в использовании датчика в виде сердечника из материала с высокой магнитной проницаемостью, на котором расположены две катушки возбуждения (направленные противоположно одна другой) и одна сигнальная катушка. В отсутствие внешнего магнитного поля - поля двух катушек возбуждения подбираются таким образом, чтобы сигнальная не возбуждалась. Появление внешнего поля вызовет разбаланс катушек возбуждения и возникнет ЭДС на сигнальной катушке. Прибор включает в себя феррозондовый датчик, генератор возбуждения, усилитель с отрицательной обратной связью и т. д.

В современной магнитоизмерительной аппаратуре феррозонды обычно используются в приборах двух типов: 1) компонентные вариационные станции и 2) нуль-индикаторы в DI-магнитометрах на базе немагнитных теодолитов. Конкретные приборы, использующие феррозонды в вариационных станциях, приведены в Таблице 12.4, а феррозонды, используемые в нуль-индикаторах, в Таблице 12.5.

Таблица 12.4. DI-магнитометры с феррозондовым нуль индикатором.

Назв. прибора	Фирма	Страна	Цена, $	Чувст., нТл	Тип теод.	Разр.
D&I fluxgate	IPG	Франция		0.2	Theo 010 B	±1"
DIM-100	EDA	Канада	10 000	0.1	Theo 020 A	±3"
EPB D&IF	GSC/EMR	Канада				
810 D&IF	Elsec	Канада				
D&I fluxgate	NMI	Нидерланды		1	010 A	±5"
D&I fluxgate	DMI	Дания			010	
D&I fluxgate	ГО "Ключи"	Россия		0.1	3Т1КП	±2"
Mag-01H Fluxgate Declinometer / Inclinometer	Bartington Instruments Ltd (http://www.bartington.com)	Великобритания	13 000£	0.1	Wild T1	±3"
Портативный деклинометр-инклинометр LEMI-203 / LEMI-204	ЛЦ ИКИ (http://www.isr.lviv.ua/lemi204ru.htm)	Украина	8 000£	0.01	3Т2КП	±2"

RNMI - Королевский Нидерландский Метеорологический Институт.
DMI - Датский Метеорологический Институт.
IPG - Институт Физики Земли.
ИГФ - Институт Геофизики СО РАН, Новосибирск.
ГО "Ключи" – Геофизическая обсерватория "Ключи", СО РАН, Новосибирск,
010, 020 - немагнитные теодолиты фирмы Carl-Zeiss Jena.
3Т1КП - серийный теодолит переделанный в ИГФ.
ЛЦ ИКИ - Львовский центр Института космических исследований НАНУ

Датчик, основанный на эффекте Холла. В 1879 Эдвин Холл, будучи студентом университета им. Джона Хопкинса, установил, что если ток проходит по тонкому проводу, находящемуся в магнитном поле, поперек проводника появляется небольшое напряжение. Данное явление было не более чем простой научной диковинкой только до тех пор, пока развитие полупроводников не позволило создать интегральные схемы эффекта Холла с транзисторами для усиления слабого сигнала напряжения. Интегральные схемы также включали схемы для уменьшения отклонения сигнала из-за изменения температуры, напряжения в сети и других факторов.

В настоящее время имеются несколько электронных приборов, основанных на эффекте Холла, включая различные типы переключателей и линейные датчики. Когда переключатель на основе эффекта Холла подвергается действию магнитного поля с правильной полярностью, которая превышает порог его работы, включается выходной транзистор, позволяя току проходить через него. Когда напряжение поля понижается до порога, транзистор выключается.

Рис. 12-24. DI-магнитометры Геофизической обсерватории «Ключи» на базе немагнитных теодолитов 3Т2КП (слева) и Theo 020B (справа). Возле 3Т2КП – электронный блок, на зрительной трубе теодолитов закреплены феррозондовые датчики.

Простой электронный компас, который сможет определять направления на основной или четвертной румб, можно создать, установив по кругу четыре переключателя на основе эффекта Холла вокруг маленькой свободно вращающейся намагниченной иголки. Когда иголка указывает на один из переключателей, его транзистор включается, позволяя проходить току и включать установленный над ним светодиод, который показывает направление или курс. Если иголка остановилась посередине между двумя переключателями, то включаются оба светодиода. Это указывает направление на четвертной румб. Для более точных компасов требуются линейные датчики на основе эффекта Холла с выходным напряжением, которое бы точно соответствовало изменениям в окружающем магнитном поле. В состоянии покоя (при отсутствии магнитного поля), выходной сигнал в идеале должен равняться половине сетевого напряжения, деленного на рабочее напряжение и разницу температур прибора. При возрастании магнитного поля южного полюса напряжение на выходе возрастет по сравнению с состоянием покоя. И наоборот, при возрастании магнитного поля северного полюса напряжение на выходе понизится по сравнению с состоянием покоя. Пара датчиков, перпендикулярно расположенных на горизонтальной плоскости, может с точностью до нескольких градусов определить направление, которое указывает намагниченная иголка.

Магнитоиндуктивный датчик. Магнитоиндуктивный магнитометр измеряет магнитное поле по его влиянию на индуктивность катушки проволоки или соленоида. Катушка используется в качестве индуктивного элемента в индукторе/резисторе генератора разрывных колебаний (релаксационном генераторе). По мере изменения окружающего поля изменяется и индуктивность катушки. Это в свою очередь изменяет частоту генератора, которая может быть измерена по силе компонента поля, параллельного оси катушки. Магнитоиндуктивные датчики появились сравнительно недавно, первый патент на них был выдан в 1989 году.

Также как и в других видах магнитных датчиков, для определения направления в горизонтальной плоскости, а следовательно и направления на северный магнитный полюс, необходимо закрепить два таких датчика перпендикулярно друг другу на горизонтальной плоскости. Двухосевой датчик можно закрепить с помощью карданного шарнира для поддержания его в горизонтальном положении, а трехосевой датчик можно использовать совместно с креномером. В настоящее время многие автомобильные компасы производятся на основе магнитоиндуктивных датчиков.

Магниторезистивный датчик. Анизотропные магниторезистивные (AMP) датчики представляют собой специальные резисторы, сделанные из тонкой пермаллоевой пленки, помещенной на кремниевую пластину. При их производстве, пленка помещается в сильное магнитное поле для ориентации магнитных областей в одинаковом направлении, определяя тем самым направление вектора намагничивания. Затем, при попадании во внешнее магнитное поле, перпендикулярное пленке, вектор намагничивания начинает вращаться или изменять угол. Это, в свою очередь, меняет сопротивление пленки. Если включить AMP прибор в электрическую схему, такую как мост Уитстона, то изменение сопротивления можно обнаружить по изменению в напряжении, а потом высчитать силу воздействующего магнитного поля. В 1856 году Вильям Томпсон и Лорд Кельвин впервые описали магниторезистивный эффект.

Протонные магнитометры. В протонных магнитометрах (PPM – Proton Precession Magnetometer) используется эффект ядерного магнитного резонанса (ЯМР), на котором основано определение магнитных моментов ядер. Большинство ядер атомов обладают магнитным и угловым моментами. Когда ядро находится в магнитном поле, на него действует момент сил, стремящихся развернуть его в направлении поля. Однако, поскольку у ядра есть и угловой момент, оно поворачивается не сразу, а прецессирует

вокруг направления внешнего магнитного поля. Прецессия ядер за счет взаимодействия с соседними частицами ослабевает и прекращается после того, как большинство ядер установятся вдоль направления поля. Этот процесс продолжается в земном магнитном поле для протонов примерно одну секунду, что не всегда достаточно для проведения точного измерения частоты прецессии. Эта величина (частота прецессии) собственно и является той характеристикой, на основании которой определяется абсолютная величина внешнего магнитного поля. Принято считать, что величина индукции B (нТл) = 23,4874 f (Гц), где f частота прецессии. Например, частоте f = 2 кГц соответствует поле 46.975 нТл. Точность измерения частоты f (считай точность измерения величины магнитного поля) определяется временем, в течение которого происходит прецессия, которое, в свою очередь, зависит от способности протонов рабочего вещества датчика удерживать ядра в поляризованном состоянии.

Для повышения величины времени прецессии используют различные методы динамической поляризации. Наибольшее употребление получил метод, использующий т.н. эффект Оверхаузера. Суть этого эффекта состоит в том, что рабочее вещество датчика подбирается таким, чтобы кроме эффекта ЯМР в нем мог проявляться также и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР). Эффект Оверхаузера наблюдается в электронно-ядерной системе обладающей электронным и ядерным спинами одновременно. Зеемановское расщепление уровней для электронного спина $\Delta = \mu_e H$, для ядерного $\delta = \mu_p H$, где μ_e и μ_p магнитные моменты электронов и ядер. Поскольку $\mu_e > \mu_p$, $\Delta >> \delta$. В обычной ядерно-магнитной системе скорость затухания поляризации определяется величиной зеемановского расщепления. В условиях эффекта Оверхаузера – эта скорость определяется зеемановским расщеплением электронной системы, что примерно в 1000 раз выше. Таким образом, благодаря использованию эффекта Оверхаузера, время поляризации, а следовательно, и точность измерения частоты прецессии (величины магнитного поля) значительно (до 1000 раз) возрастает. В современных приборах РРМ этот эффект используется довольно часто (в Табл. 12-5 такие датчики обозначаются РРМ*).

Магнитометры на эффекте Зеемана. Принцип действия этих приборов основан на влиянии магнитного поля на взаимодействие света с атомами вещества. В качестве рабочего вещества используются пары рубидия или гелий. Оптическая ячейка с парами рубидия (Rb^{87}) облучается светом от рубидиевой лампы через фильтр, пропускающий длину волны 795 нм. Атомы рубидия ячейки возбуждаются. Происходит оптическая накачка системы. После этого пары рубидия уже не могут поглощать свет от лампы, и ячейка становится прозрачной. В присутствии магнитного поля происходит расщепление (за счет Зеемановского эффекта) квантовых уровней рубидия.

Рубидиевая ячейка помещается в соленоид, в обмотке которого течет ток с частотой примерно 400 кГц. Эта частота соответствует напряженности земного магнитного поля. Электромагнитная индукция, создаваемая в соленоиде и поглащаемая парами рубидия, приводит к тому, что пары становятся непрозрачными для света лампы. В приборе изменяют частоту и измеряют пропускание света, добиваясь минимального прохождения. При этом частота соответствует величине измеряемого магнитного поля.

Одним из преимуществ магнитометров на эффекте Зеемана является то, что они способны измерять даже небольшие величины магнитных полей с амплитудой порядка 10 нТл. Поэтому такие приборы применяются в космических зондах. Типичным представителем приборов на эффекте Зеемана является серийно выпускаемый прибор М-303 на парах цезия. Чувствительность прибора 0.1 нТл, время измерения 1 с.

Криогенный магнитометр. Прибор этого типа получил название – SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Другое распространенное название

«Прибор на эффекте Джозефсона». Этот прибор обладает наивысшей чувствительностью по отношению к магнитному полю из всех имеющихся в настоящее время приборов.

Эффект Джозефсона проявляется, когда в сверхпроводящее кольцо вставлен специальный контакт представляющий собой тонкую пленку изолятора. Когда ток в кольце (находящимся при гелиевой температуре) достигает некоторого критического значения, поток может измениться скачком. Это изменение вызовет появление напряжения в катушке чувствительного датчика.

В квантовой механике фаза волны, связанная с частицей (либо со связанной электронной парой в сверхпроводнике), зависит от магнитного поля. Оказывается, что различия между фазами пар в двух сверхпроводниках имеет пространственную вариацию в том случае, если в туннельном соединении имеется магнитное поле. Если поле однородно в слое изолятора, то фаза изменяется в плоскости соединения в направлении под прямыми углами к направлению поля со скоростью пропорциональной величине поля.

Серийных криогенных магнитометров, насколько известно, не выпускается. Однако, в геофизике известны случаи использования СКВИДов. Об одном из них пишет А.Е.Резников (1989). На физическом факультете МГУ создан однокомпонентный СКВИД-магнитометр. Испытания этого прибора показали, что в диапазоне частот 0.1 – 50 Гц его чувствительность составляет 10^{-14} Тл/Гц$^{1/2}$. Прибор использовался для изучения ионосферного альвеновского и Шумановского резонансов. Эти вопросы относятся скорее к физике ионосферы и распространению радиоволн, а не магнитометрии. Известны случаи применения СКВИДов при палеомагнитных исследованиях слабонамагниченных пород.

Серийно выпускаемые магнитометры различных типов и предназначенные для проведения обсерваторских наблюдений представлены в Таблице 12.5.

Таблица 12.5.

Назв. Пр.	Тип	Изм. Пар.	Фирма	Страна	Цена ам.дл	Чувс. нТл.	Динам. Диап.
CANMOS	Flux.+ PPM*	XYZF	Geophys.Div. GSC	Канада	25.000	0.01	± 83800
OMNI IV	PPM	F	Scintrex Limited	Канада	8.000	0.1	18.000-110.000
USGS	Flux.	XYZ	Narod Triaxial	Канада	6.000	0.01	±83.000
Torsion Photoelec.	PSM	XYZ	Inst. Geop. Poland	Польша	10.000	0.01	±3.000
FM 200	Flux.	XYZ	Scintrex Limited	Канада	10.000	0.1	±80.000
DIMARS	Bobrov Quartz	DHZ	ELDI	Венгрия	14.999	0.1	± 400
ELSEC 8600	Ring. PPM	XYZ	ELSEC	Англия	50.000	0.1	±83.800
DOWTY LNMS 5A	Ring.	XYZ	Domain Magnetic	Англия	9.500		±100.000
DOWTI GEOMAG	Ring. Flux.	XYZ	Domain Magnetic	Англия		0.01	±70.000
IZMIRAN	Bobrov Quartz	F	IZMIRAN	Россия	8.000	0.01	100- 2000
IPGP	Flux. PPM*	XYZF	GEM System	Канада	38.500	0.1	11.800-64.800
GEM	PPM*	F	GEM System	Канада		0.01	20.000- 70.000
NURMI-JARVI	PSM, photo	XYZ	NURMI-JARVI	Финляндия	9.000	0.01	± 100 ± 4.000
S – 100	Ring. Flux.	XYZ	Narod Triaxial	Канада		0.01	±70.000

VFO 31		XYZ	Thomson-Sintra	Франция	23.000	0.1	±2.000
POS-1	PPM*	F	НИЛ КМ УГТУ-УПИ	Россия	10 000	0.001	20000-100000
ММП-203МС	PPM*	F	ФГУ НПП «ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА»	Россия	2 000	0.01	20000-100000
ММ – 60М1	Quantum	F	ФГУ НПП «ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА»	Россия	3 000	0.01	20000-100000
GSM-19	PPM*	F	GEM System	Канада	30 000	0.01	10000-120000
dIdD	PPM* + Ring	F,dD,dI	GEM System	Канада		0.01 нТл (F), 0.2”(dD),0.1”(dI)	20000-120000, ±90(I), ±180(D)
CS-3	Cesium	F	SCINTREX LTD	Канада		0.001	15000-105000
LEMI-018	Flux	X,Y,Z	ЛЦ ИКИ	Украина		0.01 (вариации)	±65000 (полное поле) ±1000 (вариации)
Magson Fluxgate Magnetometer	Flux+Ring	X,Y,Z	Magson GmbH	Германия		0.01 (вариации)	±60000 (полное поле) ±4000 (вариации)

PSM – магнетометр т.н. торсионного типа аналогичен приборам, описанным нами в разделе « Приборы с постоянными магнитами», Ring – означает, что система оборудована кольцами Гельмгольца. Bobrov Quartz – означает, что используется датчик конструкции Боброва (ИЗМИРАН).

Магнитные обсерватории. Магнитные обсерватории (МО) – научно-исследовательские учреждения, в которых осуществляется непрерывная регистрация временных изменений (вариаций) магнитного поля Земли и проводятся регулярные измерения абсолютных значений напряжённости геомагнитного поля и его направления. МО снабжены различного типа магнитографами и магнитометрами, их размещают преимущественно вдали от городов, электрифицированных железных дорог и крупных промышленных предприятий, способных исказить геомагнитное поле. Ряд МО входит в состав комплексных магнитно-ионосферных станций.

Данные МО служат для изучения поведения геомагнитного поля, которое является чутким индикатором сложных процессов, протекающих в магнитосфере, ионосфере и в недрах Земли. Кроме того, их используют при наземной и аэромагнитной съёмке для учёта магнитных вариаций и приведения к одной эпохе результатов измерений, выполненных в разное время. На МО также выполняется поверка магнитометров, применяемых для разведки полезных ископаемых, и компасов.

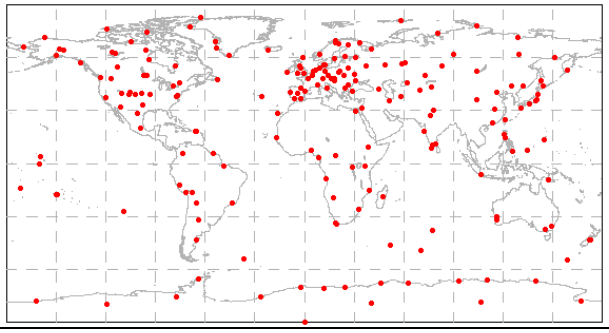
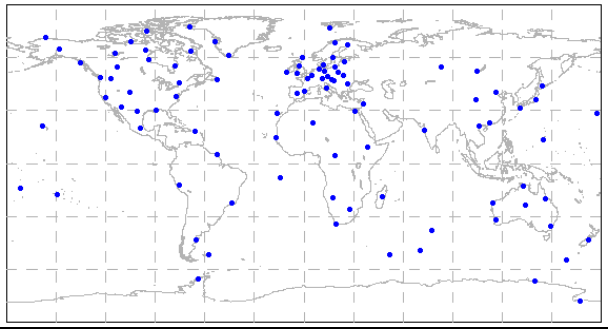
В России к 1829 г. МО были построены в Петербурге и Казани (они были первыми в Европе), затем МО были созданы в Нерчинске, Барнауле, Колывани, Екатеринбурге, Тбилиси и др. Первая в мире полярная МО открыта в 1924 г. в проливе Маточкин Шар на Новой Земле. В 1939 г. на базе магнитного отделения Главной геофизической обсерватории под Москвой организован Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн институт АН СССР. В СССР в 1972 г. функционировало более 40 МО, в том числе ряд обсерваторий в полярных районах (в Арктике и Антарктике). В настоящее время в мире насчитывается свыше сотни постоянно действующих магнитных обсерваторий. Однако, распределение их крайне неравномерно: наибольшее количество МО приходится на территорию Европы, меньше всего их – на

территории океанов и морей. 29 советских и 90 зарубежных МО регулярно направляют информацию о состоянии магнитного поля и ионосферы Земли в Международные центры, которые находятся в России, США, Великобритании, Канаде и Японии.

Согласно Энциклопедическому словарю Брокгауза и Ефрона, МО – учреждения**,** в которых производятся магнитные наблюдения и необходимые для них – астрономические. В настоящее время магнитных обсерваторий довольно много. В России таковые находятся: в Павловске (близ СПб.), в Гельсингфорсе, Москве, Казани, Тифлисе, Екатеринбурге и Иркутске. Недавно проф. А. В. Клоссовским на средства механика И. А. Тимченко построена магнитная обсерватория в Одессе; приборы уже установлены, и предварительные исследования произведены. Наиболее замечательные иностранные магнитные обсерватории находятся: в Копенгагене, Потсдаме, Вильгельмсгафене, Вене, в парке Сен-Мар близ Парижа, в Утрехте, Брюсселе, Кью, Дублине, Лиссабоне, Вашингтоне, Гонконге, Цикавее, Батавии. Лучшая из всех, несомненно, была Константиновская в Павловске, построенная в 1878 г. Академией наук по указаниям и под непосредственным присмотром Г. И. Вильда, в местности, подаренной Академии наук великим князем Константином Николаевичем, владельцем Павловска. Это — образцовое учреждение со всевозможными новейшими усовершенствованиями, в которое приезжают учиться не только с разных концов России, но и из-за границы. На специальной секции IAGA, проходившей в 1997 в Швеции (Уппсала), магнитная обсерватория Ключи (Новосибирск) была признана лучшей в России.

Проекты магнитных измерений. Интермагнет. После проведения в 1957-1958 гг. Международного геофизического года стало ясно, что имеющейся к тому времени сети магнитных обсерваторий недостаточно для изучения многих процессов как в Земле, так и в околоземном пространстве. Международная ассоциация по геомагнетизму и аэрономии (IAGA) инициировала расширение сети МО и приняла стандарты, по которым эти МО должны были работать (разрешение по времени – 1 час, разрешение по полю – 1 нТл). Более 600 МО получили специальный код, однако, количество постоянно действующих или длительно действующих обсерваторий насчитывалось около 200. Основные параметры сети МО IAGA представлены в таблице 12.6.

Таблица 12.6.

IAGA	**INTERMAGNET**
1) развертывание – с конца 50-х годов 2) данные – среднечасовые, аналоговая регистрация, 1 нТл 3) более 600 МО присвоен код IAGA, данные более 200 МО скомпилированы в МЦД	1) развертывание – с конца 80-х годов 2) данные – среднеминутные, цифровая регистрация, 0.1 нТл 3) 98 МО в 2005 г.
	

В 80-х годах XX столетия сеть МО IAGA с преимущественно аналоговой регистрацией начала заменяться глобальной сетью МО квазиреального времени INTERMAGNET (www.intermagnet.org). Магнитной обсерваторией этой сети

признавалась магнитная станция, на которой абсолютные измерения выполняются регулярно в течение многих лет и которая обеспечивает данные с качеством, требуемым для изучения вековых вариаций магнитного поля Земли. Квазиреальные измерения предполагают передачу информации в центры данных в течение 72 часов. Стандартами INTERMAGNET периодичность данных о полном векторе напряженности поля определена в 1 мин. (при частоте измерений 0.1-1.0 Гц и использовании цифрового фильтра для вычисления среднеминутных значений), чувствительность не хуже 0.1 нТл, абсолютная точность 5 нТл. В 2008 г. количество МО в этой сети достигло 103, в т.ч. три МО из России.

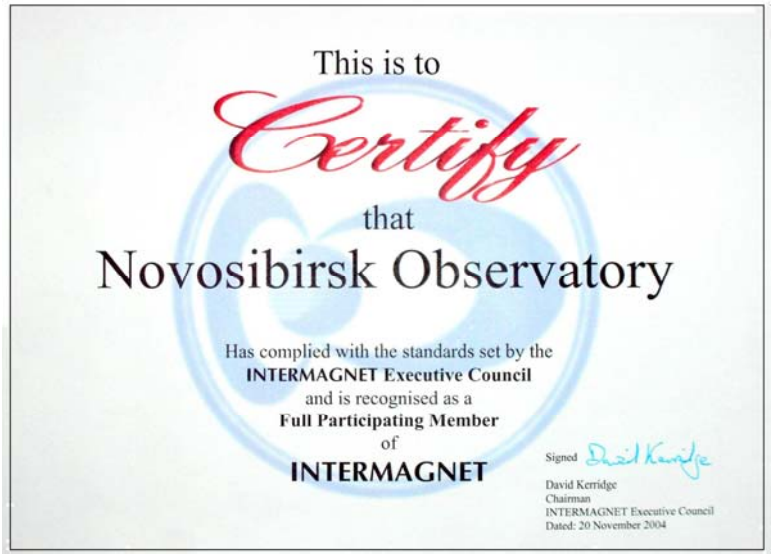


Рис. 12-25. Паспорт обсерватории участвующей в проекте Интермагнет.

На XVIII Рабочем совещании IAGA в июне 2008 г. в Боулдере (США) были рассмотрены предложения по разработке нового стандарта цифровых магнитных обсерваторий, предполагающего получение данных с частотой 1 Гц и чувствительностью на уровне 0.001 нТл (первые предложения на этот счет были сделаны еще в 2003 г. на аналогичном совещании в Бельгии).

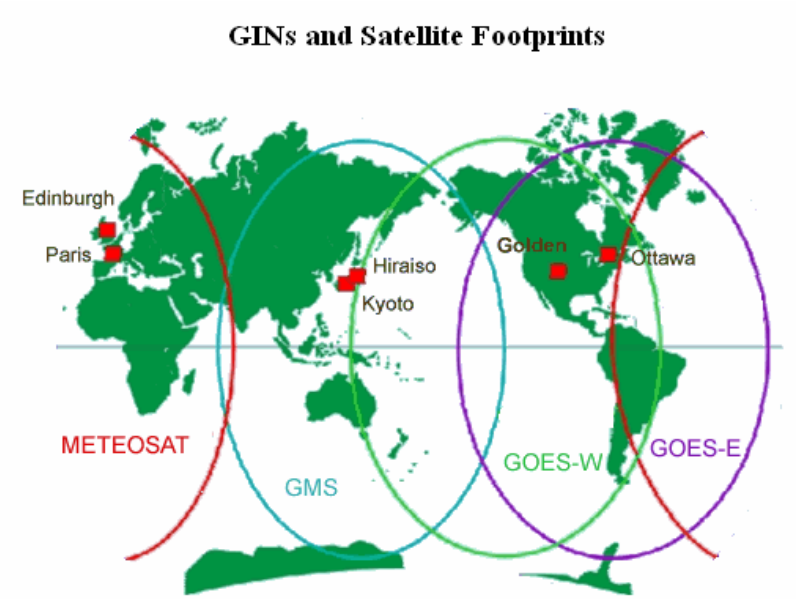


Рис. 12-26. Международные центры проекта Интермагнет.

Фокусы векового хода. Изолинии вековых изменений составляющих земного магнетизма, как отмечалось выше, называются изопорами.

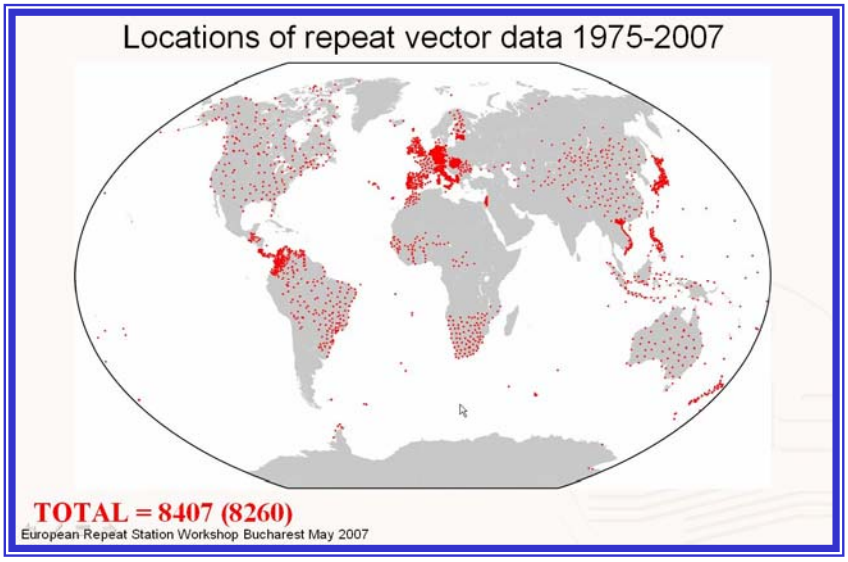


Рис. 12-27. Карта пунктов векового хода.

Изопоры концентрируются вокруг нескольких центров (фокусов) векового хода, где изменения достигают максимальных значений ~ 0.16 а/м (~$2 \cdot 10^{-3}$ э). Фокусы векового хода непрерывно перемещаются (до 0,2 град/год) и изменяются по своему значению (рис. 14-11). В соответствии с этим со временем меняется вся совокупность изопор. Фокусы векового хода чаще всего строятся для вертикальной (Z) и горизонтальной (H)

составляющих магнитного поля Земли. Один из них — Каспийский расположен к югу от Каспийского моря, где вертикальная составляющая ежегодно возрастает на 130 гамм. Фокусы вычисляются по данным обсерваторий и измерений, проводимых каждые 5 лет на т.н. пунктах векового хода. Ниже. На карте показаны пункты векового хода. В России до 1990 г проводились подобные измерения, как они ведутся во всем мире, но с этого времени такие измерения были прекращены. Многократные попытки восстановить эту процедуру не увенчались успехом, Россия выбыла из числа стран, выполняющих эту работу. Как Индия и ряд африканских стран.

12. 8. Магнитосфера.

Ионосфера. Верхняя часть атмосферы, над мезосферой, характеризуется очень высокими температурами и потому носит название *термосферы.* В ней различаются, однако, две части: *ионосфера,* простирающаяся от мезосферы до высот порядка тысячи километров, и лежащая над нею внешняя часть — *экзосфера,* переходящая в *земную корону.*

Воздух в *ионосфере* чрезвычайно разрежен. Мы уже указывали в параграфе 13, что на высотах 300—750 *км* его средняя плотность порядка 10^{-8}—10^{-10} *г/м*^{3}. Но и при такой малой плотности каждый кубический сантиметр воздуха на высоте 300 *км* еще содержит около одного миллиарда (10^9) молекул или атомов, а на высоте 600 *км* — свыше 10 миллионов (10^7). Это на несколько порядков больше, чем содержание газов в межпланетном пространстве.

Ионосфера, как говорит само название, характеризуется очень сильной степенью *ионизации* воздуха. Содержание ионов здесь во много раз больше, чем в нижележащих слоях, несмотря на сильную общую разреженность воздуха. Эти ионы представляют собой в основном заряженные атомы кислорода, заряженные молекулы окиси азота и свободные электроны. Их содержание на высотах 100-400 *км* — порядка 10^5 -10^6 на кубический сантиметр.

В ионосфере выделяется несколько *слоев,* или *областей,* с максимальной ионизацией, в особенности на высотах 100— 120 *км* (слой *E)* и 200—400 *км* (слой *F).* Но и в промежутках между этими слоями степень ионизации атмосферы остается очень высокой. Положение ионосферных слоев и концентрация ионов в них все время меняются. Спорадические скопления электронов с особенно большой концентрацией носят название *электронных облаков.*

От степени ионизации зависит *электропроводность* атмосферы. Поэтому в ионосфере электропроводность воздуха в 10^{12} раз больше, чем у земной поверхности. Радиоволны испытывают в ионосфере поглощение, преломление и отражение. Волны длиной более 20 *м* вообще не могут пройти сквозь ионосферу: они отражаются уже электронными слоями небольшой концентрации в нижней части ионосферы (на высотах 70— 80 *км).* Средние и короткие волны отражаются вышележащими ионосферными слоями.

Именно вследствие отражения от ионосферы возможна дальняя связь на коротких волнах. Многократное отражение от ионосферы и земной поверхности позволяет коротким волнам зигзагообразно распространяться на большие расстояния, огибая поверхность Земного шара. Так как положение и концентрация ионосферных слоев непрерывно меняются, меняются и условия поглощения, отражения и распространения радиоволн. Поэтому для надежной радиосвязи необходимо непрерывное изучение состояния ионосферы. Наблюдения над распространением радиоволн как раз являются средством для такого исследования.

В ионосфере наблюдаются *полярные сияния* и близкое к ним по природе *свечение ночного неба* (рис. 10-26) - постоянная люминесценция атмосферного воздуха, а также резкие колебания магнитного поля - *ионосферные магнитные бури.*

Ионизация в ионосфере обязана своим существованием действию ультрафиолетовой радиации Солнца. Ее поглощение молекулами атмосферных газов приводит к возникновению заряженных атомов и свободных электронов, о чем говорилось выше. Колебания магнитного поля в ионосфере и полярные сияния зависят от колебаний солнечной активности (см. главу первую, параграф 6). С изменениями солнечной активности связаны изменения в потоке корпускулярной радиации, идущей от Солнца в земную атмосферу. А именно корпускулярная радиация имеет основное значение для указанных ионосферных явлений.

Температура в ионосфере растет с высотой до очень больших значений. На высотах около 800 *км* она достигает 1000°.

Говоря о высоких температурах ионосферы, имеют в виду то, что частицы атмосферных газов движутся там с очень большими скоростями. Однако плотность воздуха в ионосфере так мала, что тело, находящееся в ионосфере, например летящий спутник, не будет нагреваться путем теплообмена с воздухом. Температурный режим спутника будет зависеть от непосредственного поглощения им солнечной радиации и от отдачи его собственного излучения в окружающее пространство.

Магнитосфера - область пространства вокруг небесного тела, в которой поведение окружающей тело плазмы определяется магнитным полем этого тела.

Граница магнитосферы (магнитопауза) определяется условием равенства давлений магнитного поля и набегающей плазмы, т. е. радиус магнитосферы (альвеновский радиус r_A) определяется соотношением:

$$\frac{1}{8\pi}B^2(r_A)=\frac{1}{2}\rho V^2(r_A),$$

где B - магнитное поле небесного тела, ρ и V - соответственно плотность и скорость потока набегающей плазмы. В случае набегающего потока плазмы, например, в случае взаимодействия собственного магнитного поля планеты с солнечным ветром, магнитосфера представляет полость достаточно сложной формы, обтекаемую солнечным ветром (рис. 12-28).

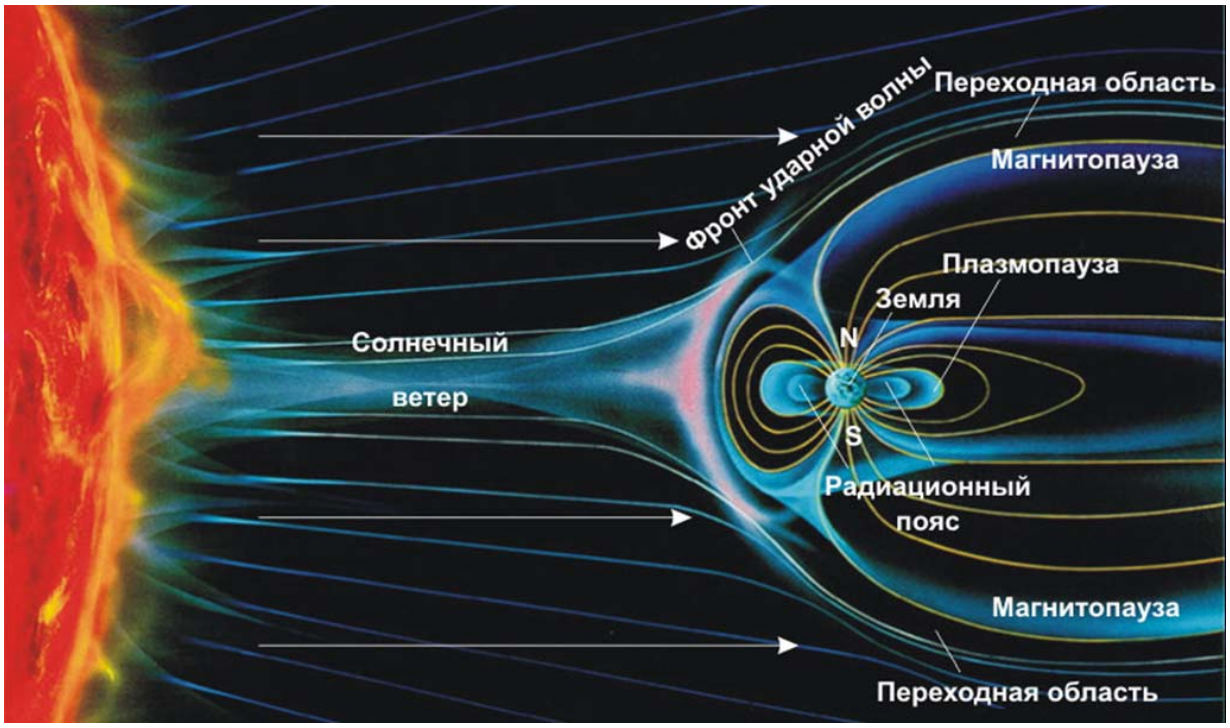


Рис. 12-28. Магнитосфера Земли. Искажение формы магнитосферы солнечным ветром.

Проникновение плазмы в магнитосферу Земли происходит непосредственно через промежутки между замкнутыми и «разомкнутыми» магнитными силовыми линиями в магнитопаузе, именуемые ***дневными полярными каспами***, или вследствие гидромагнитных эффектов и неустойчивостей. Проникновение плазмы солнечного ветра может сопровождаться дневными полярными сияниями в высокоширотной ионосфере. К развитию таких неустойчивостей приводят, в частности, резкие изменения параметров межпланетной среды. Это проявляется в зависимости частоты и интенсивности полярных сияний от уровня солнечной активности.

Часть плазмы, проникшей в магнитосферу, образует радиационный пояс планеты (пояс Ван Аллена) и плазменный слой.

В Солнечной Системе, помимо Земли, магнитосфера имеется у всех планет.

Геомагнитные координаты (координаты Мак-Илвайна). В физике космических лучей широко используется специфические координаты в геомагнитном поле. Точка в дипольном поле характеризуются двумя координатами (L, B), где L - так называемая магнитная оболочка, B - магнитная индукция поля (обычно в Гауссах).

Итак, за время изучения геомагнитного поля получен огромный объем материала, который продолжает ежегодно пополняться. Однако остается неясным один, сформулированный ещё Эйнштейном, вопрос: ***в чем же состоит физика магнитного поля Земли?***

Литература

Азад Р. О проблеме возникновения магнитного поля у вращающихся объектов (Краткий обзор работ). Вестник РУДН, серия Физика. 2001. № 9. выпуск 1. С. 20-26.

Ботвиновский В.В. Моделирование генератора главного магнитного поля Земли с помощью магнитных диполей и токовых контуров. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Новосибирск. 2000.

Джекобс Дж. Земное ядро. М.: Мир. 1979. 305 с.

Жижимов О.Л. Оценка размера области генерации магнитного поля Земли. 1988. Новосибирск: Препринт ИГиГ № 13. 12 с.

Кузнецов В.В., Павлова И.В., Семаков Н.Н. Оценка степени недипольности главного магнитного поля Земли. ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 4. С. 819-821.

Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 412 с.

Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М. Мир.: 1986. 525 с.

Alldredge L.R., Hurwitz L. Radial dipoles as the sources of the Earth's main magnetic field. J. Geophys. Res. 1964. V. 69. P. 2631- 2636.

Alldridge, L.R., Stearns C.O. Dipole model of the sources of the Earth's magnetic field. J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 6583-6593.

Alldridge, L.R. Circular current loops, magnetic dipoles and spherical harmonic analyses. J. Geomag. Geoelectr. 1980. V. 32. P. 357-364.

Alldridge, L.R. Current loops fitted to geomagnetic model spherical harmonic coefficients. J. Geomag. Geoelectr. 1987. V. 39. P. 271-296.

Peddie N.W., Zunde A.K. A model of geomagnetic secular variation for 1980-1983. Phys. Earth Planet. Inter. 1987. V. 48. P. 324-329.

Глава 13. Электропроводность Земли.

В главе 13 представлена информация об электропроводности горной породы и основам магнитотеллурического метода. Результаты магнитотеллурических исследований электропроводности Земли. Источники вариаций. Структура и физическое состояние недр Земли. Строение недр под океанами. Структура дна Мирового океана. Электропроводность твердой Земли: коры, мантии и ядра. Оценки возможности «просвечивания» Земли электромагнитными волнами.

13. 1. Электропроводность горной породы.

Электропроводность горной породы является важной характеристикой свойств вещества, находящегося в недрах Земли. В отличие от плотности, которая изменяется в Земле в узких пределах, интервал изменения электропроводности очень широк: 10^{3}-10^{-7} $Ом^{-1}$ $м^{-1}$. Электропроводность горной породы зависит от минерального состава, фазового состояния, пористости, трещинноватости, влагонасыщенности, температуры и давления. К настоящему времени на основании лабораторных исследований образцов горных пород установлены основные закономерности и получены количественные оценки влияния перечисленных факторов на величину электропроводности. Здесь основное внимание уделено закономерностям в распределении электропроводности горных пород в коре и мантии Земли. Дело в том, то оценить величину электропроводности железного ядра путем электромагнитного зондирования практически невозможно из-за того, что требуется «волна» с периодом, большим, чем реальное время наблюдения геомагнитного поля.

До 60-х годов основную информацию о составе и строении земных недр получали на основе сейсмических, гравиметрических и магнитометрических данных. Объяснялось это только одним обстоятельством - не существовало широко доступных методов исследования электропроводности Земли на больших глубинах. До середины века основные представления о распределении электропроводности в Земле были получены по данным бурения и электроразведочных работ с искусственными источниками постоянного тока. Глубина скважин к тому времени не превышала 3-5 км, а данные электроразведки с искусственными источниками позволяли исследовать строение коры не более чем на 2-3 км. В уникальном эксперименте А.П. Краева и А.С. Семенова, проведенном с искусственными источниками на Финском заливе, удалось определить распределение сопротивления на постоянном токе до глубины около 10 км.

Таблица 13. 1. Толщина скин-слоя в км для различных значений электропроводности (Ом м)$^{-1}$ и периодов колебаний (сек) (Акасофу, Чепмен, 1974).

(Ом м)$^{-1}$\ с	0.1	10	10^{3} (1/3 ч.)	10^{5} (сутки)	10^{7} (1/3 г.)	10^{9} (30 л.)
10^{-4}	16	160	1600			
10^{-3}	5.0	50	500	5000		
10^{-2}	1.6	16	160	1600		
10^{-1}	0.50	5.0	50	500	5000	
10^{0}	0.16	1.6	16	160	1600	
10^{1}	0.050	0.5	5.0	50	500	5000
10^{2}	0.016	0.16	1.6	16	160	1600

Скин слой толщиной 5000 км по порядку величин равен расстоянию от поверхности Земли до внутреннего ядра Земли, что соответствует периоду колебаний ≈ 300 тыс. лет. Эта оценка практически совпадает с оценкой Паркинсона (1986) в 100 000 лет как характерного времени, ограничивающего период электромагнитных колебаний, способных выйти на поверхность Земли.

Рождение глубинной геоэлектрики произошло в 50-е годы, когда А.Н. Тихоновым и Л. Каньяром была высказана идея о возможности применения для исследования электропроводности Земли естественного электромагнитного поля внешнего происхождения. Естественное электромагнитное поле существует на Земле в широком интервале периодов (10^{-4}-10^{6} с). Создается оно главным образом токовыми системами, расположенными в ионосфере и магнитосфере Земли. Изменение магнитного поля токовых систем происходит вследствие взаимодействия существующего магнитного поля Земли с потоком возмущенной солнечной плазмы. Переменное магнитное поле индуцирует в Земле электрические токи. Эти токи получили название теллурических, а сам метод, основанный на использовании естественного электромагнитного поля, - название "магнитотеллурический".

13. 2. Основы магнитотеллурического метода.

В основе предложенного метода лежит упрощенная модель естественного электромагнитного поля. Предполагается, что первичное поле, возбуждаемое внешними источниками, однородно на поверхности горизонтально однородной Земли. В этом случае отношение взаимно перпендикулярных горизонтальных компонент электрического и магнитного полей, измеренных на поверхности Земли, будет зависеть только от периода вариации и распределения проводимости по глубине. Это отношение, названное импедансом Z, может быть вычислено по любой паре ортогональных компонент, то есть $Z = E\text{x} / H\text{y} = - E\text{y} / H\text{x}$.

Чем больше период вариаций, тем глубже проникает поле внутрь Земли. Изменение импеданса с ростом периода отражает изменение удельного сопротивления с глубиной. На практике удобнее следить за изменением кажущегося удельного сопротивления ρ_T, которое вычисляется по формуле

$$\rho_T = (\omega\mu)^{-1} |Z|^2,$$

где $\omega = 2\pi/T$, T - период вариации в секундах, $\mu = 4\pi\cdot10^{-7}$ Генри/м, Z - в Ом, ρ_T - в Ом·м. Значения ρ_T только в предельных случаях близки к истинному значению удельного сопротивления. Например, при очень малых значениях периода, когда поле не проникает в нижележащий слой, значение ρ_T равно удельному сопротивлению первого слоя. Регистрируя вариации естественного электромагнитного поля в широком интервале периодов, можно построить зависимость кажущегося удельного сопротивления от периода. Зависимость ρ_T от периода называется кривой зондирования.

Нетрудно рассчитать поведение кривой зондирования для любой среды, электропроводность которой меняется только по вертикали. Несколько труднее рассчитать поведение кривых зондирования в случае, когда электропроводность меняется и по горизонтали, то есть для двумерных и трехмерных сред. При этом методика обработки материала наблюдений и интерпретации осложняется, так как импеданс приобретает свойства тензора и его величина зависит от направления электрического поля на поверхности Земли. Наличие алгоритмов для расчета кривых зондирования в произвольных средах позволяет в принципе определить распределение сопротивления по глубине, решив обратную задачу: по значениям ρ_T определить параметры среды.

Несмотря на простоту высказанных идей, магнитотеллурический метод не сразу вошел в геофизическую практику. Потребовалось более десяти лет, чтобы разработать необходимую аппаратуру для регистрации в полевых условиях компонент магнитного поля, имеющих в области коротких периодов очень небольшие амплитуды (10^{-2}-10^{-6} А/м), и создать методику проведения зондирований в условиях горизонтально неоднородных сред.

Типы магнитотеллурических вариаций. (Ваньян, 1997) При магнитотеллурическом и магнитовариационном зондировании используется широкий спектр вариаций естественного электромагнитного поля. К ним относятся мировые магнитные бури,

солнечно-суточные вариации, бухтообразные возмущения, пульсации. Мировые магнитные бури характеризуются продолжительностью до нескольких суток и глубиной проникновения до сотен км. Они начинаются с возрастания горизонтальной компоненты магнитного поля, проявляются наиболее четко в низких и средних широтах. Магнитное поле остается увеличенным в течение нескольких часов. Затем наступает главная бури – горизонтальная компонента уменьшается на несколько сотен нТл за 12-24 часа. Главная фаза сопровождается интенсивными иррегулярными возмущениями. Фаза восстановления магнитного поля до нормального уровня может продолжаться несколько суток. Пример апериодической *Dst* вариации, описывающей изменение горизонтальной составляющей *H* магнитного поля во время бури, показан на рис. 13-1, *a*. Внезапное начало магнитной бури, имеющее вид импульсной вариации, выделяется в самостоятельный тип. Время нарастания переднего фронта составляет обычно 2-5 минут (рис. 13-1, *b*).

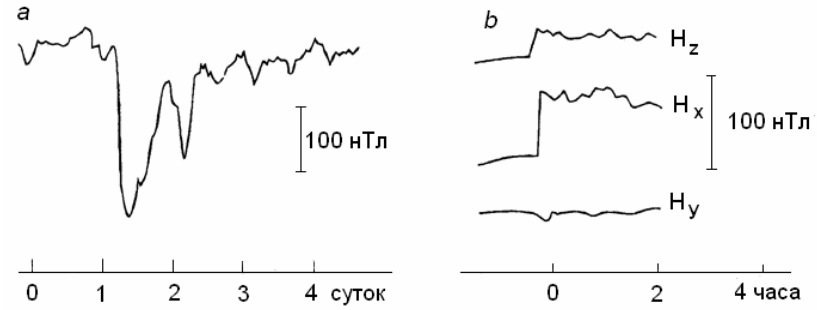


Рис. 13-1, *a* - Изменение горизонтальной компоненты магнитного поля во время магнитной бури; *b* - пример внезапного начала магнитной бури.

Бухтообразные возмущения магнитного поля (суббури) имеют продолжительность 1-3 часа. Изменение горизонтальных компонент за 15-30 минут достигает максимума, а затем затухает (рис. 13-2, c). Оно отрицательно в зоне полярных сияний в ранние утренние часы и положительно - в послеполуденные. В средних широтах наблюдаются противоположные знаки. Амплитуда бухтообразных возмущений достигает сотен нТл в высоких широтах и единиц нТл в средних и низких.

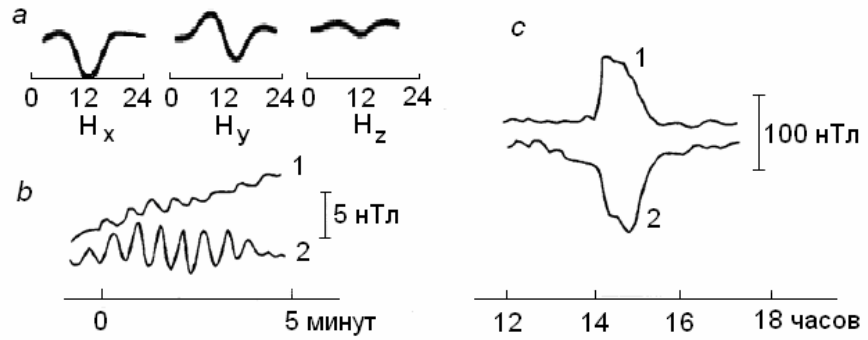


Рис. 13-2. Типичные суточные вариации горизонтальной составляющей магнитного поля для широты 30° - *a*. Пульсации горизонтальной компоненты магнитного поля: 1 – восточная, 2 – северная – *b*. Изменение горизонтальных компонент магнитного поля во время бухтообразного возмущения. Компоненты: 1 – северная, 2 – восточная - *c*.

Пульсации представляют собой квазисинусоидальные вариации, подразделяются на два основных класса: устойчивые (Pc), наблюдающиеся преимущественно утром и днем и иррегулярные (Pi). В свою очередь каждый класс делится на подклассы в зависимости от периода колебаний: Pc1 (T = 0.2-5 с); Pc2 (5-10 с); Pc3 (10-45 с); Pc4 (45-150 с); Pc5 (150-600 с); Pi1 (1-40 с); Pi2 (40-150 с). Устойчивые пульсации выражены пакетами колебаний, следующими друг за другом в течение нескольких часов, в то время

как иррегулярные (ночные) пульсации представлены изолированными цугами (рис. 13-2-*b*). Интенсивность устойчивых пульсаций увеличивается с возрастанием периода вариаций (рис. 13-3).

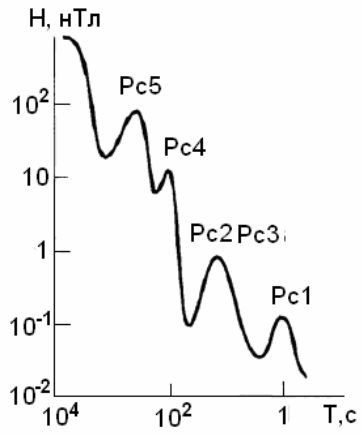


Рис. 13-3. Интенсивность геомагнитных пульсаций от периода вариаций.

Для изучения электропроводности средней мантии требуются вариации, более длиннопериодные, чем магнитные бури. Солнечно-земная физика указывает на существование таких периодичностей. Это, прежде всего, 27-дневный период вращения Солнца вокруг своей оси, сопровождающийся изменениями кольцевого тока. Магнитные вариации с основным периодом 27 дней имеют вторую гармонику с периодом 13.5 дней, а также третью гармонику с периодом 9 дней. Годовая и полугодовая вариации, связанные с движением Земли по орбите, имеют амплитуду до 5 нТл. Колебания солнечной активности с периодом 11 лет порождают самые длиннопериодные геомагнитные вариации с амплитудой около 10 нТл. При этом глубина исследования достигает 2000 км. Вторая и третья гармоники имеют соответственно периоды 5.5 и 3.7 лет.

Солнечно-суточные вариации относятся к периодическим. Они хорошо заметны на магнитограммах, особенно в спокойные дни. В средних широтах суточный ход горизонтальной компоненты магнитного поля Земли достигает 50 нТл, увеличиваясь в несколько раз в узкой полосе вдоль геомагнитного экватора. Изменение магнитного поля наблюдается в основном в дневное время.

6. 3. Интерпретация данных магнитотеллурического зондирования.
http://geophys.geol.msu.ru/STUDY/4KURS/MTS_MTP/Mts_mtp_.htm

Зависимость импеданса от периода колебаний изображают в виде амплитудных и фазовых кривых МТЗ, являющихся частотными характеристиками изучаемого разреза. В случае горизонтально-слоистой среды (ГСС) входной импеданс связан с параметрами среды следующим образом:

$$Z_N = -\frac{i\omega}{k_1} cth\left\{k_1 h_1 + arcth\left[\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \cdot cth\left(k_2 h_2 + \ldots + arcth\sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_{N-1}}}\right)\right]\right\},$$

где h_i - мощность i-слоя, ρ_i - его сопротивление, а k_i - волновое число.

Амплитудные и фазовые кривые зондирования в случае ГСС отражают изменение сопротивления горных пород с глубиной. При построении амплитудных кривых используют величину кажущегося (или эффективного) сопротивления. В практических единицах: $\rho_T = 0.2\ T|Z_N|^2$. Кривые ρ_T МТЗ, как и ρ_K ВЭЗ, строят на бланках с двойным логарифмическим масштабом. Для экспериментальных кривых по оси ординат

откладывают ρ_T, а по оси абсцисс $\sqrt{T}$. Для теоретических кривых по оси ординат откладывают ρ_T/ρ_1, а по оси абсцисс λ_1/h_1, где $\lambda_1 = (10^7 \rho T)^{1/2}$ - длина волны в первом слое.

Магнитотеллурическое профилирование (МТП), в отличие от МТЗ изучает вариации естественных полей в небольшом диапазоне периодов (обычно от 10 до 80 сек). Этот диапазон относится к наиболее регулярной во времени и пространстве части спектра. Если МТП в узком диапазоне периодов соответствует асимптотическим значениям кривой МТЗ, то из МТП можно получить информацию о таких параметрах разреза, как суммарная продольная проводимость σ (при высокоомном опорном горизонте) или суммарная мощность (глубина) H (при низкоомном опорном горизонте). Изучая поле в узком диапазоне периодов можно резко сократить время наблюдения вариаций, сгустить сеть полевых точек. При комплексировании МТП с МТЗ в благоприятных условиях удается получить важные количественные характеристики разреза, свойственные МТЗ, и высокую детальность исследований по профилю, свойственную МТП.

Интерпретация кривых МТЗ - обзор подходов. Методика интерпретации кривых МТЗ сначала была разработана для горизонтально-слоистых сред. Практические кривые МТЗ, полученные в условиях горизонтально-неоднородных сред, отличаются от кривых для ГСС. Эти отличия называются искажениями кривых МТЗ. При интерпретации полевых данных, неизбежно приходится иметь дело с искаженными кривыми, и процент таких кривых может быть довольно высок. Однако вопросы выявления и анализа искажений, качественной и количественной интерпретации искаженных кривых выходят за пределы данной задачи.

Количественную интерпретацию кривых МТЗ в рамках модели ГСС выполняют с помощью следующих способов: 1) асимптотических; 2) алгебраических или дифференциальных трансформаций; 3) палеточных; 4) по координатам экстремальных точек; 5) методом подбора на ЭВМ.

Идея первого способа состоит в том, что в случае опорного горизонта высокого удельного сопротивления кривая ρ_T имеет восходящую ветвь, наклоненную под 63°. Проводя касательную к этой асимптоте по пересечению этой асимптоты с горизонтальными линиями ρ_T =10 или ρ_T = 1, можно определить величину суммарной продольной проводимости σ до высокоомного основания разреза.

Идея второго способа состоит в преобразовании кривой $\rho_T = f(T)^{1/2}$ в кривую, как можно более близкую к $\rho_{ИСТИН} = f(H_{ИСТИН})$ или $\sigma_{ИСТИН} = f(H_{ИСТИН})$.

В основе третьего способа лежит графическое совмещение практических кривых МТЗ с теоретическими кривыми. Многослойные кривые интерпретируют по частям, используя принцип эквивалентных замен. Практические результаты интерпретации могут быть получены в пределах действия принципа эквивалентности. Эти пределы практической неоднозначности в оценке параметров промежуточных слоев могут быть определены с помощью номограмм эквивалентности Б.К.Матвеева. Установлено, что на переменном токе принцип эквивалентности проявляется в более узких пределах, чем на постоянном токе. Кроме того, для разрезов типа K и Q вместо принципа эквивалентности по T_2 на переменном токе действует эквивалентность по h_2, то есть значение сопротивления промежуточного высокоомного слоя почти не влияет на оценку мощности этого слоя.

Четвертый способ интерпретации основан на теоретических и экспериментальных связях координат характерных точек кривых МТЗ с параметрами разреза. Подробнее он будет рассмотрен ниже.

Интерпретация на ЭВМ наиболее распространена в настоящее время. С помощью ЭВМ параметры геоэлектрического разреза находятся путем минимизации функционала невязки:

$$L(q) = \sum_n \left[\frac{\rho_T(T_n) - \rho_{Tq}(T_n)}{\rho_T(T_n)} \right]^2 ,$$

характеризующего среднеквадратичное отклонение экспериментальной кривой ρ_T от модельной кривой ρ_{Tq}. Минимизацию выполняют, корректируя параметры модели q. Начальные значения q (нулевое приближение) выбирают с использованием имеющейся геолого-геофизической информации.

13. 4. Магнитотеллурические исследования электропроводности Земли (Ковтун, 1997)
Электропроводность коры по данным магнитотеллурических исследований. При постановке первых зондирований мы исходили из представления, распространенного в геофизике в 50-е годы. Земная кора древних платформ должна иметь большое сопротивление, поскольку в процессе развития породы коры подвергались нагреванию под большим давлением. И только верхний слой осадков, накопленный за время сравнительно стабильного развития платформы, может иметь небольшие сопротивления: 1-100 Ом·м. В связи с этим в геоэлектрике рассматривалась упрощенная модель коры: проводящий осадочный чехол лежит на непроводящем основании или "фундаменте". Изучение строения осадочного чехла и определение глубины залегания непроводящего фундамента являлись важной задачей электроразведки. Однако магнитотеллурический метод, обладающий огромной глубинностью по сравнению с другими методами электроразведки, мог дать представление о строении этого фундамента.

В средней части коры на глубине от 5 до 20 км нами обнаружены несколько проводящих зон. Все коровые аномалии расположены вблизи зон глубинных разломов. По магнитотеллурическим данным удалось дать примерное строение аномальных зон. Под осадочным чехлом, имеющим сопротивление 4-20 Ом·м, наблюдается понижение сопротивления верхней части коры до сотен Ом· м. Скорее всего, оно связано с графитизацией и сульфидизацией пород в зоне разлома. На глубине 15-20 км сопротивление понижается до первых десятков Ом·м. Эта область является ядром аномалии и вносит главный вклад в величину продольной проводимости аномалии. Эпицентры проводящих областей смещены от выходов разломов на поверхность в юго-западном направлении. Анализ данных геоэлектрики и других геофизических исследований, проведенный совместно с геологами, позволит в дальнейшем понять особенности тектонического развития двух геоблоков.

Наличие областей пониженного сопротивления в коре чаще всего связывают с широким распространением в ослабленных зонах графита и сульфида, которые имеют повышенную электронную проводимость. Тщательный анализ поведения кривых зондирования в этих районах показал, что сульфидизация и графитизация, безусловно, приводят к понижению сопротивления в верхней части коры. Однако самая проводящая часть аномалии, расположенная ниже 5-10 км, может иметь другое происхождение. В настоящее время представляется правдоподобной идея В.Н. Николаевского и Н.И. Павленковой о широком распространении зон горизонтальной трещиноватости на этих глубинах и присутствии свободной воды, которая при повышенной температуре обладает способностью хорошо растворять соли. Минерализованная вода заполняет трещины и значительно понижает сопротивление пород. Появление воды на этих глубинах может вызываться разными причинами. Главным источником воды может быть дегидратация - высвобождение связанной воды в областях, где температура превышает определенный уровень (300-500 °С). Однако до окончательной разработки проблемы образования зон пониженного сопротивления в коре еще далеко.

Пока исследования проводили на территории, покрытой мощным проводящим чехлом, мы были лишены возможности изучить "нормальное" геоэлектрическое строение коры. Нам удалось только выявить крупные аномалии электропроводности коры, продольная проводимость которых значительно превышала продольную проводимость

осадочного чехла. Уникальную возможность для изучения геоэлектрического строения коры представляет Балтийский щит, практически лишенный верхнего проводящего покрова.

Главной задачей при зондировании на Балтийском щите является изучение вертикального распределения сопротивления в коре и подкоровой области в условиях "нормального" залегания, то есть в районах, лишенных крупных проводящих аномалий, связанных с присутствием хорошо проводящих включений типа сульфида, графита и зон повышенной трещиноватости. Уже первые зондирования, проведенные в интервале периодов 10^{-3}-10^{4} с на Кольском полуострове вблизи поселка Териберка (профиль 9-9) и в центральной Карелии, привели к новым представлениям о "нормальном" строении коры. Ранее представления о распределении сопротивления в коре до глубины 30-40 км складывались на основании лабораторных измерений сопротивления горных пород, входящих в состав гранитного и базальтового слоев коры. В экспериментах учитывали зависимость сопротивления от температуры и влажности. Эти два параметра главным образом и определяют поведение сопротивления в коре.

По лабораторным данным, верхняя часть коры имеет сопротивление 10^{3}-10^{4} Ом·м, оно медленно растет до 10^{4}-10^{6} Ом· м на глубине 20-30 км. Повышение сопротивления до этой глубины происходит вследствие уменьшения пористости и влажности. С глубины 30 км должно происходить понижение сопротивления, вызванное ростом температуры. Однако, по данным зондирований, сопротивление коры ведет себя иначе: рост сопротивления наблюдается до глубины 8-10 км, где оно достигает 10^{4}-10^{5} Ом·м, но на глубине 10-20 км сопротивление уменьшается в десятки, а иногда и в сотни раз. По данным зондирования наиболее точно определяются положение верхней границы области пониженного сопротивления и ее суммарная продольная проводимость. Глубина залегания верхней кромки проводящего слоя в коре меняется от 10 до 20 км. Продольная проводимость корового слоя мала по сравнению с продольной проводимостью аномально проводящих зон в коре, обнаруженных нами под осадочным чехлом. В аномальных областях проводимость нередко превышает 10^{3} См. На Балтийском щите нормальная проводимость корового слоя не превышает 60-70 См. В некоторых районах Карелии продольная проводимость корового слоя уменьшается до 2-4 См. Интересно отметить, что положение верхней границы корового слоя близко к положению верхней границы крупных аномалий, обнаруженных под осадочным чехлом, что может указывать на единую природу их происхождения.

Распределение сопротивления в мантии. На Балтийском щите помимо проводящего корового слоя выделяются еще два интервала глубин, где сопротивление уменьшается в 10 раз и более. На рис. 13-4, *а* эти границы отчетливо просматриваются. Второе понижение сопротивления отмечается в верхней мантии на глубине около 100 км, а третье понижение приходится на глубину 300-400 км. Второй проводящий слой имеет на Балтийском щите продольную проводимость, меняющуюся от нескольких сот до 1000 См. Привлечение данных глубинных сейсмических зондирований позволит в дальнейшем уточнить природу этого слоя. На платформе, покрытой осадочным чехлом, он практически нигде не выделен, что может быть в случае, если его продольная проводимость невелика.

Третье понижение сопротивления на Балтийском щите отчетливо проявляется на всем северо-западе Восточно-Европейской платформы. Общность геоэлектрического строения мантии на глубине 300-400 км отражается в поведении кривых зондирования. В области больших периодов ($T > 10^{4}$ с) все кривые зондирования на северо-западе Восточно-Европейской платформы сближаются и выходят на одну нисходящую ветвь (рис. 13-4, *b*). Это объясняется тем, что даже если существует геоэлектрическая неоднородность мантии на глубине 300-400 км, то она может привести лишь к незначительному смещению кривой зондирования. Эти смещения нельзя заметить на фоне

больших погрешностей магнитотеллурического метода, связанных с упрощенной моделью источника поля и упрощенной моделью среды. Для определения электропроводности Земли на глубинах, больших 300-400 км, необходимо привлекать данные зондирований, выполненных на площади, поперечные размеры которой в несколько раз превышают глубину исследования.

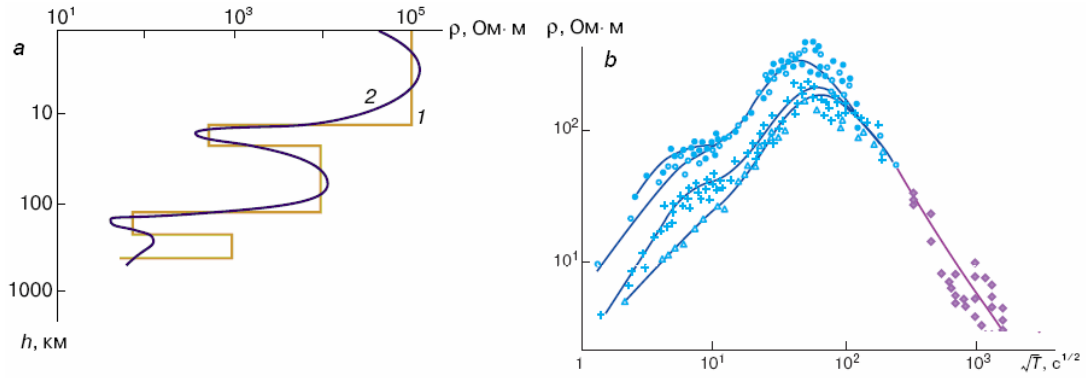


Рис. 13-4. Распределение сопротивления в коре и мантии Карелии по результатам магнитотеллурического зондирования (1 - слоистая среда. 2 – градиентная модель) – *a*. Кривые магнитотеллурического (синие точки) и магнитовариационного зондирования (сиреневые точки) на Прибалтийской впадине – *b*.

Для увеличения глубинности исследований кривые зондирования дополняют кривой магнитовариационного зондирования (МВЗ), которая может быть построена в области $T > 10^4$ с по данным обсерваторий. Для ее построения в основном используют магнитные компоненты длиннопериодных вариаций типа мировой бури. Мировая магнитная буря возникает вследствие изменения интенсивности кольцевого тока, расположенного в магнитосфере в экваториальной области на расстоянии четырех-пяти радиусов Земли. Согласно теории магнитовариационного метода, значение кажущегося сопротивления в этом случае может быть вычислено по формуле, где R_E - радиус Земли, W определяется по отношению амплитуд вариаций вертикальной (H_Z) и меридиональной (Hq) компонент магнитного поля:

$$W = \operatorname{ctg} F H_Z / Hq \ ,$$

где F - широта точки наблюдения.

Кривые зондирования, полученные в отдельных районах Северо-Запада, согласуются с магнитовариационной кривой зондирования, построенной по данным европейских обсерваторий. В результате совместной интерпретации магнитотеллурических и магнитовариационной кривых удается оценить распределение электропроводности Земли до глубины 2000 км. По этим данным, сопротивление с ростом глубины убывает: на глубине 350 км оно уменьшается до 40 Ом·м, на глубине 750 км - до 2 Ом·м, а на глубине 1200 км составляет 0,2 Ом·м. Точнее оценить распределение сопротивления на больших глубинах пока не удается.

Выявленные особенности в распределении сопротивления в коре и мантии характерны и для других регионов и континентов Земли. Обнаружено большое число крупных аномалий электропроводности коры почти на всех континентах, выявлен коровый проводящий слой на многих щитах, выделен проводящий слой в верхней мантии и определено распределение электропроводности в Земле по глобальной магнитовариационной кривой до глубины ~ 2000 км.

Электропроводность коры и верхней мантии под океанами, покрывающими почти 5/6 поверхности Земли, остается неизученной. К настоящему времени проведены лишь единичные магнитотеллурические зондирования на дне океана. Этих данных недостаточно, чтобы сделать какие-либо обобщающие выводы.

Геомагнетизм и геоэлектрика. Геомагнитные исследования служат для выделения неоднородностей по магнитным свойствам до глубин 50-100 км. Электропроводность Земли до глубин 500 км изучается глубинными магнитовариационными (ГМВЗ) и магнитотеллурическими (ГМТЗ) зондированиями.

Региональные исследования методом ГМТЗ обнаруживают отклонения от кривой, характерной для платформенных областей. Их объясняют существованием слоя повышенной электропроводности в мантии на глубине 100-200 км. В целом с глубиной возрастает как электропроводность пород, так и температура недр. На глубинах 100-200 км градиент температуры уменьшается. Это можно объяснить минимумом теплопроводности и существованием здесь «тепло запирающего» слоя, препятствующего выходу тепла земных недр наружу. Наличие хорошо проводящих астеносферных (перегретых) слоев обнаружено в ряде районов Земли (в частности, в Байкальском регионе, на Сахалине и в Прикарпатье). Иногда они коррелируются с зонами понижения сейсмических скоростей, но смещены по глубине.

Структура и физическое состояние недр Земли. Исследование больших глубин Земли геофизическими методами дает возможность оценить изменения физических параметров температуры и химического состава с глубиной, а также изучать происходящие в недрах процессы.

Наибольшие изменения с глубиной скоростей сейсмических волн, упругих модулей, плотности и поля силы тяжести происходят вдоль радиуса Земли. Особенно они велики на границах мантии и внешнего ядра, внешнего и внутреннего ядра (рис. 1-1). Отклонения физических параметров по латерали, наблюдаемые в мантии, невелики (до 20%) по сравнению с их средними значениями, но они сложным образом распределены в объеме Земли. По сейсмологическим данным, внешнее ядро не пропускает поперечные волны, что говорит о его жидком фазовом состоянии. Кроме того, существование у Земли геомагнитного поля и его вековых вариаций указывает на возможность движения электропроводящего вещества в ядре, что также связано с его жидким состоянием и металлическими свойствами. Высокая плотность в дополнение к указанным фактам позволяет предположить, что основная масса вещества ядра Земли представлена железом, а верхняя часть является силикатной. Подобным же образом на два класса разделяются метеориты. Это служит основой при выборе модели изменения химического состава Земли с глубиной в предположении, что она образована из метеоритного вещества.

Силикатная часть Земли, слагающая мантию, предположительно представлена минералами, образующими породы типа перидотитов, состав которых близок к составу хондритов. Наличие в мантии Земли " границ " с резким возрастанием скоростей упругих волн связывают с фазовыми переходами. Такие фазовые переходы с изменением плотности до 10% могут быть на глубинах 450 км (переход оливин - шпинель), 700 км (переход шпинель - перовскит). Наблюдается и ряд других переходов. Указанные глубины соответствуют адиабатическому распределению температур. Однако латеральная неоднородность Земли, выявляемая по сейсмическим данным, позволяет сделать вывод о механической неустойчивости такого распределения, что приводит к глубинным движениям вещества или конвекции. Из-за конвекции в Земле распределение температур имеет сложный характер, и поэтому границы фазовых переходов, или сейсмические границы, находятся на различных глубинах в разных регионах. Среднее распределение температур близко к адиабатическому, и только вблизи границ наблюдаются резкие градиенты. Области градиентов называются пограничными слоями.

На основании изложенных представлений в настоящее время делаются попытки обосновать движения вещества мантии Земли и выявить основные тектонические структуры, которые ими порождаются. Разработка моделей конвекции в Земле и их

согласование с наблюденными геофизическими полями и тектоническими структурами находятся в самом начале. Сам эволюционный характер геологических процессов связан с деформациями периферической оболочки под воздействием движения вещества Земли на больших глубинах.

Строение недр под океанами. Предметом глубинных исследований в океанах являются литосфера и астеносфера, т.е. верхняя часть Земли мощностью в несколько сотен километров. Задачами этих исследований являются определение мощности и строения земной коры, литосферы (относительно жесткой и холодной оболочки Земли, в которой вещество полностью раскристаллизовано), а также астеносферы или части оболочки Земли (мантии), содержащей заметную долю расплавов.

Основную информацию о мощности земной коры и литосферы как на суше, так и в океанах дает сейсморазведка методами отраженных и преломленных волн (МОВ и МПВ), а также общей глубинной точки (МОГТ). Мощность земной коры в океанах значительно меньше, чем на суше, и изменяется от 5 до 10 км, а литосферы - от 10 км (в рифтовых зонах) до 120 км (в глубоководных впадинах). Поверхность Мохоровичича, или подошва земной коры, выделяется увеличением (скачком) скоростей упругих волн, а поверхность астеносферы - уменьшением скоростей. Это объясняется сменой в литосфере литологии преимущественно кислых изверженных пород (гранитов) земной коры на преимущественно основные породы (базальты). Вещество в этих оболочках, т.е. на сравнительно небольших глубинах (до 120 км), находится в твердом, полностью раскристаллизованном состоянии. Астеносфера же содержит как расплавленную часть, сложенную легкоплавкими базальтами, так и кристаллическую часть, представленную ультраосновными породами.

В астеносфере, по данным терморазведки, наблюдаются повышенные градиенты температуры, а по данным электромагнитных зондирований, встречаются электропроводящие зоны. Эти материалы, наряду с другими геофизическими, геологическими и расчетными результатами, подтверждают наличие в астеносфере расплавов. Их присутствие и объемы отображаются изменением состава, температуры, возраста вещества в разных частях недр под океанами. На основании этого было установлено, что мощность литосферы океанов уменьшается более чем на порядок по сравнению с материками.

Наиболее полно геолого-геофизическое строение океанов представлено в работе Э.М.Литвинова " Введение в морскую геофизику " (1993), в соответствии с которой и дано описание строения дна океанов.

Структура дна Мирового океана. Батиметрическими (измерения глубин дна), геофизическими и геологическими методами в Мировом океане выделены три типа основных геоморфологических провинций (структур): срединно-океанические хребты, глубоководные океанические котловины и переходные зоны от океанов к материкам. В них меняются мощность и строение донных осадков, земной коры и литосферы.

Срединно-океанические хребты, расположенные в центре всех океанов и имеющие общую протяженность около 100 тыс. км (17% площади океанов), представляют собой подводные горы (валы) с пологими склонами. Они в каждом океане вытянуты на тысячи километров, имеют ширину десятки-первые сотни километров. В центре каждого хребта располагаются узкие ущелья (рифтовые долины), ограниченные по бокам гребневыми горами. Все подводные хребты разбиты поперечными трансформными разломами, расстояния между которыми составляют десятки километров.

Глубоководные океанические котловины, занимая более половины площади Мирового океана, отличаются выровненным горизонтальным рельефом и наличием локальных подводных гор.

Переходные зоны от океанов к материкам в тектонически активных зонах характеризуются вытянутыми параллельно материкам валами, котловинами, островными горными сооружениями, а рельеф дна отличается наибольшей для Земли контрастностью (до 15 км). В относительно тектонически пассивных переходных зонах наблюдается спокойный рельеф.

В целом рельеф дна океанов отражает глубинные процессы Земли, ее активную жизнь, проявляющуюся в структуре физических полей и их эволюции в истории Земли.

Геодинамические процессы. Вещество геосфер Земли находится в непрерывном движении и изменении. Быстрее всего они протекают в жидкой и газообразной оболочках, но основное содержание истории развития земного шара составляют гораздо более медленные изменения, совершающиеся во внутренних геосферах, сложенных преимущественно твёрдым веществом; именно изучение их природы и динамики необходимо прежде всего, для верного понимания современного и всех прошлых состояний Земли.

Среди процессов, совершающихся в недрах и на поверхности Земли, различают две главные группы. Первую образуют внутренние, или эндогенные, процессы, движущим началом которых является внутренняя энергия Земли (главным образом энергия радиоактивного распада). Вторую группу составляют внешние, или экзогенные, процессы, порождаемые поступающей на Землю энергией солнечного излучения. Эндогенные процессы свойственны главным образом глубинным геосферам. В нижних зонах земной коры, в верхней мантии, видимо, и много глубже происходят перемещения огромных масс вещества, его расширение, сжатие и фазовые превращения, происходят миграция химических элементов, циркуляция тепловых и электрических токов и так далее. Несомненно, что в своей совокупности они обусловливают непрерывно идущий процесс глубинной дифференциации вещества, приводящий к концентрации более лёгких его компонентов в верхних, а более тяжёлых - в глубоких геосферах. В мантии движущим фактором, по-видимому, является механизм, подобный зонной плавке. В результате которого химические элементы (или соединения) закономерно распределяются между легкоплавкой и тугоплавкой фазами. Глубинные эндогенные процессы воздействуют на земную кору, вызывая вертикальные и горизонтальные перемещения отдельных её участков и блоков (движения земной коры), деформацию и преобразование внутренней структуры земной коры. Все эти процессы называются тектоническими, а область их проявления, охватывающая, кроме земной коры, по меньшей мере, и верхнюю мантию, - тектоносферой. В тесной взаимосвязи с тектоническими процессами протекают процессы магматические, заключающиеся во внедрении в земную кору поднимающейся снизу магмы (глубинный магматизм) и в излиянии её по трещинам на поверхность Земли в виде лавы (вулканизм). В ходе тектонических деформаций (дислокаций) и внедрений магмы происходят также процессы метаморфизма горных пород, изменяющих свой минералогический состав и структуру под воздействием повышенных давлений и температур.

13. 5. Физические основы применения магнитотеллурики для изучения литосферы и астеносферы (Ваньян, Бердичевский, Пушкарев, 2001) **.**

Особенностью электропроводности сухих кристаллических горных пород нижней коры и верхней мантии является ее монотонное повышение с глубиной. Соответственно удельное сопротивление монотонно понижается от десятков тысяч Омметров в нижней части земной коры до нескольких десятков на глубине 300 км. Согласно современным представлениям существуют две главные физические причины уменьшения удельного сопротивления вещества верхней мантии:

1. Рост температуры приводит к увеличению концентрации ионов, служащих переносчиками электрических зарядов. Кроме того, возрастает скорость движения ионов.

Моделирование в лабораторных условиях под действием температуры, достигающей 1000-1500°С при давлении до (5-7) 10^3 МПа (50-70 кбар) является весьма сложной технической задачей. Поскольку имеющиеся данные говорят об относительно более слабом влиянии давления, чем температуры, в большинстве лабораторных измерений основное внимание уделено изучению роли температуры. На рис. 6-5 показаны результаты исследования электропроводности ультраосновных пород в атмосфере аргона, выполненного С.С.Реем и М.Г.Маньяни. Эти данные, относящиеся, по-видимому, к наиболее представительным, попадают в центральную часть полосы разброса данных многочисленных авторов.

Геотермическая изученность континентов и океанов значительно выше, чем геоэлектрическая. Практически в настоящее время достоверно определены средние величины теплового потока в нескольких десятках регионов докембрийских платформ, зон разломно-магматической активизации, глубоких впадин с субокеанской корой, молодых орогенов и океанских котловин.

Рассмотрим некоторые тепловые и электромагнитные данные различных типов геологических структур. Значения теплового потока на тектонически пассивных докембрийских щитах и платформах заключены, как правило, в пределах 30-50 мВт/м^2 (см. рис. 6-6). Основная часть тепловой энергии производится в коре, из мантии поступает примерно 11±5 мВт/м^2. Более или менее достоверный расчет температур, выполняемый по величине теплового потока и теплогенерациями слоев коры, возможен до глубин около 100-150 км. Глубже температура слабее связана с современным тепловым потоком и может быть вычислена только как следствие тепловой истории.

2. Как отмечает В.А. Магницкий, на глубине свыше 400 км включается более мощный механизм электропроводности, повышающий ее на несколько порядков. Чтобы объяснить природу этого механизма, был предложен переход на собственную электронную проводимость под действием возрастающего давления. Поскольку распределение давления в мантии приближается к сферически-симметричному, следует ожидать, что подобной симметрией характеризуется и электропроводность на глубине свыше нескольких сотен километров.

Монотонное убывание удельного сопротивления с глубиной вследствие двух причин, о которых говорилось выше, не позволяет оценить положение границы между литосферой и астеносферой. Ситуация радикально улучшается в результате появления в астеносфере базальтовой выплавки. Поскольку это возможно лишь при достижении температуры солидуса, ясно, что для геоэлектрики различие между литосферой и астеносферой имеет геотермическую природу. Чтобы воспользоваться лабораторными данными для построения геоэлектрической модели верхней мантии, необходимо задаться той или иной геотермической моделью. По семейству геотерм для континентальных и океанских областей Земли (рис. 13-6), видно, что во всех областях температура верхней мантии монотонно нарастает с глубиной. На глубине 100 км температура достигает 800 °С для теплового потока 40 мВт/м^2, свойственного докембрийским щитам, и превышает 1300 ° С для повышенного значения потока 90 мВт/м^2.

Важнейший вывод, который следует из геотермических расчетов, заключается в том, что для достаточно больших тепловых потоков существует интервал глубин, где температура превышает точку начала плавления (т.е. солидус). Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные о солидусе пород верхней мантии характеризуются значительным разбросом, что влияет на точность геотермического определения глубины области частичного плавления. Тем не менее, все данные, несмотря на заметную разницу между ними, указывают на увеличение температуры начала плавления с глубиной.

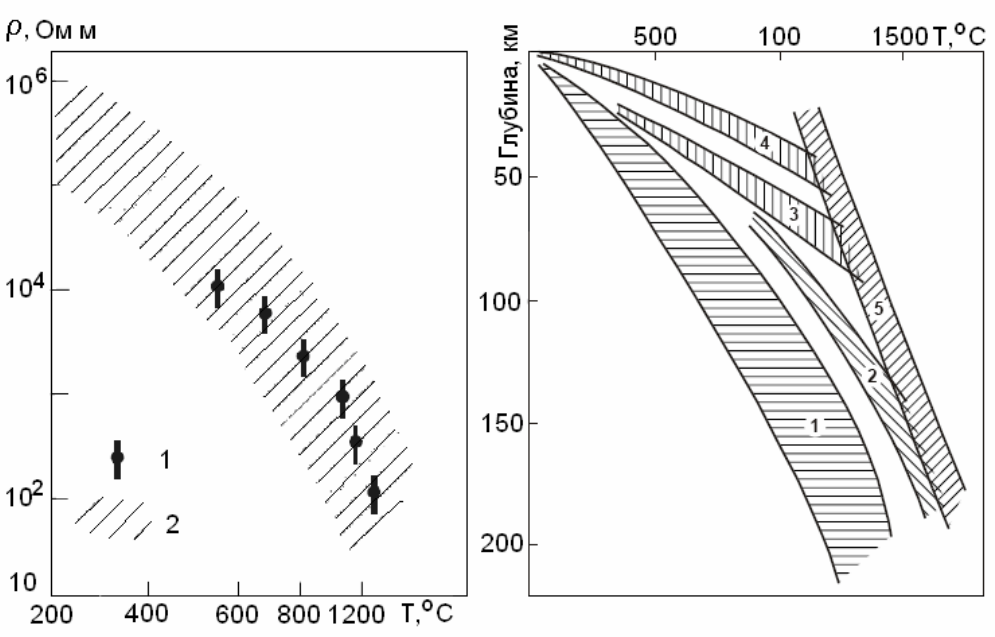


Рис. 13-5 Зависимость удельного электрического сопротивления ультраосновных пород от температуры: 1 - данные Рэя и.Маньяни; 2 - область экспериментальных результатов различных авторов.

Рис. 13-6. Геотермы для континентов и океанов: 1 – докембрийские щиты и платформы; 2 – герцениды; 3 – океанские плиты; 4 – альпиды; 5 – солидус сухих пород верхней мантии.

Зависимость электропроводности от содержания жидкой фазы и геометрии порового пространства. Частично расплавленная горная порода представляет собой двухфазную систему, состоящую из твердого, обычно плохо проводящего скелета и более проводящей выплавки, заполняющей поры. Хотя исследователи, как правило, не располагают достаточной информацией о геометрии поровых каналов, несомненно, что часть этих каналов не создает сквозных путей для электрического тока. Поэтому обычно используются два метода исследования: 1) расчет удельного сопротивления идеализированной модели горной породы; 2) лабораторное изучение связи удельного сопротивления с коэффициентом пористости.

Существующие способы расчета позволяют исследовать двухфазные модели, состоящие из флюида, в который погружены сферы, кубы или эллипсоиды. Самая простая модель - кубические зерна (размер стороны A) с удельной электропроводностью σ_0 окружены флюидом, имеющим удельную электропроводность σ_Φ и образующим сквозную пленку толщиной α.

Заметим, что в переносе электрического тока участвует не весь электролит. Элементы, параллельные граням, к которым приложено напряжение, не участвуют в переносе. Нетрудно вычислить проводимость куба:

$$\Sigma = \sigma_\Phi \frac{2\alpha A}{A+\alpha} + \frac{A^2}{A/\sigma_0 + \alpha/\sigma_\Phi}.$$

Учитывая, что $A >> \alpha$, $A/\sigma_0 >> \alpha/\sigma_\Phi$, имеем

$$\Sigma = 2\alpha\sigma_\Phi + A\sigma_0.$$

Если $\alpha \le 10^{-3}A$, то при обычно принимаемых соотношениях удельной электропроводности флюида и скелета $2\alpha\sigma_\Phi >> A\sigma_0$, так что $\Sigma = 2\alpha\sigma_\Phi$.

Введем эффективную удельную электропроводность двухфазной среды $\sigma = \Sigma/(A + \alpha)$. Тогда $\sigma = 2\sigma_\Phi\alpha/A$. Отношение α/A нетрудно выразить через объемную концентрацию флюида. Кубик твердой фазы объемом A^3 окружен тремя параллелепипедами, имеющими

толщину α и площадь боковых граней A^2. Следовательно, отношение объемов флюида и скелета (т.е. коэффициент пористости) равно $k_п = 3\alpha / A$, откуда

$$\sigma = k_п \sigma_Ф/3.$$

Таким образом, удельная электропроводность простейшей модели двухфазной среды пропорциональна электропроводности флюида и его объемному содержанию. Коэффициент 2/3 отражает тот факт, что не весь объем флюида участвует в переносе электрического тока. Для моделей с более сложной геометрией порового пространства необходимо ввести коэффициент *c,* зависящий от доли сквозных каналов *p,* т.е. $\sigma = ck_n\sigma_Ф$. Т.Д.Шенкленд и Г.С.Вафф провели численный эксперимент с целью выяснения зависимости коэффициента *c* от *p* . Они рассмотрели сеточную модель, состоящую из 2340 ветвей. Отключая часть ветвей по закону случайных чисел, исследователи установили, что величина *c* уменьшается на порядок, если только половина всех каналов образует сквозную систему (рис. 13-7). В отличие от рассмотренной простейшей модели, результаты теоретических расчетов для эллипсоидальных включений указывают на пропорциональность электропроводности квадрату пористости. Сравним теоретические данные с результатами лабораторных исследований.

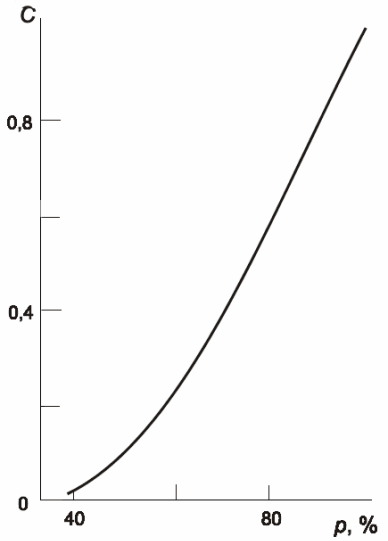


Рис. 13-7. Зависимость относительной электропроводности от доли связанных каналов.

Экспериментально установленная связь электропроводности с коэффициентом пористости (закон Арчи) описывается обычно формулой $\sigma/\sigma_Ф = k^2_n$. Сопоставляя экспериментальную формулу с выражением для идеализированной модели, можно выразить коэффициент *c* через пористость: $c = k_n$. Например, при k_n = 100 % в соответствии с упоминавшимися выше результатами Т.Д.Шенкленда и Г.С.Ваффа около 50 % каналов образуют сквозную сеть. С уменьшением пористости возрастает доля изолированных объемов флюида, не вносящих вклада в перенос электрического тока, что отражается в уменьшении *c*. Связь электропроводности, частично расплавленных пород верхней мантии с процентным содержанием расплава изучена японскими геофизиками.

На рис. 13-8 показаны зависимости удельного сопротивления от гомологической температуры (отношение температуры *T* к солидусу сухих пород верхней мантии *T*п) при давлении 0.5 и 1.0 ГПа. Сопротивление убывает в пределах литосферы при повышении температуры до 1170°. При этой температуре отмечается характерный излом графика, который соответствует началу плавления, т.е. солидусу пород верхней мантии. При дальнейшем повышении температуры уменьшение сопротивления ускоряется, что объясняется увеличением содержания расплава. Для сравнения на том же рисунке показано уменьшение скорости продольных сейсмических волн вследствие появления жидкой фазы. Уменьшение скорости на 1 км/с (около 15 %) соответствует уменьшению удельного сопротивления примерно в 100 раз.

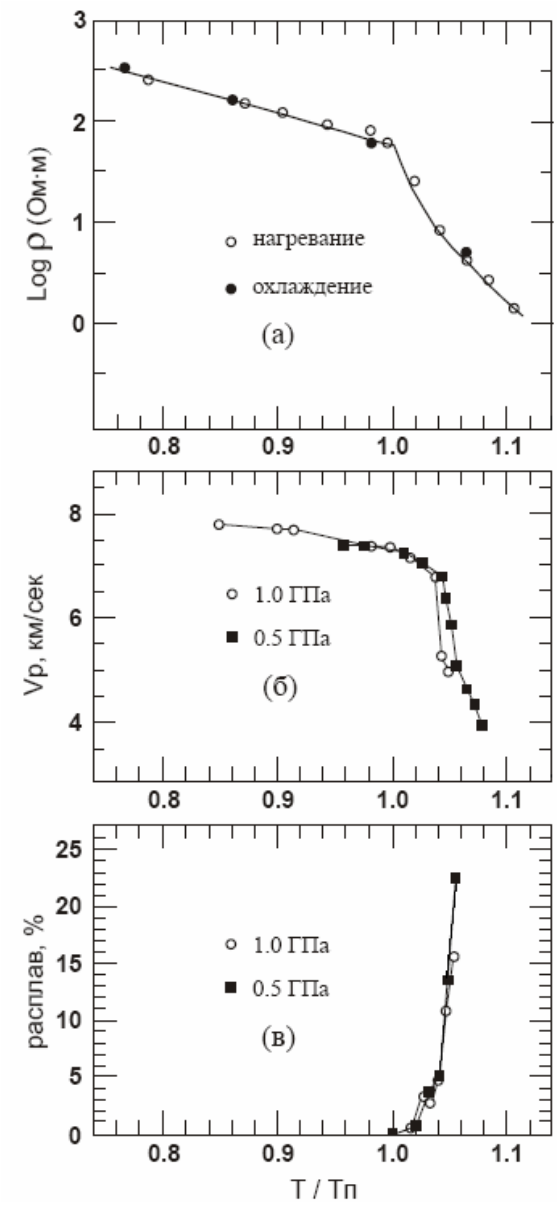


Рис. 13-8. Зависимость удельного сопротивления (а), скорости продольных волн (б) и содержания расплава (в) от гомологической температуры.

На рис. 13-9 показана зависимость электропроводности частично расплавленных пород верхней мантии от процента расплава по данным Фуджи.

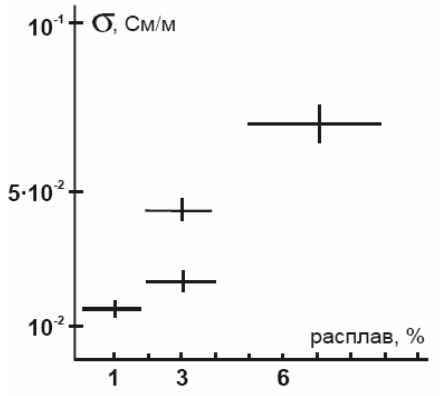


Рис. 13-9. Зависимость электропроводности ультраосновных пород от содержания расплава.

Прогноз геоэлектрического строения тектоносферы океанов. По современным представлениям основой тепловой эволюции океанов является остывание литосферы, образующейся в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов. Расчет глубинных температур затруднен из-за сложности выделения кондуктивной части теплового потока в широкой полосе вдоль рифтовой зоны. Это связано со значительным вкладом в наблюдаемый тепловой поток конвективного выноса тепла гидротермами. При оценке температуры океанической верхней мантии эффективным оказался способ, основанный на решении уравнения теплопроводности с учетом данных о возрасте литосферы. Учитывая небольшую мощность коры, вкладом радиогенного тепла обычно пренебрегают. Геотермы на рис. 13-6 характеризуют хорошо развитую, относительно неглубокую астеносферу, которая протягивается параллельно рифтовой зоне Мирового океана на десятки тысяч километров полосой, имеющей ширину 2000-3000 км.

Как считают большинство исследователей, температурные различия на глубинах 250-350 км сглаживаются, поэтому распределение температуры приближается к сферически-симметричному. Однако известны структуры, в которых распределение температуры отличается от сферически симметричного на глубинах в сотни километров. Это, прежде всего, зоны субдукции, например, вдоль Курильской островной дуги.

Воспользуемся геотермическими данными и рис. 13-6, чтобы построить прогнозную модель геоэлектрического разреза.

Переходя к моделям геоэлектрического разреза океанической верхней мантии, отметим, что при одинаковом значении теплового потока на поверхности Земли температура мантии под океаном выше, чем под континентом. Практически весь тепловой поток, регистрируемый на дне океана, мантийного происхождения. Модели геоэлектрического разреза, изображенные на рис. 13-10, построены с помощью температурной зависимости удельного сопротивления и оценок содержания базальтового расплава в астеносфере различного возраста. Судя по результатам расчета остывания океанической литосферы, опирающегося на сейсмологические оценки ее мощности, степень развития астеносферы при возрасте 40 млн. лет близка к той, которая предполагается в активных зонах континентов с тепловым потоком 90-100 мВт/м^2.

Прогноз геоэлектрического строения тектоносферы стабильных континентальных зон. Рассмотрим “холодные” докембрийские плиты, где тепловой поток составляет 40-45 мВт/м^2 и геотермы не пересекают кривой солидуса. Согласно лабораторным данным удельное сопротивление плавно уменьшается от $2\cdot10^5$ Омм на глубине около 40 км до $3\cdot10^2$ Омм на глубине около 100 км. Градиентный характер геоэлектрического разреза верхней мантии является его важнейшей отличительной чертой (кривая 1, рис. 13-11).

Характерная особенность “холодного” платформенного разреза – весьма слабое развитие или полное отсутствие астеносферной зоны частичного плавления. Это утверждение основано на двух группах факторов: 1) расчетные температуры верхней мантии не достигают солидуса лерцолитов, которыми она сложена, судя по современным представлениям; 2) сейсмологические наблюдения не обнаруживают мощного низкоскоростного волновода, который обычно связывается с астеносферной зоной частичного плавления. Согласно данным сейсмологии, скорости продольных волн в верхней мантии докембрийской Русской платформы монотонно нарастают от подошвы земной коры до глубины 300 км.

Итак, мы рассмотрели геоэлектрический разрез, характеризующий “холодные” докембрийские плиты. Однако наиболее интересные особенности глубинной электропроводности связаны с «горячими» активными регионами, к анализу которых мы и переходим.

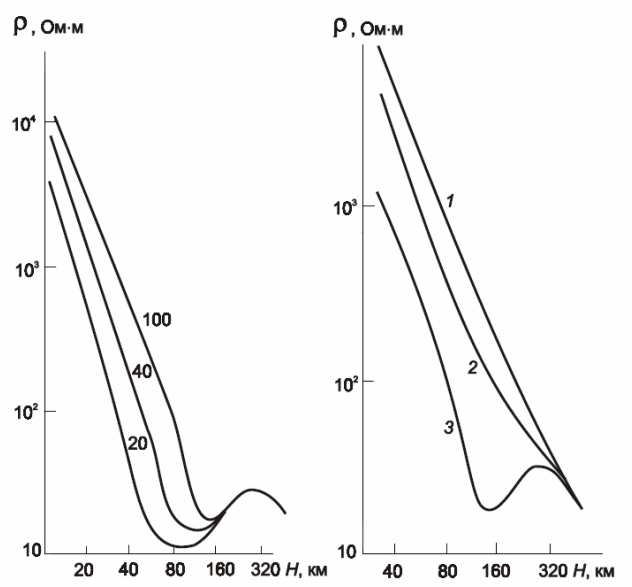


Рис. 13-10. Прогнозные модели геоэлектрического разреза для трех значений возраста дна океана (цифры у кривых - в млн. лет).

Рис. 13-11. Прогнозные модели удельного электрического сопротивления континентов для трех различных значений теплового потока: 1 - 40; 2 - 60; 3 - 90 мВт/м^2

Прогноз геоэлектрического строения тектоносферы активных континентальных областей. Для наших построений рассмотрим в качестве примера геотерму, соответствующую тепловому потоку 90 мВт/м^2. Она достигает солидуса пород верхней мантии на глубине около 70-80 км. На этой глубине появляются первые следы базальтовой выплавки. Степень плавления максимальна на глубине 130-150 км, где превышение температуры над солидусом наибольшее. Глубже температурный градиент уменьшается, и, начиная с глубины приблизительно 200 км, температура верхней мантии становится ниже солидуса. Таким образом, в интервале глубин от 70-80 до 200 км предполагается существование частично расплавленного вещества.

Согласно современным представлениям и реальным температурным условиям содержание в породах астеносферы жидкой фазы (базальтового расплава) не превышает 5 %. Для построения геоэлектрической модели, соответствующей рассмотренным геотермическим условиям, выделим области.

Первая область - литосфера - твердая оболочка, температура которой ниже солидуса. В этой области можно определить удельное сопротивление с помощью графика температурной зависимости, изображенного на рис. 6-6. Результаты построений показаны на рис. 13-11. Удельное сопротивление для кривой 2 ниже нормального, однако, астеносферный проводящий слой не отмечается, поскольку геотерма дне пересекает кривой солидуса. Для кривой 3 удельное сопротивление изменяется от 2000 вблизи подошвы земной коры примерно до 100 Омм на глубине 80 км. Таким образом, удельное сопротивление пород литосферы, находящихся в твердом состоянии, понижается под влиянием температуры в 20 раз.

Вторая область, которая под континентами существует только в “горячем” геоэлектрическом разрезе - это астеносферная зона частичного плавления. Геотерма, соответствующая кривой 3, пересекает кривую солидуса, температура превышает солидус на 6-7 % на глубине 130-150 км, что соответствует приблизительно 2-3 % базальтовой выплавки. На глубине около 200 км отмечается второе пересечение геотермы и кривой солидуса, т.е. подошва зоны частичного плавления. В этой зоне главный вклад в электропроводность вносит флюид - базальтовый расплав. Поэтому механизм

электропроводности является здесь электролитическим. Если воспользоваться формулой удельной электропроводности для кубических или сферических высокоомных зерен, окруженных со всех сторон проводящим флюидом, получим при объемном содержании расплава в три процента $\sigma = \sigma_Ф$, где $\sigma_Ф$ - удельная электропроводность базальтового расплава. Экспериментальные данные показывают, что $\sigma_Ф$ изменяется от 1 до 10 См/м. Если принять в среднем $\sigma_Ф$ = 3 См/м, то σ = 0,06 См/м. К сожалению, точность подобных оценок невелика из-за отсутствия информации о том, какая часто каналов, заполненных расплавом, образует сквозные пути для электрического тока. В зависимости от геометрии порового пространства удельная электропроводность частично расплавленного вещества может уменьшиться в несколько раз по сравнению с приведенной выше оценкой. По-видимому, в центре зоны частичного плавления удельное сопротивление составляет 10-20 Омм, на верхней и нижней ее границах приближаясь к удельному сопротивлению твердой фазы. Столь низкие значения удельного сопротивления, а также область инверсии в интервале 150-200 км выделяют зону частичного плавления как уникальный слой верхней мантии. В то же время следует отметить, что градиент уменьшения удельного сопротивления в астеносфере «горячих» областей ненамного превышает соответствующую величину для литосферы. Начало плавления отмечается не скачком электропроводности, а лишь некоторым увеличением скорости ее нарастания с глубиной.

Третья область охватывает интервал глубин 250-350 км. Как отмечалось выше, по существующим представлениям здесь сглаживаются температурные различия между большинством геотермических регионов. Чтобы объяснить природу этого механизма, был предложен переход на собственную электронную проводимость под действием возрастающего давления. Поскольку распределение давления в мантии приближается к сферически-симметричному, следует ожидать, что подобной симметрией характеризуется и электропроводность на глубине свыше нескольких сотен км.

Для изучения границы между литосферой и астеносферой с использование магнитотеллурических зондирований наиболее благоприятны тектонически активные области континентов, а также океаны. В этих областях астеносфера характеризуется 2-3 % базальтовой выплавки, понижающей удельное сопротивление двухфазной среды в несколько раз, т.е. на сотни процентов. Дополнительное понижение, как показывают новейшие исследования, может иметь место благодаря присутствию долей процента (по объему) соленой надкритической воды.

13. 6. Роль водорода в электропроводности верхней мантии (Karato. 1990).

Наличие в глубинах Земли водорода способствует объяснению ряда свойств вещества, например, величину электропроводности астеносферы. Karato показывает, что электропроводность астеносферы выше, чем у сухого оливина и базальта при температуре T ≈ 1200 – 1400 °C. Возможная причина этого заключается в присутствии растворенного водорода. Он вводит параметр: отношение концентраций “водород/кремний” (H/Si), на глубине 100 км величина H/Si порядка 10^{-3}-10^{-4}.

. Присутствие водорода в веществе земных оболочек позволяет воспользоваться его удивительной и уникальной способностью образовывать т.н. водородные связи между элементами (атомами, молекулами, ионами и т.п.) вещества. Как будет следовать из дальнейшего изложения, этот подход позволяет найти объяснение свойств и структуры земного вещества альтернативное общепринятой точке зрения.

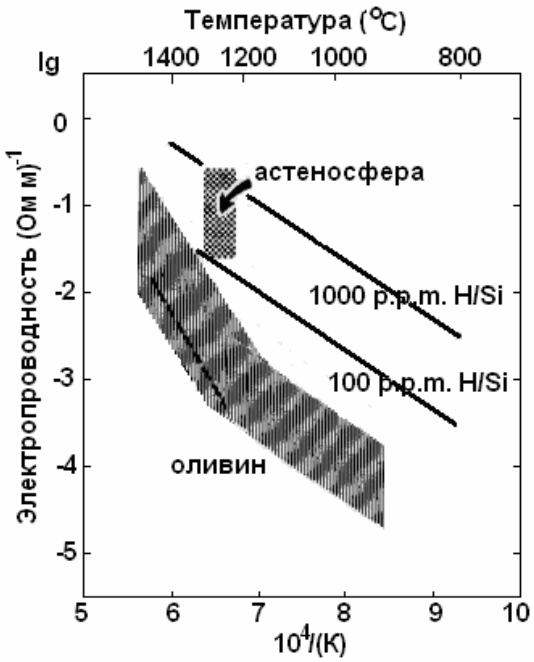


Рис. 13-12 .Электропроводность оливина как функция температуры и концентрации водорода (Karato. 1990). Пунктирная линия показывает электропроводность при диффузии в оливин Mg^{2+} или Fe^{2+}.Сплошные линии показывают, как меняется электропроводность при диффузии в оливин водорода в соответствующих концентрациях. Область, отмеченная точками, показывает проводимость астеносферы, оцененной по анализу вариаций геомагнитного поля и температуры астеносферы. (1 p.p.m. = 10^{-6}).

13. 7. Электропроводность Земли.

Общепринятая модель Земли однозначно определяет наличие железного ядра. Отсюда следует скачек в электропроводности на границе ядро-мантия. Величина скачка должна достигать нескольких порядков. Обнаружение его методами электромагнитного зондирования - было бы прекрасным подтверждением модели. Некоторые авторы (Ротанова, Пушков, 1982) считали, что получены «оценки, которые подтверждают наличие скачка электропроводности на границе ядро-мантия $\sigma = 10^5 – 10^6$ (Ом·м)$^{-1}$». Эти результаты получены по данным о 60- и 30-летних вариаций геомагнитного поля. На рис. 13-13 треугольник «В» показывает обобщенные данные по геоэлектрическим разрезам нижней мантии, полученные Коломийцевой, Олдриджем, Стейси, Макдональдом, Дюкруи, Куртийо, Моэлем, Бэнксов и др.

Штриховая линия на этом рисунке показывает область величин электропроводности, соответствующий периодам вариаций в 11 лет. По-видимому, это наиболее достоверный результат, т.к. вариации с более длинными периодами (десятки и сотни лет) нельзя считать регулярными и повсеместными. Поэтому данные по вековым вариациям (кривая 2) продолжены как штриховые. Скачек проводимости должен наблюдаться в точке, пересечения кривой 2 с границей ядро-мантия до величины $\sigma = 10^5 – 10^6$ (Ом·м)$^{-1}$ (линия А). Эта величина проводимости соответствует проводимости железа внешнего ядра. Правая шкала рис. 13-13 показывает длительность периода вариаций, соответствующий проводимости (на левой шкале). Таким образом, если мы хотели бы получить оценку электропроводности ядра, мы должны были бы зондировать его колебаниями с периодом 10^5 лет. Более того, если какие-либо процессы, связанные с генерацией геомагнитного поля происходят в жидком ядре, то время их выхода на поверхность земли должно быть такого же порядка. На это указывает и Паркинсон (1986).

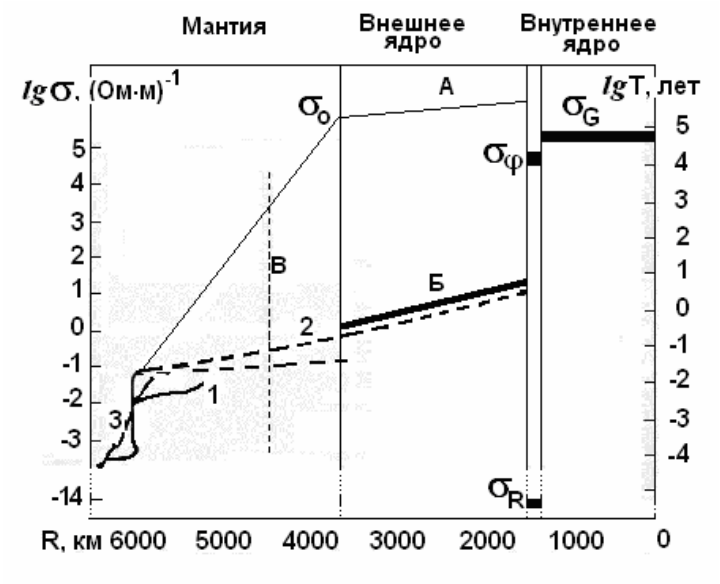


Рис. 13-13. Изменение электропроводности Земли (σ) с глубиной, по данным геомагнитных вариаций (1), вековых вариаций (2) и ГМТЗ (3) (Ротанова, Пушков, 1982). Интерполяция кривой 3 в область высоких проводимостей σ_o, А – проводимость во внешнем железном ядре, скачек 2-σ_o на границе ядро-мантия; Б - σ_o внешнего ядра, согласно нашей модели; В - предел достоверных значений σ. Электропроводность F- слоя: σ_φ - геострофического потока, σ_R - радиального переноса; σ_G – электропроводность вещества внутреннего ядра. Правая шкала показывает T - время диффузии магнитного поля.

Однако из практики геомагнетизма следуют совсем другие времена (глава 12). Минимальный период вариаций, полученный по палеомагнитным данным, это примерно 100 лет. Короче период распознать не удается по техническим причинам, в основном из-за скорости осадконакопления и малой толщины образца. Джерки, - явления современного геомагнетизма происходят не длиннее чем за один год. Вероятно, эту цифру можно считать наименьшим периодом вариаций геомагнитного поля, ей соответствует величина $\sigma = 10^1$ (Ом·м)$^{-1}$. Продолжение линии 2 приводит к точке «Б» на границе внутреннего ядра. Проблема электропроводности Земли решается элементарно, если предположить, что внешнее ядро состоит из того же материала, что и мантия, а генерация геомагнитного поля (как это следует из главы 12) происходит на границе внутреннего ядра.

Электропроводность F-слоя.

Принято считать, что ядро Земли состоит из железа: жидкого – во внешнем ядре и твердого – в ядре внутреннем. Согласно этому представлению, на границе ядро-мантия должен иметь место скачек в электропроводности, а его величина должна достигать нескольких порядков. Обнаружение постулированного в модели холодной Земли такого скачка методами электромагнитного зондирования - было бы прекрасным подтверждением модели. Некоторые авторы [Ротанова, Пушков, 1982] считали, что были получены «оценки, которые подтверждают наличие скачка электропроводности на границе ядро-мантия: $\sigma = 10^5 – 10^6$ (Ом·м)$^{-1}$». Это результаты интерпретации данных по 60- и 30-летним вариациям геомагнитного поля, которые нельзя считать достаточно достоверными. На рис. 13-13 верхняя линия (2 - σ_o) показывает область данных по геоэлектрическим разрезам нижней мантии, полученных Коломийцевой, Олдриджем, Стейси, Макдональдом, Дюкруи, Куртийо, Моэлем, Бэнксов и др. [Ротанова, Пушков, 1982]. Несмотря на повторение многими авторами этого результата, он вызывает сомнение, дело в том, что штриховая линия В на рис. 3-*б* ограничивает область величин электропроводности, соответствующий периодам вариаций в 11 лет. По-видимому, это

наиболее достоверный результат, т.к. вариации с более длинными периодами (десятки и сотни лет) нельзя считать регулярными и повсеместными. Поэтому данные по вековым вариациям (кривая 2) продолжены как штриховые. Скачек проводимости должен наблюдаться в точке, пересечения кривой 2 с границей ядро-мантия до величины $\sigma = 10^5 - 10^6$ (Ом·м)$^{-1}$ (линия А). Эта величина проводимости соответствует проводимости железа внешнего ядра. Правая шкала рис. 13-13 показывает длительность периода вариаций, соответствующий проводимости (на левой шкале). Таким образом, если мы хотели бы получить оценку электропроводности ядра, мы должны были бы зондировать его колебаниями с периодом 10^5 лет. Более того, если какие-либо процессы, связанные с генерацией геомагнитного поля происходят в жидком ядре, то время их выхода на поверхность Земли должно быть такого же порядка. На это указывает и Паркинсон [1986].

В модели холодной Земли величина проводимости ядра очень велика. При такой электропроводности на поверхность Земли вообще не должны выходить изменения геомагнитного поля, которые реально регистрируются магнитологами. Проблема электропроводности Земли была бы свободна от противоречий, если предположить, что внешнее ядро состоит из того же плохо проводящего материала, что и мантия, электропроводность этих оболочек медленно возрастает с увеличением температуры, а генерация геомагнитного поля (как это следует из вышесказанного) происходит на границе внутреннего ядра, где σ - резко возрастает. Согласно нашей модели, в F-слое проводимость имеет (так же как в ионосфере) тензорный характер: σ_R – поперек слоя, а σ_φ – вдоль слоя. Как будет показано в следующей главе, величина σ_R обязана особенностям образующегося в F-слое эффекта поляризации и разделения электрических зарядов, а повышенная электропроводность σ_φ подвижного экмановского слоя (геострофического ветра) - обязана изменению свойств вещества при критической температуре. Известно, что при критических pT условиях вещество обладает «сверхтекучестью» и «сверхпроводимостью». Электропроводность вещества внутреннего ядра – самая высокая, она обозначена σ_G.

Литература

Акасофу С.И.. Чепмен С. Солнечно-земная физика. М.: Мир. 1974. 384 с.

Ваньян Л.Л**.** Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.

Ваньян Л.Л, Бердичевский М.Н., Пушкарев П.Ю. Астеносфера в свете магнитотеллурических данных. Вестник ОГГГГН РАН 2001. № 7 (17).

Ковтун А.А. Электропроводность Земли // Соросовский образовательный журнал. 1997 № 10. С. 111-117.

Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир. 1986. 527 с.

Рокитянскй И.И. Индукционные зондирования Земли. Киев: Наукова Думка. 1981. 296 с.

Ротанова Н.М.. Пушков А.Н. Глубинная электропроводность Земли. М.: Наука. 1982. 296 с.

Тихонов А. Н. Об определении электрических характеристик глубоких слоев земной коры, "Докл. АН СССР", 1950, т. 73, № 2

Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. Nature. 1990. V. 347. P. 272-273.

Глава 14. Модели генерации магнитного поля Земли.

В главе 14 обсуждается проблема геомагнитного поля, рассмотрены нединамо модели и модель геодинамо. Рассматривается модель генерации геомагнитного поля в контексте модели горячей Земли. Геомагнитное поле и анизотропия внутреннего ядра. Цилиндрическая и латеральная анизотропии внутреннего ядра Земли. Физические модели пространственных и временных особенностей геомагнитного поля. Модель ГМА. Модель инверсий, экскурсов и джерков. Движение магнитных полюсов. Дрейф полюсов в момент инверсии. Магнитное поле планет и спутников.

14. 1. Геомагнитное поле.

Природа магнитного поля Земли остаётся неизвестной, несмотря на многолетние и многочисленные усилия исследователей многих стран. Как известно, эта проблема считается проблемой "номер 1" в физике Земли. Более того, некоторые авторы работ по геомагнетизму утверждают, что Альберт Эйнштейн относил решение задачи генерации геомагнитного поля к одной из пяти главных проблем физики. Ясное понимание природы земного магнетизма автоматически решило бы многие вопросы, например, такие как: внутреннее устройство Земли; природа источника ее теплового потока, причины движения материков и плит, причины возникновения и исчезновения магнитного поля на Луне и спутниках Юпитера: Ио и Ганимеде; синхронизм явлений в геомагнетизме и тектонике (например, суперхроны и суперплюмы) и т.п. Геомагнитное поле (см. рис. 14-1) нельзя рассматривать вне контекста общей модели Земли и планет, так как вряд ли природа геомагнетизма отличается от физики магнетизма других планет и спутников Солнечной системы. Принято считать, что геомагнитное поле взаимосвязано с тепловым потоком, геодинамикой. Очевидно, что модель магнитного поля Земли (МПЗ) должна включать связь с этими явлениями. Модель МПЗ должна объяснять весь широкий спектр явлений геомагнетизма: инверсии, экскурсы, джерки, дрейф магнитных полюсов и фокусов векового хода и т.п.

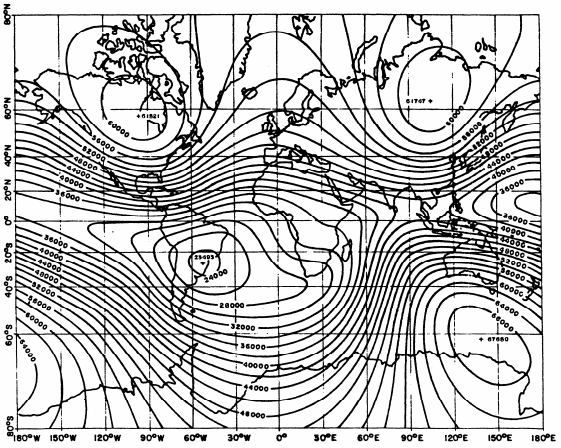


Рис. 14-1. Модуль интенсивности (в нТл) геомагнитного поля (Паркинсон, 1986).

Рис. 14-1 дает общее представление о морфологии геомагнитного поля. Можно видеть, что поле имеет довольно сложный характер, - это не просто дипольное поле. Кроме северного и южного магнитных полюсов хорошо различимы четыре аномальных участка – два в северном и два в южном полушариях. Очевидно, что модель генерации геомагнитного поля должна находить объяснение этим особенностям. Очевидно так же, что это только самый поверхностный взгляд на проблему, как будет показано ниже, магнитному полю Земли присущи не только пространственные аномалии, но и особенности его поведения во времени в течение всего периода эволюции Земли.

Большая часть моделей генерации МПЗ связана с идеей магнитного динамо. В основе такой модели лежит гипотеза железного ядра, разогрева его вещества до расплавленного маловязкого состояния за счет тепла, выделяемого при распаде радиоактивных элементов, конвекции вещества во внешнем ядре, захвата конвективным потоком вмороженного в него неземного магнитного поля и его усиление. Эта модель считается общепринятой, однако она не находит ответов на многие вопросы из области физики Земли и геомагнетизма. Кратко перечислим некоторые из них. Во-первых, это инверсии поля. Кроме механизмов двухдискового динамо Рикитаки (1968) и динамо Паркера, в котором присутствуют меридиональные токовые кольца, здесь нет ни одной заслуживающей внимания идеи. Идеи Рикитаки и Паркера не находят геофизического наполнения и "не вписываются" в современные модели динамо. Инверсии, как известно, повторяются совершенно случайным образом, что так же не находит объяснения в динамо, в котором основной смысл состоит в строгой периодичности процессов (хотя существуют и другие идеи, т.н. турбулентного, “хаотического” динамо). Во-вторых, магнитное поле планет-гигантов и, особенно, наличие палеополя у Луны и Марса, а так же у некоторых других спутников, категорически не находит объяснения в рамках динамо в железном ядре. В третьих, дрейф магнитных полюсов как в прошлом, так и современный, не находит ясного толкования в модели динамо. В-четвертых, наличие глобальных аномалий отрицается в современной модели динамо. Не находит эта модель объяснений возникновению джерков, фокусов векового хода и т.п. Этот список можно продолжить. Все это позволяет (возможно, даже требует) искать другие, альтернативные пути. Один из таких путей состоит в создании принципиально новой модели "горячей" Земли и разработке на ее основе модели генерации МПЗ.

Нединамо модели. Надо сказать, что идеи нединамо генерации магнитного поля Земли возникли задолго до появления динамо-механизма (Глава 12). Идея генерации поля за счет возникновения тока Холла, как альтернатива магнитному динамо, развивалась Вестином (Vestine, 1954). Известны и другие идеи, в частности, использование эффекта Нернста предлагалось Ганном, возбуждение электрических токов под воздействием давлений - Инглисом (Inglis, 1955) и т.п. Все подобные модели базировались, в той или иной степени, на некотором, не всегда ясном, механизме образования и разделения электрических зарядов. Суточное вращение их обеспечило бы некое начальное поле, которое может быть усилено за счет “работы” гальваномагнитного эффекта, например, эффекта Холла.

По-видимому, одним из первых, кто высказал эту идею еще в начале прошлого века, был австралийский физик В. Сазерленд. Признания его идея не получила, т.к. им не было разработано сколько-нибудь убедительной гипотезы разделения зарядов, а так же потому, что некоторым ученым казалось, что идея Сазерленда противоречит принципу относительности, “ ... ибо наблюдатель на поверхности Земли, вращаясь вместе с зарядами, остается неподвижным относительно них” (Яновский, 1953, с. 139). Это утверждение ошибочно, что было доказано известным экспериментом Эйхенвальда (1927), который обнаружил эффект возникновения магнитного поля при вращении диэлектрического диска с индуцированными на нём электрическими зарядами. Величина магнитного поля в этих экспериментах оказалась пропорциональной скорости вращения диска, его радиусу и концентрации индуцированных зарядов. Эксперимент Эйхенвальда служит прямым доказательством генерации магнитного поля при вращении электрических зарядов, которое, в свою очередь, эквивалентно прохождению электрического тока.

В подтверждение гипотезы Сазерленда, русский физик П.Н.Лебедев ещё в 1911 г. безуспешно пытался обнаружить намагниченность быстро вращающихся тел. Аналогичные опыты проводились чуть позже, в 1928 г. в Америке – Сванном и

Лангакром, и тоже безуспешно. Отрицательные результаты этих экспериментов во многом определили скептическое отношение к гипотезе Сазерленда. Оно, по всей видимости, так и не было поколеблено результатом А.А. Эйхенвальда. Эксперимент Лебедева был недавно успешно повторен в Дубне Б.В. Васильевым, который, используя современную экспериментальную технику, – сверхпроводящие экраны и очень чувствительные измерители магнитного поля (сквиды), обнаружил термо-гиромагнитный эффект, т.е. генерацию магнитного поля во вращающемся металлическом цилиндре, в котором искусственно создавался температурный градиент вдоль радиуса.

Теоретические исследования, связанные с проблемой генерации магнитного поля за счет вращения электрических зарядов, были выполнены Е.В.Григорьевой. Она пришла к выводу, что покоящийся относительно Земли наблюдатель должен фиксировать магнитное поле, создаваемое стационарно распределенными во вращающейся Земле электрическими зарядами.

14. 2. Обсуждение модели геодинамо.

Выясним такой вопрос. Имеются ли какие либо данные о пространственной структуре внешнего ядра и, если имеются, то можно ли использовать их для подтверждения или опровержения реальности процессов переноса вещества в ядре, постулированных в той или иной модели? Как следует из модели Глацмайера и Ричардса (глава 12), в ядре происходят хаотические турбулентные мелкомасштабные переносы вещества, выталкивающие магнитные силовые линии. В такой ситуации в ядре не должно наблюдаться крупномасштабных и периодических структур. В более ранних работах, предшествующих обсужденным нами выше, наиболее популярной моделью была т.н. αΩ-модель (рис 14-2-2). Согласно этой модели, во внешнем ядре должна наблюдаться плотностная неоднородность, параллельная оси вращения планеты и т.п.

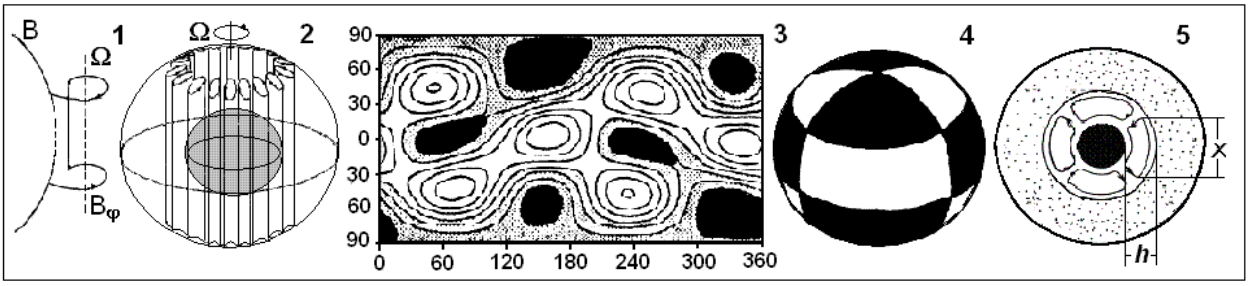


Рис. 14-2. Схемы конвекции во внешнем ядре Земли: 1. - Закручивание магнитной силовой линии (B) при дифференциальном вращении вещества внешнего ядра (Ω - эффект). 2. - Схема действия α - эффекта: генерация меридионального поля с помощью петель, образованных тороидальными силовыми линиями. 3. - Распределение плотности вещества во внешнем ядре, полученное по анализу спектра собственных колебаний ядра. 4. - Трехмерная реализация распределения плотности вещества внешнего ядра. 5. - Схема конвекции: черный круг – внутреннее ядро, кольцо с точками – мантия.

Теперь о структуре внешнего ядра. Наиболее представительные данные о структуре ядра получены по анализу специальной функции расщепления мод собственных колебаний Земли (СКЗ) (или колебаний её ядра), т.н. splitting-функции. Собственные колебания возбуждаются в момент мощного землетрясения. Изучение анизотропии расщепления мультиплетов СКЗ и построение splitting-функции сводится, в конечном счете, к тому, чтобы, используя набор сейсмограмм и вычислив спектры, определить функцию источника колебаний. Зная параметры источника и приемника, определяются пространственные коэффициенты и, в целом, - структура ядра. На рис. 14-2-3 показана splitting-функция моды $11S_4$, присущая колебаниям, возбуждаемым во внешнем ядре

Земли. Интенсивность функции меняется от -0.2% (белый цвет) до +0.2% (черный). Соответственно меняются плотность вещества и скорости сейсмических волн. На рис. 14-2-4 и 14-2-5 показана наиболее правдоподобная интерпретация полученного результата, - в виде структуры, состоящей из 12 конвективных ячеек Рэлея-Бенара, расположенных между двумя сферами, во внешнем ядре. Полученный результат по возможной плотностной структуре внешнего ядра не соответствует ни одной из известных моделей геодинамо, но он вполне логичен, если предположить, что охлаждение внутреннего ядра происходит путем нормальной конвекции в жидком внешнем ядре.

Модель геодинамо обладает не только этим, но и другими недостатками:

- Несмотря на 60-летние поиски, на Земле так и не найден источник энергии, необходимой для генерации геомагнитного поля.
- Модель динамо не может объяснить такие «быстрые» явления как инверсии (10^4), экскурсы (10^3) и джерки (10^0), т.к. принятая в модели геодинамо величина электропроводности (как у железа) не позволяет генерировать возмущения поля длительностью менее чем 10^5 лет.
- Модель не может найти объяснения причины дрейфа магнитных полюсов.
- Принятая в модели геодинамо величина вязкости железа внешнего ядра (примерно как у воды) не соответствует величине вязкости, полученной из астрономических наблюдений и т.д.

Сложившаяся в геомагнетизме ситуация настоятельно требует создания альтернативной модели…

14. 3. Модель генерации дипольного поля горячей Земли.

Фазовый переход в F-слое.

В области фазового перехода, в F-слое, по модели горячей Земли, конкурируют два процесса: конденсация и испарение, и ее более высокая стадия - кипение. Скорость конденсации K ($с^{-1}$ $см^{-3}$) можно выразить воспользовавшись формулой [Френкель, 1975]:

$$K \approx 10^{26}\, exp(-3/ln S_П + ln\, S_П), \qquad (14.1)$$

здесь $S_П$ - пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина $S_П$ определяется температурой пара, его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной поверхностного натяжения жидкости и т.п. Скорость конденсации K показывает количество элементарных процессов слияния частиц, которое происходит в единицу времени в единичном объеме. Величина K определяет скорость образования и роста капель.

В режиме испарения (кипения) в системе преимущественно рождаются пузыри пара, скорость образования которых:

$$J\ (с^{-1}\ см^{-3}) = 10^{37}\, exp\ (-W/kT), \qquad (14.2)$$

где W - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Зависимости K и J от температуры среды T (чисто качественные) изображены на рис. 14-3. При температуре порядка T_o, скорости процессов становятся равными, это означает, что система, в принципе, может достичь термодинамического равновесия. (Однако, как будет показано ниже, она никогда достичь его не может и поэтому кривая установления температуры к линии T_o - носит исключительно гипотетический характер).

В определенный момент времени t_o - (0) система была перегрета на ΔT до температуры $T > T_o$. Очевидно, что в этом случае преимущество получают процессы испарения ($J > K$). В результате, часть вещества переходит из конденсированного состояния в - газообразное. При этом поглощается теплота фазового перехода. Она тратится на энергию, расходуемую на образование, рост и движение пузырей. Система

при этом охлаждается. В области образования "высокоплотных" пузырей возникает отрицательное давление и "свободное" пространство, которое моментально заполняется окружающим веществом. Объем Земли в этот момент уменьшается. В дальнейшем, тепло отводится из зоны фазового перехода путем конвекции в ядре и, возможно, в мантии. С течением времени температура T понижается и может возникнуть ситуация, при которой $T < T_o$. В точке $T = T_o$, происходит смена режима, преимущество получают процессы конденсации ($K > J$). При этом часть вещества конденсируется с выделением теплоты фазового перехода, что приводит к нагреву системы и повышению ее температуры. Цикл смены режимов повторяется вновь.

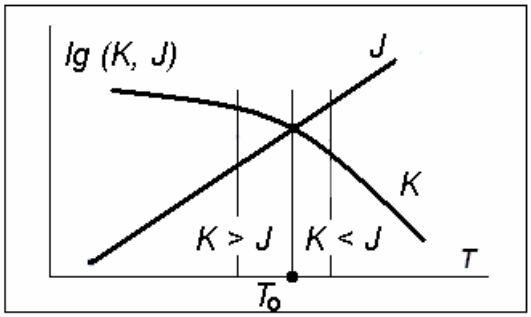


Рис. 14-3. Изменение *lg* скоростей конденсации (K) и испарения (J) в зависимости от температуры T.

Разделение электрических зарядов в F-слое.

Температура процессов происходящих в F-слое стабилизируется фазовым переходом и, по-видимому, близка к критической температуре вещества. Конденсация вещества внутреннего ядра (предположим, что это вещество - SiO_2) находится в состоянии переуплотненного и перегретого пара (суперкритическая жидкость). Процесс конденсации этого вещества происходит с увеличением объема и выделением энергии, равной теплоте фазового перехода. Это приводит к увеличению температуры T_E. На границе F-слоя и внешнего ядра (E) скапливается атомы кремния, несущие положительный заряд, вблизи поверхности G-ядра – отрицательные атомы кислорода. В F-слое возникает т.н. двойной электрический слой. Температура T_E становится выше, чем T_G. После этого происходит испарение вещества на поверхности E-ядра. Это процесс испарения, он происходит с поглощением энергии фазового перехода. При этом полярность двойного слоя меняется (рис. 14-4).

Рассмотрим процессы, происходящие в F-слое, пограничным между «твердым» внутренним ядром и «жидким» - внешним.

По уравнению Клайперона-Клаузиуса, распределение температуры как функция давления:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{V_П - V_Ж}{U} T, \qquad (14.3)$$

где $V_П$ и $V_Ж$ - удельные объемы пара и жидкости, U – теплота фазового перехода. Обычно $V_П > V_Ж$, $U > 0$ и $dT/dp > 0$, однако в том случае, когда идет процесс разуплотнения пересжатого вещества и конденсация его в вещество с обычной плотностью, должно быть: $V_П < V_Ж$, и $dT/dp < 0$ (инверсия температуры). Известно также, что в области $T \approx Tкр$, $U \rightarrow 0$, а это означает возможность сколь угодно больших величин dT/dp.

Температура вещества G-ядра $T \approx$ (1-3) 10^4 К. При такой температуре происходит частичная ионизация вещества. Оценим степень ионизации по формуле Саха для константы ионизационного равновесия k_p:

$$k_p = \frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} p \left(\frac{2\pi m}{h^2} \right)^{3/2} (kT)^{5/2} \exp \frac{e\varphi}{kT}, \qquad (14.4)$$

где p - давление «газа», равное давлению в центре Земли ($3.5 \cdot 10^6$ атм.), α - степень ионизации ($\alpha << 1$), φ - потенциал ионизации ($\varphi \approx 12$ эВ). Степень ионизации, рассчитанная по этой формуле, оказывается: для G-ядра ($kT \approx 3$ эВ), $\alpha \leq 1\%$; для F-слоя ($kT \approx 1$ эВ); $\alpha \leq 0.01\%$. Плотности электрических зарядов: $n_e \approx 10^{20}$ см$^{-3}$ (и для G-ядра) и 10^{18} см$^{-3}$ (для F-слоя).

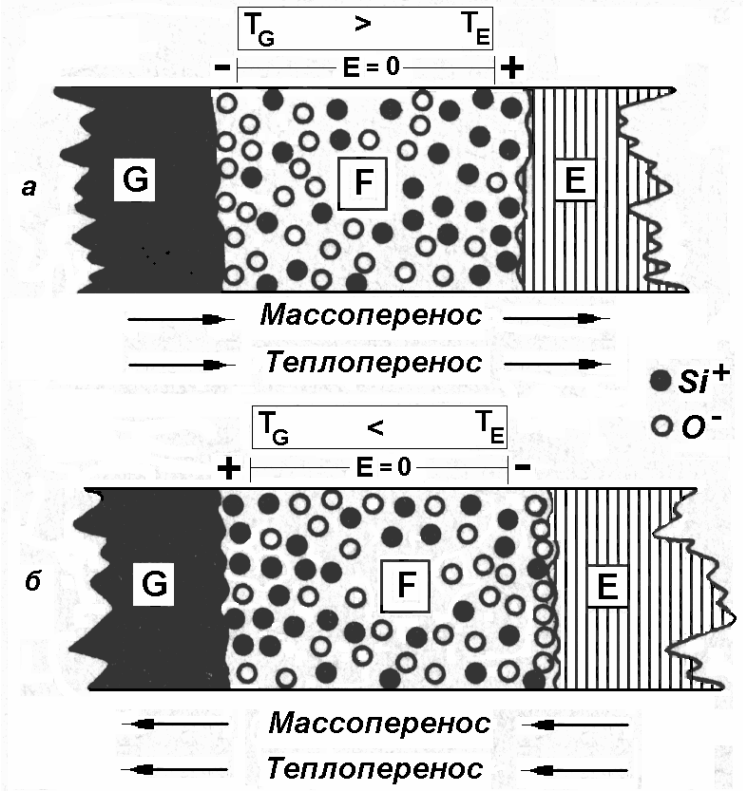


Рис. 14-4. Схема тепло- и массопереноса вещества в F-слое: *а* – цикл расширения ($K > J$), *б* – цикл сжатия ($J > K$).

В F-слое за счет температурного градиента и различной подвижности зарядов, - происходит их разделение, т.е. образование двойного электрического слоя.

Из уравнения Гиббса-Гельмгольца для изобарно-изотермического процесса, ЭДС двойного электрического слоя равна:

$$e = e_p + T\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p, \qquad (14.5)$$

где e – ЭДС, e_p – тепловой эффект, отнесенный к единице перенесенного заряда. Производная dT/dp в зависимости от условий конденсации может менять знак, его может менять и ЭДС.

Возможный механизм, приводящий к разделению зарядов, при их движении по F-слою, - термодиффузия, в процессе которой тяжелые частицы (в нашем случае положительные ионы) должны двигаться по потоку тепла, легкие (отрицательные ионы, электроны) - против потока.

Оценим эффект термодиффузионного разделения зарядов на примере O^- и Si^+. Термодиффузионная постоянная $\beta_T \approx 0.2$ (Грю, Ибс; 1956). По определению $\beta_T = k_T(n_{10} \cdot n_{20})$, где k_T - термодиффузионное отношение, $n_{10} = n_1/(n_1 + n_2)$ – относительная концентрация компонент системы. Положим (для простоты) двухкомпонентную смесь: $n_{10} = n_{20} = 0.5$, тогда $k_T = 0.05$.

Величина термодиффузионного разделения:

$$n_{10} - n'_{10} = k_T \ln\left(\frac{T'}{T}\right), \qquad (14.6)$$

где $(T - T\,')/\Delta R = \Delta T/\Delta R$ – градиент температуры. Для разделения зарядов порядка 10^{-3} необходимо чтобы температура изменилась примерно на 2 %. Положим, что на ширине F-слоя температура изменяется на 10^3 К, тогда величина $\Delta T/\Delta R \approx 10^{-4}$ К/см. Учитывая сказанное, можно оценить, что при начальной плотности зарядов $n_e \approx 10^{24}$ м$^{-3}$ возможно их разделение с плотностью $N \approx 10^{20}$ м$^{-3}$. При этом в F-слое возникает двойной электрический слой (ДЭС).

Особенности электрического поля ДЭС.

Согласно нашей модели, полярность ДЭС связана с направлением тепломассопереноса и при смене его направления, меняется и полярность ДЭС. Таким образом, в F-слое возникает (рис. 14-5) радиальное электрическое поле E_R, величина которого не может быть бесконечно большой. Например, в атмосфере, за счет разделения электрических зарядов в грозовых облаках образуется поле $E \sim 10^4 - 10^5$ В/м.

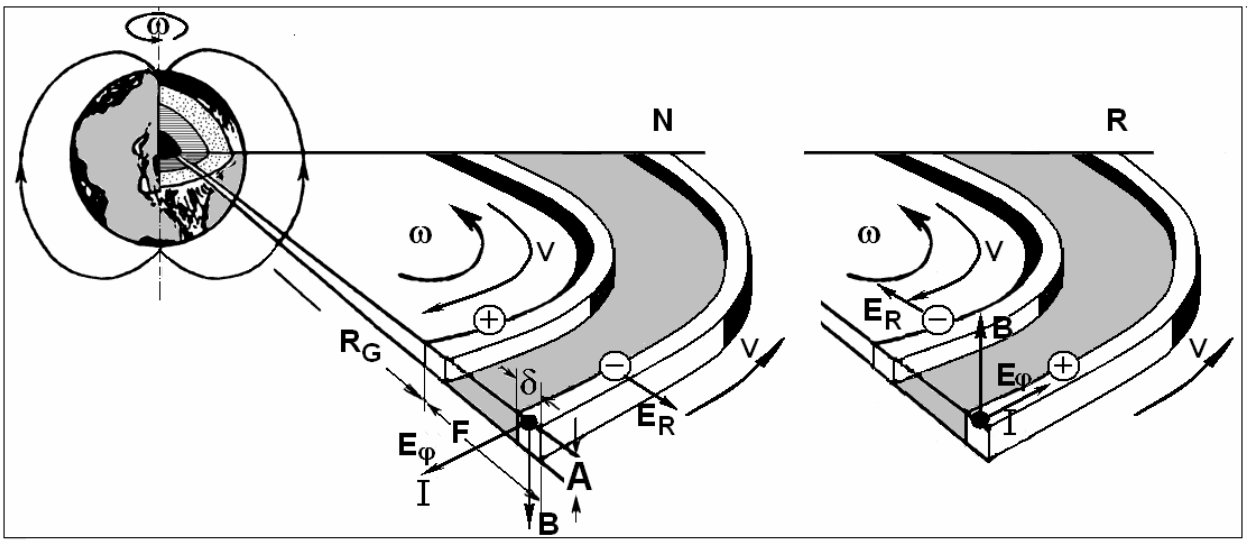


Рис. 14-5. Токовые системы в F-слое в случае прямой (N) и обратной (R) полярности МПЗ. Обозначения в тексте статьи.

Оценим напряженность электрического поля E_R в F-слое: $E_R = q/(C\times\Delta R)$, здесь $q = NeV$ – электрический заряд слоя, ΔR – толщина F-слоя, N – концентрация зарядов, e – заряд электрона, V^* – объем сферического "конденсатора": $V^* = 4\pi R^2_G \Delta R$, где R_G – радиус внутреннего ядра, тогда C – электрическая емкость ДЭС: $C = 4\pi\varepsilon_o R^2_G/\Delta R$, ε_o – электрическая постоянная. Получаем:

$$E_R = \Delta R Ne/\varepsilon_o. \qquad (14.7)$$

Подставляя известные величины, получаем: $E_R = 10^{-3}\ N$. Примем: $E_R \le 10^8$ В/м, что позволяет оценить величину $N \le 10^{11}$ м$^{-3}$ ($N = 10^3\ E_R$), что значительно ниже, чем полученная нами выше оценка ($N \approx 10^{20}$ м$^{-3}$). Это означает, что указанный нами механизм разделения способен справиться с «поставленной задачей».

В чем же заключаются особенности ДЭС? ДЭС представляет собой совокупность двух близких друг другу поверхностей S и S', заряженных электричеством противоположного знака, притом так, что плотности зарядов n и n' – на противолежащих элементах обеих поверхностей равны по величине и противоположны по знаку (Тамм, 1966). Расстояние между плоскостями мало по сравнению с расстоянием этих поверхностей до рассматриваемых точек поля. Потенциал двойного слоя в некоторой точке P равен (Тамм, 1966):

$$\varphi = -\int_S \tau k \, grad\left(\frac{1}{R}\right) dS. \qquad (14.8)$$

Здесь: $\tau = nl$, где l – толщина слоя (расстояние между S и S'), k – направление нормали к двойному слою, R - расстояние от S до точки Р. Величина τ - мощность (момент) ДЭС.

Потенциал ДЭС испытывает на его поверхности скачек $4\pi\tau$, который направлен от отрицательной стороны слоя к положительной. ДЭС является поверхностью разрыва сплошности потенциала: $\varphi_2 - \varphi_1 = 4\pi\tau$. Напряженность электрического поля на поверхностях разрыва потенциала обращается в бесконечность, т.е. теряет физический смысл. Заряд и мощность ДЭС будут расти до тех пор, пока скачек потенциала $\varphi_2 - \varphi_1$ станет равным приложенной извне разности потенциалов. Ток через ДЭС прекратится ($j = 0$), и напряженность поля $E \rightarrow 0$ (рис. 14-4), т.е. будет достигнуто электростатическое равновесие. Таким образом, образование ДЭС обеспечивает поляризацию электродов. В нашем случае, - поляризацию границ F-слоя. Электрические заряды, как следует из модели ДЭС, располагаются вблизи границ F –слоя, занимая толщину δ и высоту слоя А (рис. 14-5). *Электропроводность F –слоя вдоль радиуса оказывается очень малой* (как у диэлектрика): $\sigma_R \sim j_R / E_R$ (рис. 13-13).

Суточное вращение F-слоя и возникновение начального геомагнитного поля.

Магнитное поле вращающегося двойного слоя можно представить как поле тока I, «текущего» по внешней поверхности F-слоя (на радиусе R_F): $B \approx \mu I_F / R_F$. «Ток» равен соответствующей плотности тока j, умноженной на величину сечения S. Плотность тока $j = Ne\omega 2\pi R_F = 100 \cdot 10^{-19} N$. Для $N \approx 10^{11}$ м$^{-3}$, $j = 10^{-6}$ А/м^2. Поверхность переноса вращающегося заряда S мы оценивали ранее (Кузнецов. 2008): $S \approx \delta A = 10^9$м^2. Тогда ток $I_o = 10^3$ А. Магнитное поле вращающихся зарядов:

$$B_o = \mu I_o / R_G = 4\pi 10^{-7} \cdot 10^3 / 10^6 = 10^{-9} \text{Тл}. \qquad (14.9)$$

Учитывая тот факт, что заряды разного знака вращаются в одном направлении на разных радиусах R_F и , R_G, разностное поле будет равно $B_o = \mu I_o \Delta R / R^2_G = 10^{-10}$ Тл ($\Delta R = R_F - R_G$). Толщина токового слоя, если это экмановский слой, то $\delta \sim (\eta/\Omega)^{1/2}$. Вязкость вещества слоя η строго оценить не представляется возможным (Ω – параметр силы Кориолиса). Величина вязкости, оцененная нами ранее, определяет толщину слоя в 1-10 км. В любом случае, для получения необходимой величины поля $B \approx 310^{-3}$ Тл, поле B_o необходимо усилить в $k_B = B/B_o \sim 10^7$ раз.

Следует заметить, что вязкость вещества, находящегося при критической температуре $T_{кр}$ уменьшается на порядки. В обсуждаемой нами модели предполагалось, что температура вещества F-слоя близка к $T_{кр}$, поэтому оценки вязкости, полученные по супервращению внутреннего ядра, требуют корректировки, в сторону её уменьшения.

Токовые системы в слое толщиной А между внутренним G- ядром и внешним Е-ядром изображены на рис. 14-5 и 14-6. Гидродинамический перенос среды F- слоя состоит в том, что в пристеночных слоях, прижатых каждый к своей стенке, потоки текут в противоположных направлениях со скоростью V. Между этими слоями «дует» «геострофический тепловой ветер», аналогичный ветру в атмосфере. Согласно нашей модели, при смене полярности геомагнитного поля изменяется знак носителя заряда в δ-слоях, что приводит к смене направления токов и, соответственно, направлению вектора поля B. Необходимо выяснить, могут ли эти потоки, быть основой токов, формирующих геомагнитное поле. Этот вопрос будет рассмотрен чуть ниже.

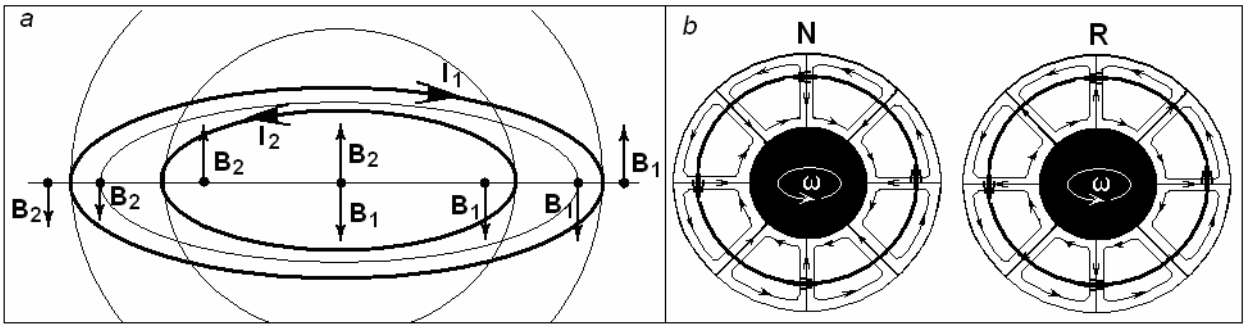


Рис. 14-6-a: Токи (I) и магнитные поля (B) двух коаксиальных контуров в F-слое, тонкая линия показывает положение геострофического ветра. Рис. 14-6-b: Структура токовых ячеек в моменты прямой и обратной полярности поля и изменения направления массопереноса. Толстая линия показывает положение геострофического ветра

Характерное время изменения модуля поля.

Воспользуемся фундаментальным уравнением магнитной гидродинамики:

$$\partial B/\partial t = \mathrm{rot}(\mathbf{u}\times\mathbf{B}) + \eta\nabla^2\mathbf{B} = VB/L + \nu B/L^2, \qquad (14.10)$$

где $\nu = (\mu\sigma)^{-1}$ – магнитная вязкость, аналог кинематической вязкости ν. Число Рейнольдса, определяющее границу между ламинарностью и турбулентностью потока, равно:

$$Re = LV/\eta,$$

где L и V - характерные длина и скорость потока. По аналогии, магнитное число Рейнольдса Rem можно записать в виде:

$$Rem = LV/\nu$$

Величину $\partial B/\partial t$ можно оценить по скорости уменьшения модуля геомагнитного поля в наше время: $\partial B/\partial t \approx 10$ нТл/год, а также по поведению поля в момент инверсий и экскурсов, когда поле уменьшается практически до нуля и восстановиться до прежнего уровня за время порядка 100 - 1000 лет $\partial B/\partial t \approx 60$ - 600 нТл/год. Зная этот параметр и полагая, что характерная длина $L = 2\pi R_F = 6$ тыс. км, можно оценить скорость потока V, величины ν и Rem. Т.к. $VB/L >> \nu B/L^2$, скорость гидродинамического переноса:

$$V = \partial B/\partial t\,(L/B), \qquad (14.11)$$

тогда:

- в спокойный период: $V \approx 10^{-4}$ м/с. Магнитное число Рейнольдса, полагая, что электропроводность вещества F-слоя $\sigma = 10^4 – 10^5$, $\nu \approx 10 – 100$ м^{2}с$^{-1}$, $Rem \approx 100$.
- в период инверсии: $V \approx 10^{-2}$ м/с, а $Rem \approx 10^3$. Для сравнения, число Рейнольдса $Re = LV/\eta = 600$ $V \approx 6$. Оценки показывают, что характер течения и в том, и в другом случаях – ламинарный.

Реальные величины поля в области F-слоя и, вероятно, скорость его изменения $\partial B/\partial t$ примерно в 100 раз больше, но это не сказывается на величине $V \sim \partial B/B$.

Скорость потока в нашей модели: в режиме генерации – усиления поля: $V \approx 10^{-2}$ м/с, а в режиме поддержания поля в стабильном состоянии: $V \approx 10^{-4}$ м/с. Отметим, что т.н. *западный дрейф и супервращение внутреннего ядра - это гидродинамические течения, направленные в противоположные стороны.* Оба этих потока, как было показано, имеют примерно равные скорости порядка 0.3° в год, что соответствует скорости переноса $Vg \approx 2\cdot10^{-4}$ м/с (рис. 14-5).

Время одного оборота такого перетока вокруг оси Земли на радиусе внутреннего ядра составляет $t = 2\pi R_G/Vg \approx 1000$ лет, что исключает возможность генерации поля на токовых системах среды, двигающейся с такой скоростью. Оценка величины тока: $I = n_e eVS = 10^{11}\cdot1.610^{-19}\cdot210^{-4}\cdot10^9 \approx 3\cdot10^{-3}$ А показывает, что он на 13 порядков меньше требуемой величины.

Усиление начального поля за счет динамо-эффектов.

Согласно нашей модели, явления, происходящие в F-слое, имеют некоторую аналогию с явлениями в атмосфере Земли [Кузнецов, 2008]. Как в атмосфере, так и в F-слое происходят: разделение зарядов и возникновение вертикального атмосферного электрического поля, аналогичного полю E_R в F-слое. В формировании магнитного поля за счет холловского динамо-эффекта принимают участие явления: распределение скорости звука в атмосфере по высоте и в F-слое по его толщине, процессы испарения и конденсации, наличие начального дипольного магнитного поля и т.п. Поэтому, имеет смысл в начале рассмотреть общие представления, положенные в основу формирования экваториальной токовой струи в верхних слоях атмосферы, т.е. рассмотреть модель ионосферного динамо [Ришбет, Гарриот, 1975].

Холловское динамо в атмосфере.

Движение атмосферы в направлениях, перпендикулярных силовым линиям магнитного поля, индуцирует электродвижущую силу, которая на высотах, где электропроводность достаточно велика, вызывает электрический ток. В ионосфере эти процессы происходят на высоте примерно 100 км. Для любой частицы среды, на которую действует электрическое и магнитное поле, можно записать уравнение:

$$m\, d\boldsymbol{V}/dt = \varepsilon \boldsymbol{E} + \varepsilon\, \boldsymbol{V} \times \boldsymbol{B} - m\nu\, (\boldsymbol{V} - \boldsymbol{U}). \qquad (14\text{-}12)$$

Здесь $\boldsymbol{V}$ –скорость заряженной частицы, $\boldsymbol{U}$ **–** скорость нейтральной атмосферы. Приравняв $m\nu\ (\boldsymbol{V} - \boldsymbol{U})$ силе Лоренца $\varepsilon\, \boldsymbol{V} \times \boldsymbol{B}$**,** можно определить скорость $\boldsymbol{V}$. Вектор $\boldsymbol{U}$, направленный поперек линий магнитного поля, индуцирует поле $\boldsymbol{U} \times \boldsymbol{B}$**.** Это наведенное поле вызывает электрический ток $\sigma \cdot \boldsymbol{U} \times \boldsymbol{B}$, где σ - тензор проводимости:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & -\sigma_2 & 0 \\ \sigma_2 & \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix}$$

Обозначим компоненты проводимости ионосферы: продольная (прямая) - σ_o; поперечная (Педерсена) - σ_1; Холла - σ_2; Каулинга - $\sigma_3 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)/\sigma_1$.

Ток, возникающий за счет ветра, может не удовлетворять условию: div j = 0. В любой точке, где div j ≠ 0, происходит накопление электрических зарядов, и ионосфера становится электрически поляризованной. Поляризационное электростатическое поле - $\nabla\Phi$ (Φ – электрический потенциал) возрастает до тех пор, *пока токи не станут горизонтальными и не дивергентными*. Соответствующая этим условиям проводимость слоя σ’ определяется уравнением:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} \\ -\sigma_{XY} & \sigma_{YY} \end{bmatrix}$$

Наведённое и поляризационное поля складываются и образуют общее электрическое поле $\boldsymbol{E}_t$. Ток определяется следующим образом:

$$\boldsymbol{j} = \sigma' \cdot \boldsymbol{E}_t = \sigma' \cdot (\boldsymbol{U} \times \boldsymbol{B} - \nabla\Phi). \qquad (14\text{-}13)$$

Этот ток течет в области экватора, в восточном направлении, образуя т.н. экваториальную токовую струю. В твердой, проводящей оболочке Земли наводится токовая струя противоположного направления. «Если бы Земля была идеальным проводником, а усложнениями из-за горизонтальных вариаций поля и кривизны Земли можно было бы пренебречь, то токи в ионосфере и на поверхности Земли были бы равны по величине и противоположны по знаку» [Ришбет, Гарриот, 1975] (стр. 229). Природа этой струи имеет индукционный характер и обязана выполнению известного в физике правила Ленца.

Динамо F-слоя.

Ионосферное динамо возбуждается в проводящем слое за счет ветрового переноса проводящей среды поперек магнитного поля Земли и из-за тензорного характера проводимости. В нашей модели магнитное поле, - это, в начале процесса генерации, - начальное магнитное поле Земли B_o, а затем в этом процессе, в режиме усиления, принимает участие собственно - само поле. Очевидно наличие в схеме динамо-генерации геомагнитного поля - радиального электрического поля двойного электрического слоя E_R. Смена его полярности приводит к инверсии поля. Это означает, что в пограничных δ-слоях меняется на противоположное направление тока. Принципиальным моментом в нашей модели является особенность ДЭС, в котором, в принципе, электрическое поле E_R может достигать огромных величин, т.к. проводимость слоя – ничтожно мала. Эти свойства ДЭС обеспечивают требуемый по модели холловского динамо – тензорный характер проводимости.

В нашей модели общее электрическое поле E также как в (13) складывается из двух компонент поля – наведенного и поляризационного:

$$E = \sigma j - E\varphi = (\boldsymbol{V}\times\boldsymbol{B}) - 1/N_e e\,(\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B}) \qquad (14\text{-}14)$$

Как мы показали выше, в ядре Земли, возможно, существует гидродинамический перенос, но скорость его V очень мала, что в случае генерации геомагнитного поля определяет преимущество поляризационного компонента. Иначе, определяет преимущество Холловского динамо над – гидродинамическим.

Рассмотрим подробнее электрические параметры модели. Исходные данные:

- Поле B на поверхности Земли ≈ 30 000 нТл, что примерно соответствует полю на радиусе внутреннего ядра $B \approx 10^{-3}$ Тл.
- Поле создается разностью токов, текущих в противоположных направлениях $B = B_G - B_F = \mu I\,\Delta R/R^2$, где $\Delta R = R_F - R_G$, а $R \approx R_F \approx R_G$.
- Величина тока $I = 10^{10}$ А. Мощность геомагнитного поля $P = 10^{12}$ Вт, отсюда напряжение $U = 100$ В. Величина $E\varphi = 100/6\cdot10^6 \approx 10^{-5}$ В/м.

Как известно, мощность геомагнитного поля немного различается у разных авторов. Так, например, по оценке Брагинского - 10^{12} Вт, по оценке Булларда – $2\cdot10^9$ Вт, Малкуса – $2.3\cdot10^{10}$ Вт. Рочестер полагает, что нижняя граница равна 10^9 Вт, а верхний предел $4\cdot10^{13}$ Вт [Паркинсон, 1986, с. 166]. Т.о. принятая нами величина P не выбивается из пределов представлений «классиков» геомагнетизма.

Для сравнения, тепловая мощность Земли, оцененная по величине теплового потока, равна $4\cdot10^{13}$ Вт. Таким образом, на генерацию магнитного поля Земли приходится ≈ 1/40 от полной энергии. Энергия Земли – это тепловая энергия вещества внутреннего ядра. Она «расходуется» на формирование теплового потока, генерацию геомагнитного поля и геодинамику путем реализации фазового перехода первого рода, происходящего в F-слое.

- Сопротивление δ-слоя $R = U/I = 10^{-8}$ Ом. По нашей модели $\sigma \approx 10^4$ (Ом м)$^{-1}$, удельное сопротивление $\rho = 10^{-4}$ (Ом м). Плотность тока $j = \sigma E\varphi = 0.1$ А/м^2.
- Сечение тока $S = I\varphi/j = 10^{11}$ м^2 , следовательно, сопротивление проводящего этот ток δ-слоя $R \approx \rho\, 2\pi R/S = 10^{-8}$ Ом.
- Согласно модели Холловского динамо, $E\varphi = (\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B})/N_e e$, отсюда оценим плотность зарядов $N_e = (\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B})\,/E\varphi\cdot e = 10^{20}$1/м^3. По смыслу величина $1/N_e e$ – холловская постоянная. Она может быть положительной (по знаку заряда), или отрицательной.
- Ранее мы полагали величину N_e из соображений ограничения величины радиального поля E_R, меньше чем 10^8 В/м.
- В δ-слое происходит накопление зарядов разных знаков в каждом из слоёв, причем они по мере поступления в этот слой, участвуют в генерации поля $E\varphi$ и тока $I\varphi$, не вызывая

при этом увеличения радиального поля E_R. Этот эффект обязан недивергентности тока j_R, т.к. в *любой точке, где div j ≠ 0, происходит накопление электрических зарядов.*
- Ранее, для тока j_R мы принимали N_e' = 10^{11}1/м^3, теперь нам необходимо создать плотность зарядов в δ-слое порядка N_e =10^{20}1/м^3. Это можно реализовать при переносе зарядов током j_R , которые затем участвуют в формировании текущего по δ-слою тока $I\varphi$, который, собственно, и является источником формирования геомагнитного поля диполя.

Оценим величину заряда в δ-слое (F-) высотой - A (рис. 14-5 и 14-7). Объем этого слоя: $A\cdot\delta\cdot 2\pi R$, умножая его на концентрацию зарядов N и элементарный заряд e, получаем, что заряд слоя равен примерно: $Q = 10^{17}$ Кулон. Если бы этот заряд не сносился током $I\varphi$, то радиальное поле достигло бы огромной, нереальной величины: $E_R = Q/\varepsilon_o R^2 = 10^{16}$ В/м. Здравому смыслу это особенно не противоречит, т.к. электрическое поле ДЭС $E \rightarrow \infty$. Зная величину Q можно оценить время, необходимое для того, чтобы «зарядить» δ-слой до необходимой величины током j_R. Величину j_R запишем как: $j_R = \sigma_R \cdot E_R$, где проводимость σ_R – очень маленькая величина (см. рис. 13-13), $\sigma_R \sim 10^{-14}$ (Ом·м)$^{-1}$. Так как мы приняли величину E_R не более 10^8 В/м, то величина тока I_R оказывается равной: $I_R = j_R \cdot S = 10^7$А. Тогда, время t, необходимое для «зарядки» δ-слоя окажется: $t \approx 10^3$ лет. Точность наших оценок не велика, но не более одного - двух порядков. Эта оценка удовлетворительно близка к наблюдаемым временам перестройки геомагнитного поля во время экскурсов и инверсий.

Представленная здесь модель не имеет принципиальных различий с моделью генерации геомагнитного поля за счет реализации эффекта Холла (Кузнецов, 2008). В прежней модели автор встречал возражение, состоящее в том, что эффект Холла не может появляться в нагретом до высокой температуры ядре Земли. Возможно, это именно так, однако точно такие же явления могут иметь место в холловском динамо, о котором шла речь выше.

Геомагнитное поле и анизотропия внутреннего ядра.

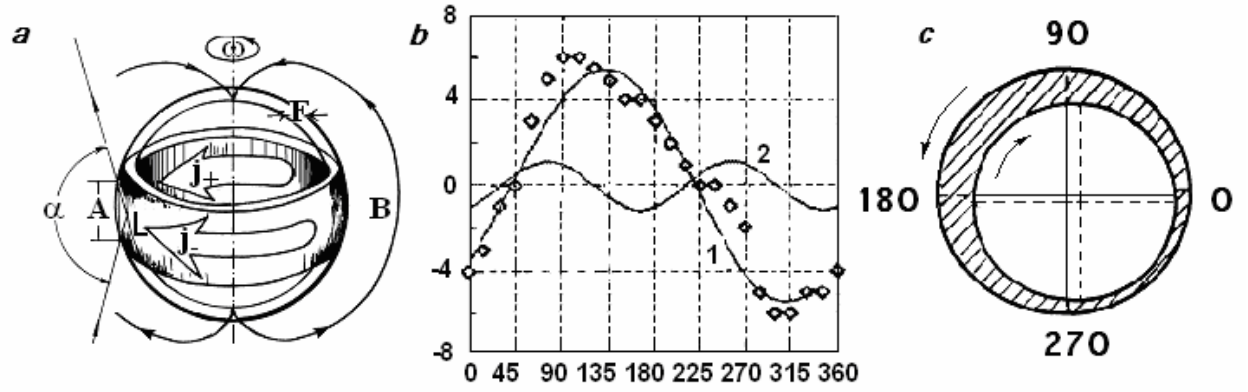


Рис. 14-7. Анизотропия внутреннего ядра. Схема токовых колец. Обозначения в тексте - *a*. Связь анизотропии внутреннего ядра и морфологии геомагнитного поля. Точки – переменная часть H компоненты в плоскости экватора. Разложение по sin-функциям: 1 – первая и 2 – вторая гармоники- *b*. Сечение F-слоя – *c*.

Рассмотрим модель, связывающую цилиндрическую и латеральную анизотропию внутреннего ядра с нашей схемой генерации геомагнитного поля. Явление анизотропии свойств внутреннего ядра заключается в том, что сейсмические волны, проходящие через него параллельно оси вращения Земли, распространяются быстрее, чем те же волны, которые проходят через внутреннее ядро в плоскости экватора. Время распространения (travel time) вдоль оси вращения Земли («pole to pole»), оказывается примерно на 1 % (до 6

секунд) меньше, чем travel time волн, проходящих в других направлениях относительно оси вращения. Это явление подтверждается данными по расщеплению (splitting) спектров собственных колебаний Земли. Кроме различий в скоростных свойствах ядра вдоль оси вращения Земли и поперек нее, обнаружена пространственная (латеральная) анизотропия свойств внутреннего ядра, как по данным splitting-функций, так и по данным travel-time. Суть латеральной анизотропии состоит в том, что скорости Р-волн, регистрируемые в некоторых областях поверхности внутреннего ядра, оказываются на 0.2-0.4 % ниже, чем на полюсах и материках. Эти области проецируются на поверхность Земли в районы Тихого и Атлантического океанов.

Цилиндрическая анизотропия. Как следует из нашей модели, в F-слое возникает токовая структура в виде дифференциального токового кольца (цилиндра), расположенного в плоскости экватора. Токи величиной порядка 10^{10} А текут по двум "проводникам" (высотой А и толщиной δ, каждый) в противоположных направлениях (рис. 14-7-а). Первый "проводник" находится вблизи границы с внутренним ядром, второй - на границе с внешним. Как известно, цилиндрическая анизотропия обнаружена на границе внутреннего ядра. Скорость Р-волн распространяющихся внутри цилиндра немного превышает скорость волн вне цилиндра. Рассмотрим, может ли наличие области генерации геомагнитного поля в виде цилиндрической структуры привести к увеличению скорости Р-волн.

Выясним, может ли цилиндрическая токовая диссипативная структура привести к локальному нагреву вещества требуемой величины. Как известно (Кузнецов, 1998-а), тепловой поток Земли Q составляет примерно 3×10^{13} Вт, а мощность магнитного поля $P = 10^{12}$ Вт ($Q/P \approx 30$). Предположим, что температуре T на границе внутреннего ядра соответствует тепловой поток Q: $T \sim Q$, а диссипация токовой системы вызывает дополнительный нагрев: $\Delta T \sim \zeta P$, где ζ коэффициент, показывающий ту часть мощности, которая пошла на дополнительный нагрев (ΔT) части поверхности внутреннего ядра ($\zeta < 1$). Из наших рассуждений следует: $\Delta T/T = 0.02 - 0.03$; $T \sim Q/4\pi R^2$; $\Delta T \sim \zeta P/2\pi RA$. Здесь R - радиус внутреннего ядра. Подставим полученное:

$$\Delta T/T = (2\zeta P/Q)\times R/A. \qquad (14.15)$$

Полагая коэффициент ζ равным 5 %, можно оценить отношение радиуса внутреннего ядра R к высоте цилиндра A: $R/A \approx 10$. Откуда следует, что высота "цилиндра" A равна примерно 100 км. Оценки показывают, что дополнительный нагрев вещества слоя высотой A может приводить в необходимому увеличению скорости распространения Р-волн.

Оценим, можно ли получить увеличение скорости распространения Р-волн в поверхностном слое ядра за счет дополнительного давления Δp, вызванного влиянием магнитного поля на проводящую среду:

$$\Delta p = \mu_o H^2/8\pi,$$

где μ_o - магнитная постоянная, H - напряженность магнитного поля (А/м): $H = I/\delta$, I - ток, δ - толщина слоя, в котором магнитное поле может вызвать дополнительное давление Δp. Для того, чтобы скорость Р-волн увеличилась на 1 %, дополнительное давление должно быть порядка 10^9 Н/м^2. В этом случае толщина слоя δ ($\delta = [8\pi\Delta p/\mu_o I^2]^{1/2}$) оказывается порядка сотни метров, что значительно меньше, чем толщина δ "проводника" (рис. 14-5) по нашей модели. Заметим, что минимальная толщина слоя, в котором наблюдается анизотропия внутреннего ядра (Адушкин и др. 1997), составляет единицы км. Может ли быть этот слой толщиной всего сотню метров? Достоверна ли наша оценка возможности влияния давления, вызванного геомагнитным полем, как причина цилиндрической анизотропии? По-видимому, нет возможности сегодня ответить на эти вопросы однозначно. Можно лишь добавить, что в рамках нашей модели, схема генерации

геомагнитного поля, представляющая собой дифференциальное токовое двойное кольцо (двойной цилиндр), расположенное на границе внутреннего ядра в плоскости экватора, это единственная, возможная причина возникновения цилиндрической анизотропии внутреннего ядра.

Результаты, полученные с помощью метода travel time, можно использовать для оценки величины *A*. Для этого представим такую схему. В области экватора сейсмический луч распространяется вдоль по «стенке» цилиндра *A* (рис. 14-7-a). Если бы цилиндрической анизотропии не было, то тот же луч распространялся вдоль по линии *L*, представляющей собой угол 150°. Можно составить прямоугольный треугольник, одной из сторон которого является *A*/2, а гипотенузой – *L*/2. Угол у основания треугольника α = 150/2 = 75°. Будем считать, что P-волна проходит расстояние *A*/2 , быстрее чем *L*/2, на одну секунду. Положим, что скорость этой волны порядка 10 км/с, или, иначе, *L*/2- *A*/2 = 10 км, а $A/L = \sin\alpha$. Отсюда высота цилиндра $A \approx 500$ км.

Латеральная анизотропия. Выше мы отмечали, что методами travel time и splitting-функций обнаружена латеральная анизотропия внутреннего ядра. Она меньше цилиндрической, но, тем не менее, представляет несомненный интерес в плане понимания внутреннего устройства Земли и взаимосвязи её оболочек. Как было сказано, области внутреннего ядра, проецируемые на Тихий и Атлантический океаны - “медленные”. Области ядра, на которые проектируются материки, - более “быстрые”, скорости распространения P-волн в этих регионах выше, чем в “медленных”. Если обратиться к рис. 14-8 , можно видеть, что в непосредственной близости от границы внутреннего ядра повышение скорости волн соответствует уменьшению радиуса ядра, т.к. v_p возрастает к центру Земли: $v_p \sim 1/R$. Аналогичная ситуация наблюдается и на границе ядро-мантия. Оказывает ли влияние магнитное поле на латеральную анизотропию внутреннего ядра, или возможно ли их взаимное влияние? Чтобы ответить на эти вопросы, построим развертку амплитуды H-компоненты геомагнитного поля по долготе в плоскости экватора.

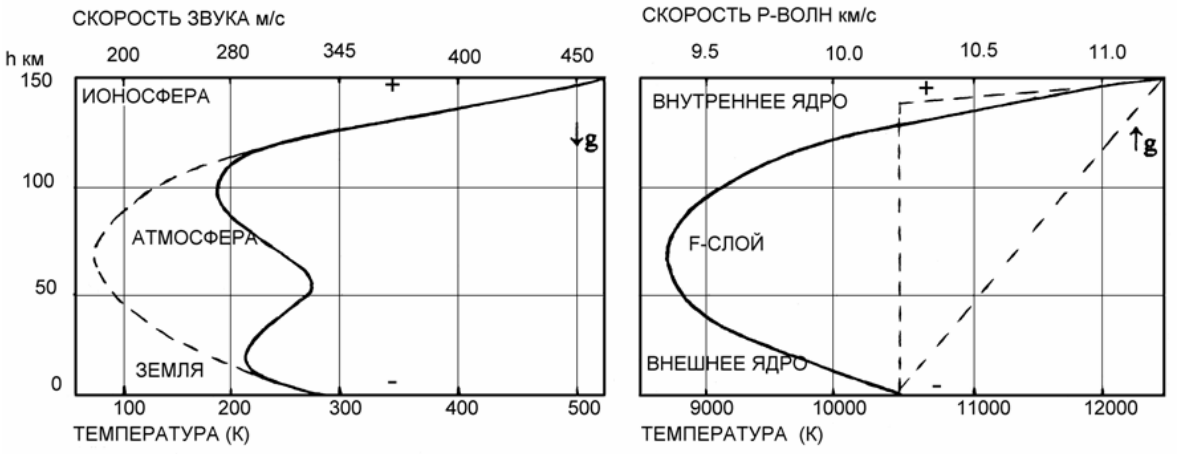


Рис. 14-8. Распределение температуры и скорости звука в ионосфере и F-слое ядра Земли.

Воспользуемся данными о стандартном геомагнитном поле. Переменная часть величины H-компоненты (в микротеслах - мкТл), измеренная в плоскости экватора представлена на рис. 14-7-b точками. Среднее значение *H*-компоненты на экваторе составляет примерно 32 мкТл. Полученную функцию $H(\varphi)$ можно разложить на две гармоники: первую и вторую. Напомним, что согласно нашей модели генерации геомагнитного поля, в плоскости экватора должно находиться дифференциальное токовое кольцо. Если кольцо симметрично, то не должно наблюдаться переменной (по углу) части *H*-компоненты. Одной из причин появления этого эффекта могла бы быть некоторая

несоосность колец. Например, смещение одного из них относительно другого может привести к пространственной вариации величины *H*-компоненты (ΔH), что и наблюдается в действительности. Так как максимум вариации *H*-компоненты приходится примерно на (120-135)°E, то для реализации этого явления, внутренний круг следует сместить в противоположную сторону, - к 300°E. Величина смещения x находится из пропорции: $\Delta H/H \sim x/\Delta R$ ($x \approx 1/5\ \Delta R$, около 20 км). Таким образом, первая гармоника определит в плоскости экватора смещение внутреннего круга (2), а вторая - отклонения от этого круга (2) в соответствии с величинами и фазами второй гармоники. В результате, на рис. 14-7-с можно получить сечение F-слоя в плоскости экватора, которое наилучшим образом описы

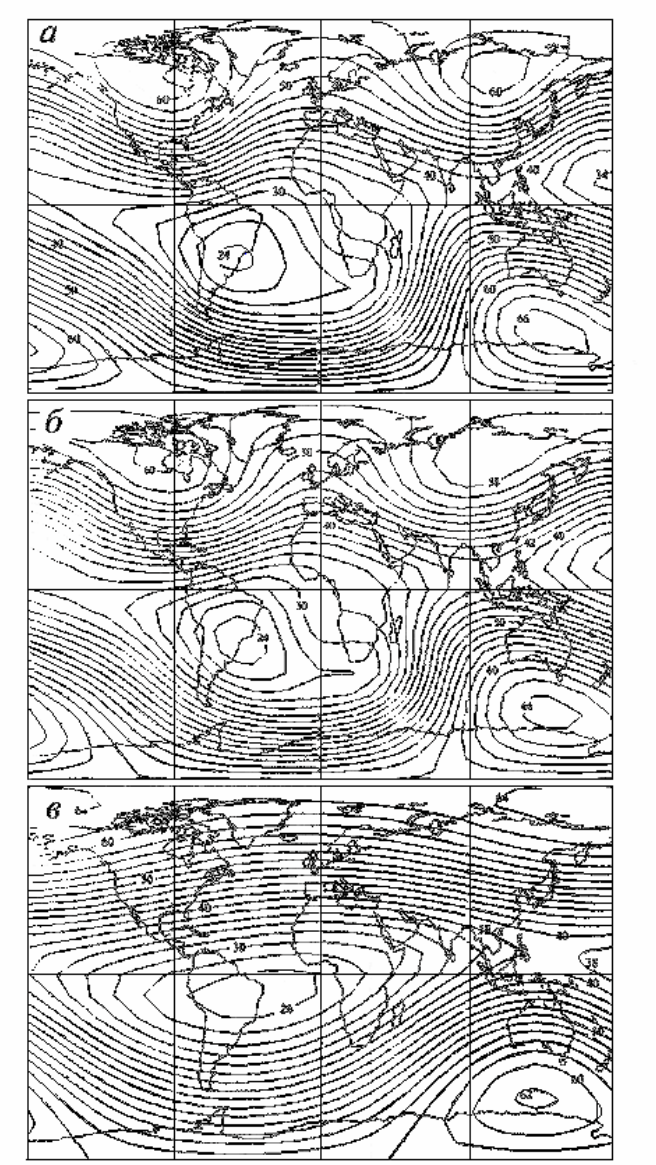


Рис. 14-9. Модуль интенсивности (в нТл) геомагнитного поля - ***а***; модуль интенсивности поля, рассчитанный для системы дифференциальных токовых колец и 4-х радиальных диполей, соответствующих глобальным магнитным аномалиям - ***б***; модуль интенсивности дифференциального токового кольца без радиальных диполей – ***в*** (Ботвиновский, 2000).

вает морфологию H-компоненты геомагнитного поля.

Оказывается, что обнаруженное явление латеральной анизотропии внутреннего ядра играет значительную роль в формировании морфологии геомагнитного поля. Иначе, структура оболочки внутреннего ядра оказывается хорошо связанной с морфологией горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Отметим ещё одно удивительное

совпадение. Для получения соответствия модели реальному полю, пришлось сместить внутреннее кольцо токовой системы (рис. 14-7-с) в направлении к 300°E. Надо сказать, что для наилучшего описания анизотропии внутреннего ядра, K.C.Creager, так же как и мы, сместил центр анизотропии в сторону 300°E.

Идея описания геомагнитного поля с помощью двух токовых колец, смещенных относительно друг друга, как было показано Ботвиновским, оказалась вполне плодотворной. На рис. 14-9-*б* и 14-9-*в* приведены примеры расчета модуля геомагнитного поля. Дифференциальное токовое кольцо было смещено относительно оси вращения на угол порядка 10º. Радиальные диполи были размещены в местах расположения магнитных аномалий на радиусе шара, равном радиусу внутреннего ядра. Этот рисунок показывает, что токовая схема, принимаемая в нашей модели генерации геомагнитного поля, позволяет получить морфологию источника, соответствующую реальному полю Земли, изображенному на рис. 14-1 и 14-9-а.

14. 4. Магнитные аномалии, джерки, инверсии и фокусы векового хода.

Аномалии. На карте полного вектора МПЗ (F) хорошо различимы (см. рис. 14-1, 14-9-а) глобальные магнитные аномалии (ГМА). Интенсивность ГМА настолько велика, что её можно сравнивать с интенсивностью дипольной части МПЗ. Четко выделяются четыре аномалии: Канадская, Сибирская, Бразильская (Южно-Атлантическая) и Южная. Эту аномалию иногда называют Южный полюс, объединяя ее с южным магнитным полюсом, что не совсем верно; иногда - Антарктической. Обычно магнитологи, разлагая МПЗ в ряд Гаусса, стремятся сделать так, чтобы первый коэффициент ряда имел максимальное значение. После вычитания из общей структуры МПЗ ее первых коэффициентов ряда, остается т.н. недипольная часть. В оставшемся поле уже не наблюдается так хорошо выраженных аномалий, как это видно на карте. По-видимому, если мы хотим разобраться в том, что представляет собой МПЗ, это не совсем корректная процедура. Более того, хорошо известно, что ГМА "проявляются" в космосе, ионосфере и магнитосфере и вообще "живут" самостоятельной жизнью.

Еще в начале 60-х годов в России с помощью спутников было зарегистрировано открытие, связанное с проникновением высокоэнергетических частиц солнечного ветра в областях северных (Сибирской и Канадской) магнитных аномалий. В областях этих ГМА наблюдалось резкое увеличение энергии и плотности потока частиц. Сотрудники группы академика Вернова зафиксировали, что это увеличение связано с резкими изменениями модуля поля в районах аномалий. В этом плане наиболее изучена Бразильская аномалия. Анализируя материалы, полученные на японском спутнике EXOS-A и на космической станции с телескопом Хаббл, можно убедиться, что эта аномалия "проявляется" до высот 600 км. Плотность потока заряженных частиц в районе БМА превышает аналогичную величину, измеренную в других районах, удаленных от ГМА, на несколько порядков. Магнитные аномалии (в частности, Бразильская) изучались археомагнитными методами, где было показано, что БМА в течение последних 4-х тыс. лет не меняла своего положения, ее эпицентр всегда находился там же где сейчас, на восточном побережье Бразилии. Интенсивность поля этой аномалии за 4 тыс. лет была непостоянной: она дважды возрастала относительно современной примерно в 1.5 раза. Одно из наиболее интересных свойств ГМА состоит в том, что в момент инверсии МПЗ они остаются источниками магнитного поля. Известен такой факт, когда в момент инверсии МПЗ виртуальные магнитные полюса оказывались ориентированными на Сибирскую ГМА. Хорошо известно, что в момент инверсии магнитные полюсы движутся вдоль траекторий, приближающихся к ГМА (рис. 14-28).

Модель ГМА. По нашей модели, вещество F-слоя представляет собой двухфазную среду (газ + жидкость), которая с одной стороны, граничит с “газообразным” G-ядром, а с другой, - с внешним - “жидким” E-ядром. В этом слое возможны гидродинамические

течения, конвективный тепломассоперенос, возникновение и дрейф вихрей и т.п. Оцененная разными авторами величина вязкости вещества внешнего ядра (и, по-видимому, F-слоя) находится в пределах 10^6 - 10^{10} Пуаз.

Представим себе, что необходимо решить задачу поддержания постоянной температуры в таком тонком слое. Положим, что в нем могут развиваться конвективные процессы, а механизмами кондуктивной теплопроводности можно пренебречь, тогда число Релея должно быть больше критического.

Число Релея, оцененное для вещества F-слоя:

$$Ra = g\beta l^3 \Delta T/\eta\,\zeta, \qquad (14.16)$$

g - величина ускорения силы тяжести, β - коэффициент объемного расширения, l - толщина F-слоя, ΔT - перепад температуры на слое, η - вязкость вещества, ζ - температуропроводность; значительно больше критического, что означает возможность протекания конвекции в F-слое. Температура вещества F-слоя вблизи границы с внутренним ядром выше, чем у границы с внешним. При конвекции в некоторых областях F-слоя вещество будет опускаться, в других - подниматься. В таком слое возможна турбулентная конвекция, в отличие от стационарной конвекции во внешнем ядре.

Предположим, что в трех областях F-слоя "холодное" вещество опускается в направлении к G-ядру, а в одной – поднимается, вынося при этом тепло из F-слоя. Наверняка существуют и другие области, в которых происходит нечто подобное, но там процессы происходят значительно менее интенсивно, чем в этих четырех, которые явно выделяются на фоне остальных. Будем считать, что эти выделенные области соответствуют глобальным магнитным аномалиям, причем, первые три, это: Канадская, Сибирская и Бразильская аномалии, а четвертая (где происходит подъем вещества) - Южная ГМА. Вещество F-слоя, обладающее достаточно высокой проводимостью, способно захватить с собой "вмороженную" в него силовую линию дипольной части МПЗ и увлечь ее за собой при вихревом движении проводящего вещества поперек слоя. Нисходящий поток проводящего вещества в Северном полушарии за счет влияния кориолисовых сил начинает вращаться по часовой стрелке (аналогично антициклону в атмосфере и океане). Захваченное потоком магнитное поле вращается с ним со скоростью $\boldsymbol{v}$, генерируя при этом магнитную индукцию B_A, иначе, поле аномалии, которая (по модели) не стационарна ($\partial B/\partial t \neq 0$).

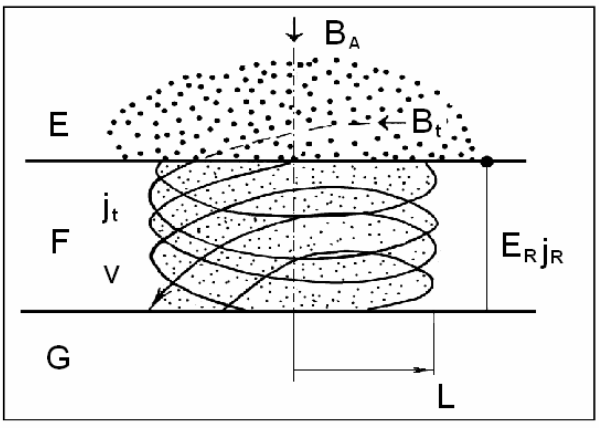


Рис.14-10. Схема генерации магнитного поля глобальной аномалии как вихря Россби в тонком F-слое. Описание в тексте.

Движение проводящей среды с одновременным ее вращением и вращением, «вмороженного» в среду магнитного поля в магнитной гидродинамике определяется как циклоническая турбулентность. В такой среде возможно возникновение магнитной индукции за счет т.н. α-эффекта. Суть его состоит в том, что образовавшийся в результате

проявления циклонической турбулентности электрический ток зависит не только от величины электрического поля E, но еще определяется и величиной вмороженного магнитного поля B_t: $j = \sigma[E + \alpha B]$. Захваченное вращающимся потоком поле B_t создает ток j_t, который вызывает появление поля (индукции) B_A. Индукция B_A (поле ГМА), в свою очередь, создает (и усиливает) ток j_R, который еще больше усиливает захваченное потоком вмороженное поле B_t (см. рис.14-10).

Эффект индукции (усиления поля) описывается в магнитной гидродинамике уравнением:

$$\partial B/\partial t = rot(\boldsymbol{v} \times B) + \eta_M \nabla^2 B. \qquad (14.17)$$

Равенство нулю $\partial B/\partial t$ означает, что поле аномалии стационарно, хотя в действительности это не так. Если движение среды отсутствует, то в этом уравнении $rot(\boldsymbol{v}\times B) = 0$, что тоже не верно. Если бы это было так, то проявлялись бы только эффекты диффузии поля, которые описывает последний член уравнения. Кроме этого, он показывает наличие потерь, связанных с джоулевым нагревом. Если магнитная вязкость η_M равна нулю, то мы имеем дело с идеальным проводником.

Сделаем некоторые приближенные оценки параметров. Примем характерный размер вихря L равным 100 (и более) км. Магнитная вязкость η_M равна:

$$\eta_M = (\mu\sigma)^{-1} = 1\text{-}10 \ \text{м}^2/\text{с}.$$

Скорость потока можно оценить, приравнивая единице величину магнитного Рейнольдса

$$Re = \boldsymbol{v}L/\eta_M.$$

Величина $\boldsymbol{v}$ оказывается порядка 10^{-4} м/с (3 км/год). (Сравниваем полученную оценку $\boldsymbol{v}$ со скоростью западного переноса, полученную нами по скорости дрейфа ФВХ ≈ 20 км/год). Необходимо оценить степень влияния магнитных сил на величину и направление скорости $\boldsymbol{v}$. Обычно оценка степени влияния, т.е. оказывает ли магнитное поле влияние на гидродинамику, или она остается пуазейлевой, состоит в определении числа Гартмана G:

$$G = BL(\sigma/\rho\eta)^{1/2}, \qquad (14.18)$$

где ρ - плотность среды, а ν - кинематическая вязкость (примем $\eta \approx 10^6$ - 10^8 Пуаз). Подстановка известных и принятых нами параметров показывает, что $G > 10^3$. Это, в свою очередь, указывает, что при оценке гидродинамических характеристик происходящих в земном ядре процессов, необходимо учитывать влияние магнитного поля. Величина тока, необходимого для генерации поля ГМА, равна примерно 10^8 ампер. Примем величину L = 300 км, тогда время диффузии поля $t = L^2/\eta \approx 10$ тыс. лет. Последняя оценка показывает, что после "отключения" основного поля в результате прохождения инверсии, поле ГМА может сохраняться еще, по крайней мере, 10 тыс. лет. В качестве подтверждения этой величины, ещё раз сошлемся на результаты, полученные Клементом при анализе периодов времени инверсии, определенных в различных точках Земли. В зонах влияния ГМА период инверсии составляет 10 – 12 тыс. лет, в то время при отсутствии этого влияния, это время не превышает 2 тыс. лет.

Фокусы векового хода. Современные карты годовых изменений величин компонент геомагнитного поля показывают, что существуют несколько областей (регионов), в которых эти компоненты возрастают (убывают) значительно интенсивнее, чем в других. Центральные части этих областей называют фокусами векового хода (ФВХ). Изучая карты современных вековых вариаций, можно выделить:

- Бразильский ФВХ (№ 1 на схеме 1) с максимальной скоростью изменения общей интенсивности поля -200 нТл/год; его координаты 0°, 40° W.
- Цейлонский ФВХ (№ 11): + 100 нТл/год, 10°N, 80°E.
- Индонезийский ФВХ (№ 9): - 40 нТл/год, 15°S, 110°E.
- Тихоокеанский ФВХ (№ 10): + 60 нТл/год, 15°S, 100°W.

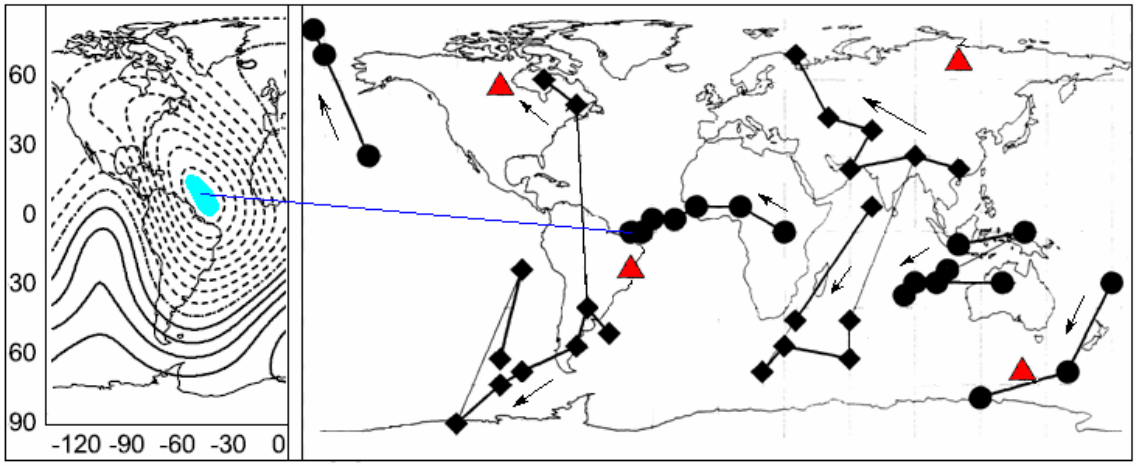


Рис. 14-11. Слева - фокус векового хода (ФВХ). Справа - карта дрейфа ФВХ с 1743 по 1985 г.г. Треугольники - ГМА. Номера ФВХ приведены на Схеме 1.

Анализ аналогичных карт, построенных для более ранних лет, показал, что ФВХ представляют собой области, дрейфующие по поверхности Земли. ФВХ, как правило, зарождаются на экваторе и либо дрейфуют вдоль него в западном направлении (см. схему 1 и рис.14-11), либо, так же дрейфуя к западу, перемещаются при этом к полюсам и, постепенно уменьшая свою интенсивность, распадаются. В частности, хорошо известен т.н. Каспийский ФВХ, который дрейфовал по территории России и распался на полярном Урале.

ФВХ за последние 250 лет изображены на схеме 1. ФВХ (№ 1) представляет собой циклон (С), Удивительна его стабильность и большое время жизни (> 250 лет). За это время он “успел” пройти путь вдоль экватора от Африки до Бразилии. ФВХ (№ 2), тоже отрицательный, но, так как он двигался в Южном полушарии, - антициклон (А), дрейфуя в западном направлении, по-видимому, был “родителем” ещё трех ФВХ (№№ 7, 6 и 9). Первый из них (№ 7) дрейфовал к северу, два других - к югу. Кроме этих, есть шесть положительных ФВХ. Среди них нет таких, дрейф которых был бы “привязан” к экватору, но и эти ФВХ можно разбить на две группы, внутри которых явно видна их связь: первая объединяет №№ 4 (Каспийский ФВХ), 3 и 11, а вторая, №№ 5, 8 и 10.

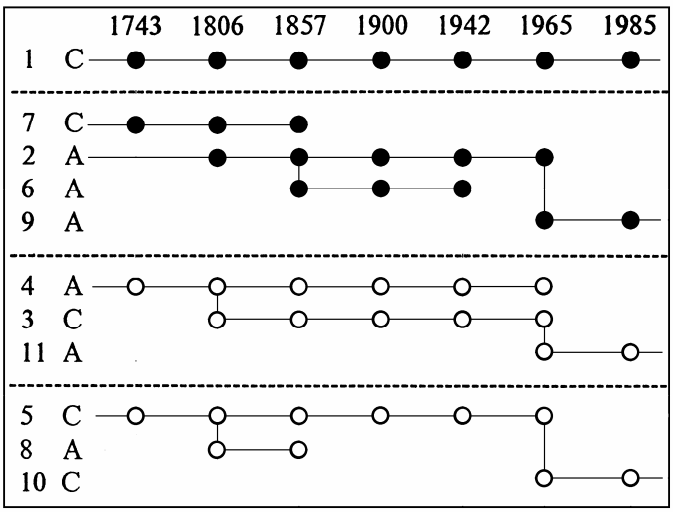


Схема 1. Эволюция фокусов векового хода. (С-циклоны; А-антициклоны).

Общим свойством для всех ФВХ, можно отметить, что все они как бы “обходят стороной” ГМА, ни разу не “столкнувшись” с ними. Возможно, это происходит не случайно. ФВХ, были рассмотрены как гидродинамические вихри, типа вихрей Россби. В этом плане они, аналогично атмосферным вихрям, могут быть циклонами и антициклонами. Направление переноса вихря - ФВХ может быть как к Земле, так и от неё, вращение вихря - как по часовой стрелке, так и – против неё. Все это создает широкую гамму различных гидродинамических явлений, называемых фокусами векового хода.

Представленные на схеме и рисунке данные позволяют оценить величину скорости западного дрейфа ФВХ (вдоль экватора). Скорость дрейфа составляет примерно 10 – 20 км/год. (Возможно, эта оценка каким-то образом характеризует скорость переноса вещества в F-слое в западном направлении).

Аналогия ФВХ с циклонами и антициклонами. Спиральное движение потока в области генерации ГМА можно уподобить близким, по сути, циклоническим явлениям, происходящим в атмосфере и океане. В этом плане ГМА: Канадская, Сибирская и Южная - антициклоны, а Бразильская ГМА - циклон. Здесь можно проследить несколько аналогий. Во-первых, по направлению вращения потока, во-вторых, по увеличению поля, как аналог атмосферного вихря. В области атмосферных антициклонов растет давление, в области антициклонов - магнитных аномалий, - возрастает величина магнитного поля. Приведем ещё одну интересную аналогию из области астрофизики. В атмосферах Юпитера и Сатурна сравнительно недавно обнаружены стационарные вихри (вихрь «Большое Красное Пятно» на Юпитере известен более 300 лет), причем, и на *Юпитере,* и на *Сатурне* длительное время устойчиво существуют *по три антициклона и одному циклону*. Циклон-антициклонная асимметрия пока не нашла однозначного объяснения.

Из наблюдений известно, что интенсивность магнитного поля в районах ГМА меняется со временем. Почему это может происходить в нашей модели? Можно найти несколько причин. Перечислим их: изменение скорости потока v, которая зависит от ряда причин, и, в основном, определяется pT-параметрами вещества F-слоя. Сюда можно отнести и изменение величины основного магнитного поля Земли, и изменение параметра α, и изменение проводимости σ, и т.п.

Циклон - антициклонная асимметрия наблюдается в атмосферах больших планет. Такого явления нет ни в атмосфере Земли, ни в атмосфере Венеры. Возможная причина состоит в том, что динамика атмосфер этих планет в значительной степени определяется Солнцем, в то время как динамика атмосфер Юпитера, Сатурна и F-слоя Земли, по-видимому, «управляется» собственным внутренним тепловым потоком.

Циклон-антициклонная асимметрия. Более 300 лет астрономы наблюдают за знаменитым Большим Красным Пятном Юпитера (БКПЮ). До недавнего времени природа этого столь долгоживущего атмосферного вихря была совершенно непонятной. Сейчас БКПЮ, а также другие аналогичные структуры, обнаруженные не только на Юпитере, но на Сатурне и Нептуне, принято считать солитонами и вихрями Россби. Причем, солитонами считаются исключительно антициклоны, которых обычно на планете больше, чем циклонов (Незлин, Снежкин, 1990). Аналогичные образования играют значительную роль в динамике верхних оболочек Солнца и больших планет (Тихомолов, 1994; Tikhomolov, 1995; Tikhomolov, 1996). Тихомолов предложил принципиально новую модель глобального вихря, основанную на том, что в слое «тонкой воды», где происходит формирование вихрей Россби, имеется подогрев снизу. Дополнительный подогрев приводит к добавлению в уравнение, одним из решений которого являются локализованные вихри Россби, дополнительных членов, имеющих смысл положительной и отрицательной диффузии. При этом для возмущений достаточно большого масштаба,

происходит возрастание их амплитуды. Иначе, дополнительный подогрев играет роль диффузионного переноса, который, добавляясь к гидродинамическому переносу, обеспечивает системе дополнительные обратные связи и приводит её к режиму самоорганизации. Надо сказать, что в природе это проявляется на Солнце и больших планетах и, согласно нашей модели, в F-слое Земли. В атмосферах Земли, Венеры и Марса, где процессы переноса контролируются Солнцем, таких явлений не происходит, не наблюдается и долгоживущих вихрей Россби.

Таблица. 1.

Вихри Юпитера		**Вихри Сатурна**		**ГМА**		
Большое красное пятно	22° S	Большая Берта	5° N	Сибирская	67° N	A
Малое красное пятно	19° N	Коричневое пятно	42° N	Канадская	58° N	A
Коричневый овал	14° N	Ультрафиолетовое пятно	24° N	Бразильская	15° S	C
Белый овал	34° S	Пятно Анны	55° S	Антарктическая	55° S	A

В атмосферах больших планет замечена т.н. циклон - антициклонная асимметрия: циклонов всегда много меньше, чем антициклонов. Это связано с тем, что антициклоны (А), это солитоны, в то время как циклоны (С), - нет. Однако, если «рождается» пара циклон-антициклон, то они оба могут быть солитонами. В атмосферах Юпитера и Сатурна наблюдается по три антициклона и одному циклону. БКПЮ тоже является антициклоном. Картина магнитных аномалий на Земле удивительно напоминает картину вихрей на Сатурне, где можно видеть даже хорошее совпадение их по широтам (см. Таблицу 1 и рис.14-11).

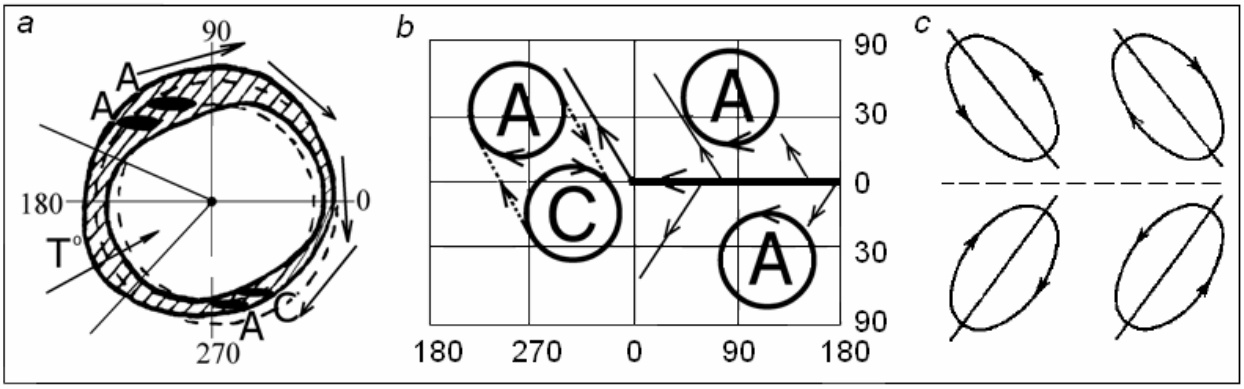


Рис. 14-12. Модель глобальных магнитных аномалий как циклонов и антициклонов. Проекция вихрей на F-слой, стрелками показано направление гидродинамического переноса. Стрела поперек слоя – температурный градиент. Выделенная область соответствует Тихому океану - *a*. Размещение антициклонов («А», и пара «А-С» - солитоны). Линия вдоль экватора – гидродинамический перенос, ответвления показывают направления «рингов» (ФВХ) - *b*. Вихри, образующиеся при отрицательной вязкости – *c* (см. рис. П2-3).

В магнитном поле Земли, как и в атмосферах Сатурна и Юпитера, возникли и продолжают существовать две пары вихрей. Одна пара вихрей состоит из двух антициклонов, другая, - из циклона-антициклона. Пара циклон-антициклон: Бразильская - Канадская аномалии на Земле и атмосферные вихри: Ультрафиолетовое пятно и Пятно Анны, - на Сатурне. Рождение пары вихрей ФВХ (тоже вихрей Россби) можно наблюдать, если обратиться к схеме 1 и рис.14-11. Вихри Россби являются продуктами самоорганизации структуры, возникающей в жидком, вращающемся, подогреваемом снизу слое. На Юпитере и Сатурне на динамику их атмосфер - влияние Солнца не

сказывается, так как внутренние тепловые потоки этих планет заметно больше, чем поток от Солнца на их расстояниях. На Земле динамика атмосферы в значительной степени определяется Солнцем, поэтому нет и подобных долгоживущих вихрей.

Инверсии. Инверсия геомагнитного поля была обнаружена в 1906 году Брюнесом при палеомагнитных исследованиях в лаве из Центрального массива во Франции. С тех пор подобные образцы горных пород были найдены во всех частях света. Установлено, что примерно половина всех измеренных образцов пород обладает нормальной намагниченностью, а другая половина - обратной. Долгие годы продолжался спор, касающийся вопроса, изменяла ли Земля полярность магнитного поля, или обратная намагниченность является результатом воздействия на вещество тех или иных физических или химических процессов. В наше время этот вопрос снят: считается доказанным, что Земля периодически меняет полярность своего поля. Более того, доказана корреляция между частотой смены полярности поля и тектонической активностью планеты. Есть свидетельства тому, что величина температурного градиента (по-видимому, и теплового потока) различны при прямой и обратной полярности поля. Оказывается, что величина температурного градиента пород с обратной полярностью геомагнитного поля несколько выше, чем этот градиент у пород с прямой полярностью.

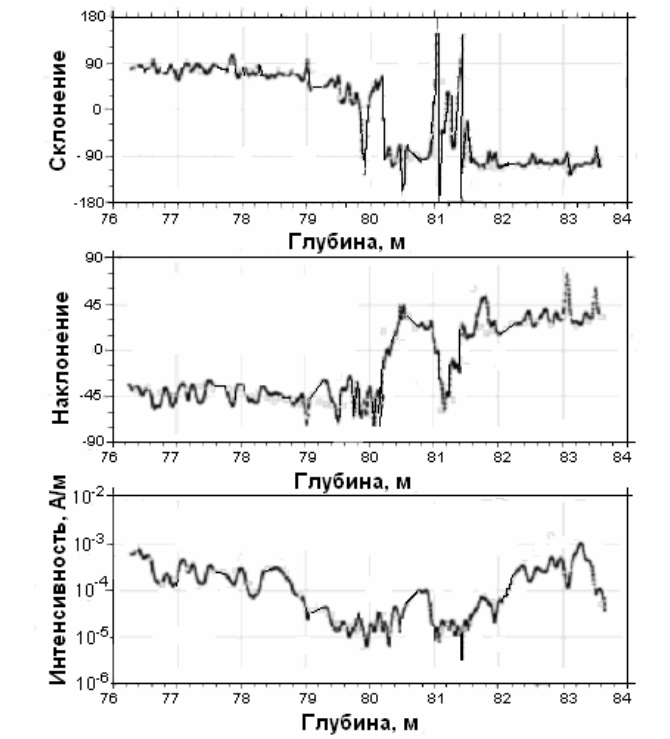


Рис. 14-13. Изменение параметров геомагнитного поля в период инверсии Брюнес-Матуяма: склонения, наклонения и полного модуля поля, в зависимости от глубины осадков (т.е. текущего времени) для Южной Атлантики.

Обнаружено, что в момент инверсии, величина поля значительно понижается, но почти никогда не бывает равной нулю. Величина остаточного поля неравномерна по земной поверхности: она заметно выше в областях магнитных аномалий. Важным параметром является время инверсии, или, что тоже самое, - средняя скорость дрейфа магнитного полюса, т.к. длина его пути известна. Общепринято, что время обращения составляет в среднем от 1000 до 10000 лет, хотя есть оценки и в сто тысяч лет (Паркинсон, 1986). Однако есть и совсем другие оценки, где тщательно изучалось поведение магнитного поля во временных переходных зонах между эпохами Гаусс-Матуяма, Матуяма-Харамильо, а также верхнекембрийской инверсии N→R на ряде разрезов

Средней Азии и Восточной Сибири. Авторы выделили несколько кратковременных переполюсовок в течение периода инверсии. Среднее время смены полярности, когда можно говорить об устойчивом состоянии поля, составляет примерно от сотни до тысячи лет. Инверсия включает в себя до десятка и более состояний той или иной полярности поля и промежуточных состояний, когда дипольного поля (и магнитных полюсов) попросту нет. В недавно опубликованной работе Клемента показано, что время переполюсовки Брюнес-Матуяма тем больше, чем дальше точка взятия пробы от экватора. Это явление чем-то напоминает известный факт, что время смены дня и ночи (терминатор) тем короче, чем ближе к экватору.

Таблица 2. Инверсии и экскурсы.

Epochs:	Excurses: ago (kyr),	title:	№
	- 2.5	Etrussia	1
	- 15 – 20	Gothenburg	2
	- 25 – 30	Mono Lake	3
Brunhes 0 - 780	- 35 – 45	Laschamp	4
	- 60 – 70	Kargopolovo	5
	- 68 – 80	Gaotai	6
	- 110 – 130	Blake	7
	- 180 – 200	Biwa I	8
	- 230- 250	Jamaica	9
	- 280 – 300	Biwa II	10
	- 360 – 390	Biwa III	11
	- 469	Emperor	12
Matuyama	-931	Kamikatsara	15
	- 990 - 1.06	Jaramillo	16
	-1.190-1.215	Cobb Mountain	17
	- 1370 - 1440	Ontong Java	18
	- 1675	Gitsa	19
	- 1.780 – 1.960	Olduvai	20
Matuyama-Gauss 2.600	- 2.110 – 2.270	Reunion	21
Gauss	- 3.020 – 3.090	Kaena	22
Gauss-Gilbert 3.570	- 3.210 – 3.290	Mammoth	23
Gilbert	- 3.800	Cochiti	24
	- 4.200	Nunivak	25
	- 4.400	Sidufjall	26
Gilbert boundary, 5.000	- 4.800	Thverta	27
Epoch 5	- 5.100 – 5.300		28
boundary, 6.000	- 5.700 – 6.000		29
Epoch 6 boundary, 7.300	- 7.300		30

(В Таблице 2 различным цветом выделены инверсии: светлый – N, серый – R).

Интересный анализ характера инверсий выполнен Рузмайкиным и Трубихиным. Они показали, что плотность распределения по длинам интервалов между обращениями распределена по случайному (пуассоновскому) закону. Оказалось, что на длительном интервале времени, когда происходит много инверсий, отрицательная полярность поля превалирует над современной положительной полярностью поля. Хотя в течение последнего миллиона лет (690 тыс. лет из него составляет т.н. период Брюнеса) явно прослеживается обратная зависимость. В течение этого периода поле несколько раз меняло полярность на очень короткие периоды времени и возвращалось затем к прежней полярности. Такие кратковременные события, в отличие от инверсий, принято называть экскурсами.

Экскурсы. Периоды современной (положительной) полярности поля (N) и периоды отрицательной полярности (R), длительность которых составляет порядка одного млн. лет, прерываются короткими изменениями поля, называемыми экскурсами. Разделение в значительной степени условно. По всей видимости, природа этих явлений едина.

Обсуждая проблему экскурсов, Петрова и Поспелова (1992) отмечают три важных момента:
- теории динамо не могут объяснить таких резких и кратковременных изменений поля, как экскурсы;
- экскурс, как и инверсия, - это глобальное явление;
- экскурсы происходят во время цикла понижения магнитного момента Земли.

Последнее заключение подтверждается недавно опубликованными данными о поведении магнитного поля Земли в течение последних 800 тыс. лет, где авторы показали, что экскурсы происходят в ситуации, когда дипольный момент опускается ниже критической отметки в 4×10^{22} A m^2

Джерки. Джерками (джерк - резкий толчок во время езды) в геомагнетизме называются резкие изменения производной *dB/dt*, т.е. джерк, это резкое изменение скорости роста (убывания) интенсивности компонент МПЗ. Это название берет начало с работы (Courtillot et al., 1978), в которой авторы обратили внимание на поведение вековой вариации Y-компоненты МПЗ в Европе в 1969-70 гг. (см. рис. 14-14). Необычность поведения поля выражалась в том, что ряд среднегодовых значений Y(t), начиная с 40-х годов и до конца 60-х, для каждой обсерватории, хорошо описывался параболой, а затем наблюдалось резкое расхождение наблюдаемых данных и модели. Введение второй параболы для данных после события 1960-70 гг. устраняло это расхождение. Именно это явление и получило название джерк. Начиная с этой работы, было выполнено много исследований, в которых аналогичная методика применялась как для оценки джерка 1969-70 г.г., так и для выделения аналогичных джерков в другие эпохи (Alexandrescu et al., 1996). Для обнаружения джерка авторы строят график зависимости первой производной компоненты геомагнитного поля от времени. Как правило, эта зависимость выглядит как наклонная прямая. Если в какой-то момент времени, эту прямую нельзя продолжить, а следует построить другую, под другим углом, то это событие и есть джерк (рис. 14-14). Наилучшим образом джерки проявляются во временной зависимости Y-компоненты, слабее они видны в X-компоненте и еще слабее, - в Z-компоненте геомагнитного поля. Длительность джерка, по данным работы (Gavoret et al., 1986), оценивалась в 6 месяцев.

Известны и хорошо изучены джерки, произошедшие практически на всей территории Земли, но с различной интенсивностью в: 1969-1970, 1979-1980, 1989-1992 годах. Сделано предположение о том, что в 1999 г. возможно начался новый джерк и прогнозирует появление следующего, - ранее, чем через 10 лет.

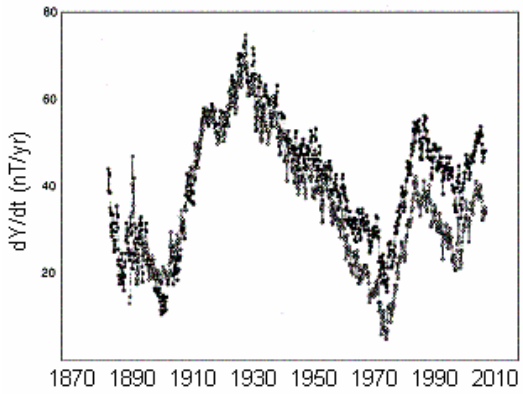


Рис.14-14. Вековые вариации восточной компоненты геомагнитного поля (*dY/dt*). Резкие изменения производной по данным обсерватории Niemegk, с 1883 по 2000 гг., - джерки (Mandea et al., 2000).

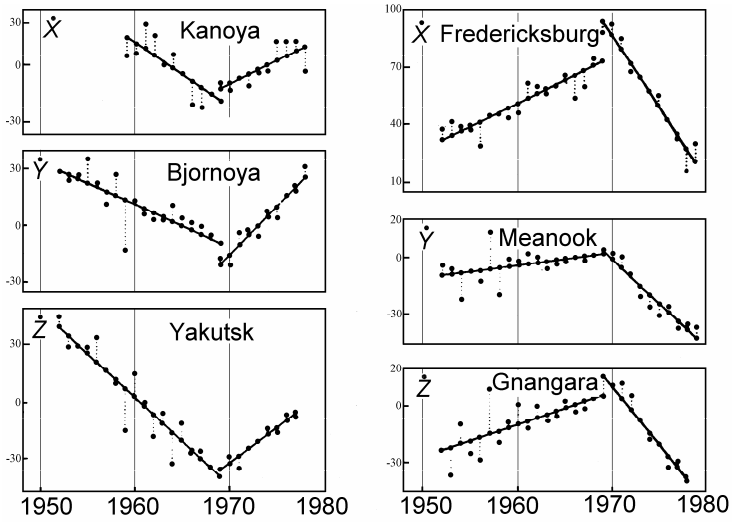


Рис. 14-15. Джерки 1969-70 г.г. по данным обсерваторий.

По-видимому, можно считать, что Y- компонента характеризует квадрупольность геомагнитного поля. Изменение величины этой компоненты во времени, вероятно, связано с изменением степени квадрупольности магнитного поля. Очевидно, что симметричный относительно оси вращения дипольный источник генерации геомагнитного поля не должен приводить к появлению Y-компоненты. Наличие этой компоненты и, собственно, квадрупольности геомагнитного поля можно связать с существованием четырех глобальных магнитных аномалий, представляющих четыре токовых кольца не находящихся на оси вращения Земли. В пользу такой модели говорит распределение джерков 1969 года по поверхности Земли. Как видно из этого рисунка, максимальные величины джерков «привязаны» к глобальным аномалиям.

Пространственно-временная структура джерка исследована в нескольких работах. Так в (Nevanlinna, 1984) по данным о вековых вариациях МПЗ за 1956-1978 г.г. для 48 обсерваторий построена модель поля в виде четырех радиальных диполей, расположенных на радиусе 0.25R. Автор этой работы обнаружил поразительный факт: во время джерка 1969-70 г.г. в ряде регионов Земли западный дрейф сменился на восточный. В (Madden, Le Mouel, 1982) замечено, что пространственное (на поверхности Земли) распределение регионов, занятых джерками, тяготеет к ГМА (рис.20-14). Две последние работы показывают несомненную связь джерков с западным дрейфом фокусов векового

хода (ФВХ), с одной стороны, и, с другой, с глобальными магнитными аномалиями. Именно поэтому в нашей модели джерки рассматриваются в контексте с ГМА и ФВХ.

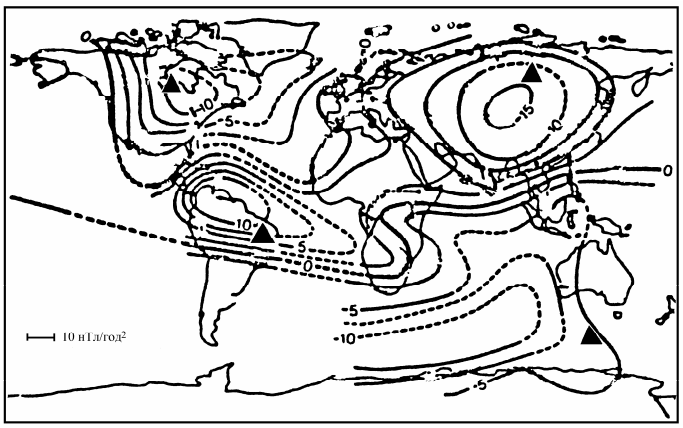


Рис. 14-16. Распределение интенсивностей джерка-1969. Треугольники – ГМА

Модели инверсий, экскурсов и джерков. Модель геомагнитного динамо, в принципе, объясняет механизм усиления первичного поля, захваченного Землей в мировом пространстве, и, тем самым, объясняет идею генерации дипольной части поля. Однако ни одна динамо модель не в состоянии найти правдоподобное объяснение инверсий и экскурсов поля. Наличие джерков, вообще говоря, находится в противоречии с динамо моделью. Это обстоятельство связано с тем, что для генерации поля на динамо эффекте необходима вполне определенная (и не малая) величина проводимости среды, приближающейся к сверхпроводимости, что автоматически определяет временной диапазон процессов, происходящих в ядре Земли. Характерное время в различных динамо моделях колеблется в очень нешироких пределах и составляет ~ 100 тыс. лет. Что же касается джерков, то в литературе по геомагнитному полю отсутствуют даже попытки найти объяснение таким явлениям. Явление возникновения джерков иногда связывается с изменением характера дрейфа северного магнитного полюса. Однако если такая связь и существует, это не помогает вскрыть физику джерка.

Согласно развиваемой нами модели, инверсии, экскурсы, джерки и пр. - явления термодинамические, связанные с “работой” фазового перехода. Магнитное поле является своеобразным “маркером” этих процессов. С такой позиции становится очевидной и понятной ещё одна особенность геомагнетизма - высокая стабильность поля во времени. Ни в одной модели генерации геомагнитного поля не встречается даже намека на устройство или схему, поддерживающую амплитуду поля постоянной. В нашей модели, когда температура фазового перехода при заданном давлении является константой, эта особенность МПЗ очевидна. В этом плане, повторим: *такие явления, как аномалии, фокусы и джерки, ни что иное, как следствие функционирования фазового перехода и, связанной с ним, «работы» системы поддержания температуры в F-слое.*

Согласно нашей модели, ГМА представляют собой области, в которых происходит конвергенция потока, реализуется спиральное движение потока и т.д. Именно здесь, в основном, "работает" механизм выравнивания температуры F-слоя. Эту роль выполняет механизм конвекции. Режим регулирования температуры может изменяться по мере того, как температура среды будет приближаться к температуре, при которой происходит смена режима конвекции. Очевидно, что такие изменения наиболее резко будут проявляться именно в областях конвергенции потока, т.е. в областях генерации ГМА. Представим себе, что в F-слое, по мере конвективного теплового регулирования, была достигнута оптимальная температура T_o. Предположим, что система терморегулирования,

поддерживающая эту температуру в интервале $T_o \pm \Delta T$, не линейна. Закон изменения температуры может иметь вид: $T^2 \sim kt$, что вполне допустимо. Скорость изменения температуры оказывается в этом случае: $dT/dt \sim t^{-1/2}$. Затем, в момент времени t ($T = T_o + \Delta T$) в системе меняется знак производной и температура начинает уменьшаться, иначе, происходит уменьшение скорости: d^2T/dt^2 (рис. 14-17). Примерно так «работает» любая динамическая система терморегулирования. Будем полагать, что такая система, или ей подобная, регулирует температуру в области фазового перехода. Согласно нашей модели, в момент времени *t,* происходит изменение скорости вариации величины E_R и, соответственно, индукции B. В качестве подтверждения правомерности развиваемого здесь подхода, сошлемся на полученную зависимость «броска» (jump) величины B ($\cdot 10^{22}$ A m^2) от длительности периода инверсии t (в млн. лет): $B^2 \sim t$.

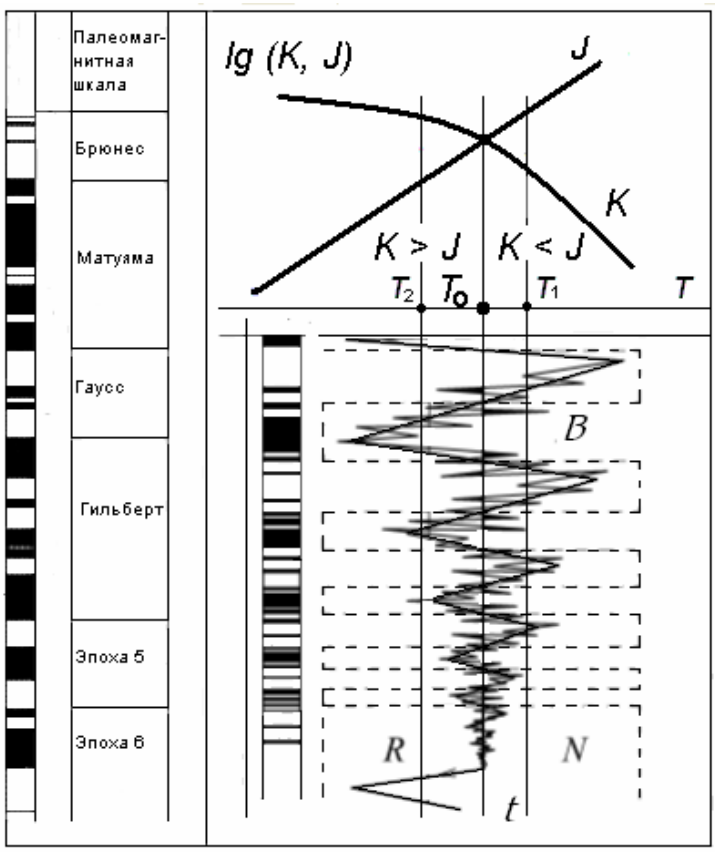


Рис. 14-17. Слева - палеомагнитная шкала. Справа - наша модель изменений полярности поля. Зависимость явлений, связанных с «работой» фазового перехода во времени и их отражение в геомагнитном поле.

Выясним, почему джерки наиболее эффективно проявляются в Y-компоненте поля? Предположим, что Y-компонента геомагнитного поля характеризует степень квадрупольности источника его генерации. Действительно, симметричный относительно оси вращения дипольный источник генерации геомагнитного поля не должен приводить к появлению Y-компоненты. Наличие этой компоненты и, собственно, квадрупольности геомагнитного поля, можно связать с существованием четырех глобальных магнитных аномалий, представляющих четыре радиальных токовых кольца не находящиеся на оси вращения Земли. В пользу такой модели говорит распределение джерков 1969 года по поверхности Земли, где показано, что эпицентры максимальных величин джерков практически совпадают с эпицентрами глобальных аномалий (рис. 14-16). Становится понятной пространственная взаимосвязь джерков с ГМА.

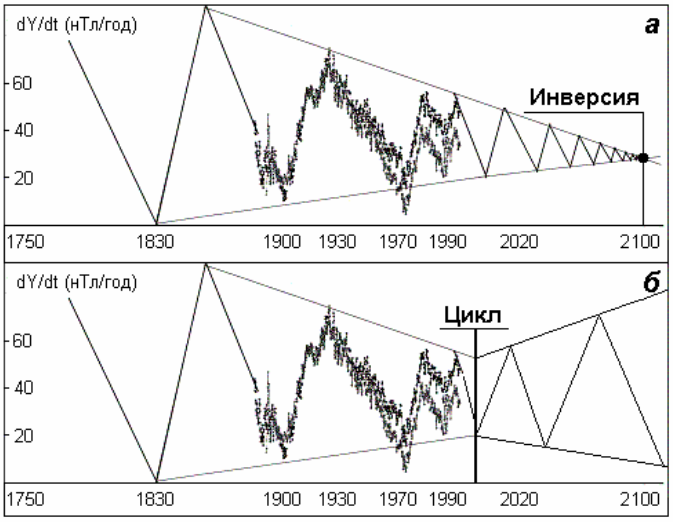


Рис. 14-18. Изменение частоты джерков со временем (прогноз). Выход системы на стационарное состояние и начало инверсии – а. Уменьшение частоты джерков после 2000 и цикличность – б.

Модель ФВХ. Предположим, что поверхность F-слоя окажется неравномерно нагретой. В такой системе начнется гидродинамический перенос (пуазейлево течение). Это течение принципиально отличается от рассмотренного нами ранее, конвективного течения, существенно меньшим масштабом. Как отмечалось, геострофическое приближение не применимо на экваторе, где условия равновесия могут достигаться только при круговых изобарах, когда сила барического градиента уравновешивается центробежной силой. В экваториальной зоне могут существовать только циклонические образования. Такие циклоны аналогичны вихрям ГМА, но отличаются от них меньшей интенсивностью, большей подвижностью, участием в пуазейлевом переносе и существенно меньшим временем "жизни". По-видимому, наиболее близкая гидродинамическая аналогия, это "ринги" в океане дрейфующие в западном направлении.

Ринги - синоптические вихри, образуемые в атмосфере и океане. В принципе, они могут быть как циклонами, так и антициклонами. Характерный размер рингов в океане порядка 100 км. Они медленно (по сравнению со скоростью вращения Земли) вращаются вокруг своей оси и дрейфуют в западном направлении со скоростью, близкой к скорости Россби. Линейная скорость вращения воды в рингах существенно меняется по толщине слоя и в поверхностных слоях обычно в несколько раз выше, чем скорость их дрейфа. Время жизни рингов в океане обычно не превышает нескольких месяцев. Однако за время жизни эти вихри успевают дрейфовать в западном, северо-западном или юго-западном направлениях на тысячи километров. Надо сказать, что на существование вихрей в океане очень заметную роль оказывает влияние Гольфстрима. Ринги считаются вихрями Россби, если время их существования ограничивается дисперсионным расплыванием вихря. Это в большей степени касается циклонов. Время жизни антициклонов ограничивается в большей степени вязкостью среды.

Перенос сведений о синоптических вихрях на ситуацию с ФВХ позволяет оценить ряд гидродинамических параметров среды. Примем скорость движения ФВХ, как вихря Россби, равной 0.03 см/с, и предположим, что скорость частиц в вихре примерно в 10 раз выше. Примем размер вихря ~ 100 км, а толщину экмановского слоя $l \approx 1$ км. Параметр Кориолиса $2\omega \approx 10^{-4}$ $с^{-1}$. Эти предположения позволяют оценить величину вязкости вещества F-слоя: $\eta = 2\omega l^2$. Коэффициент вязкости вещества F-слоя оказывается порядка $< 10^6$ Пуаз (Кузнецов, 1995), что неплохо согласуется с полученной нами оценкой этого параметра.

14. 5. Движение магнитных полюсов.

Рис. 14-19 показывает, что оба магнитных полюса дрейфуют не хаотически, а имеют вполне определенные направления. Этот факт позволяет надеяться на то, чтобы не только найти причину такого дрейфа, но и прогнозировать его в будущем.

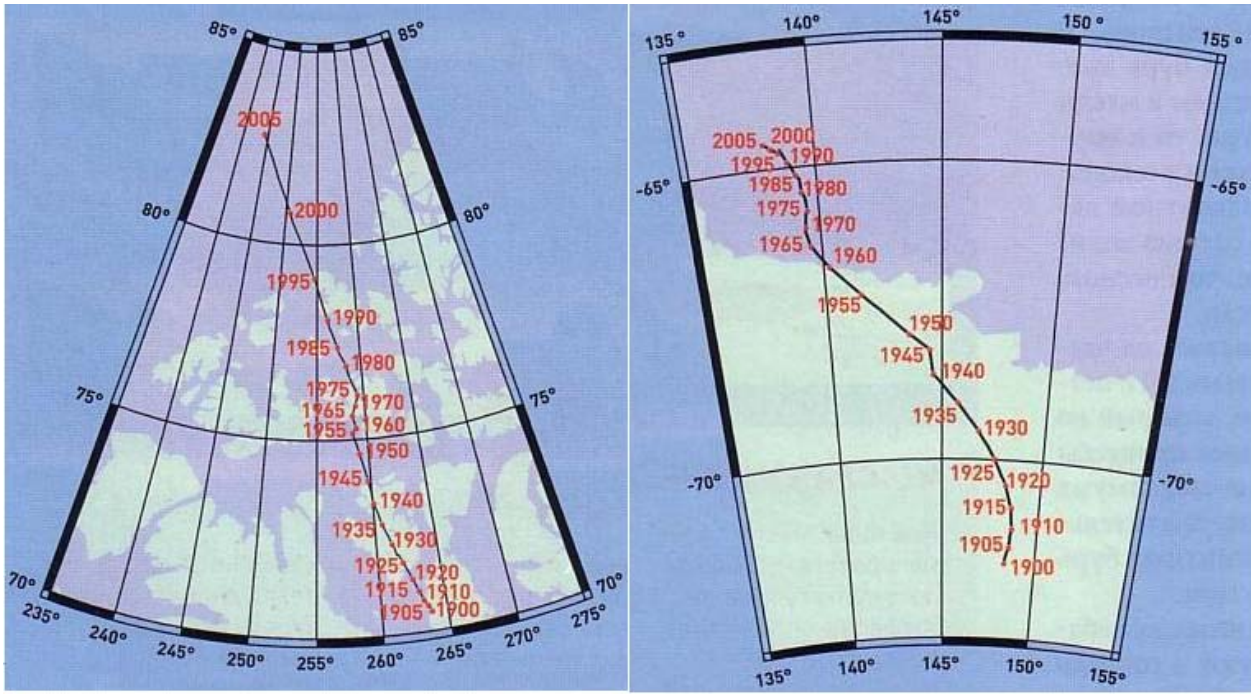


Рис. 14-19. Дрейф северного и южного магнитных полюсов.

Северный магнитный полюс. Инструментальное определение координат положения северного магнитного полюса (СМП) было начато капитаном Россом в 1831 г, когда он оценил координаты СМП: 70° 5’ N и 96° 46’ W. В течение последующих 70 лет измерений положения СМП не проводилось. В 1904 году во время экспедиции Амундсена были определены координаты СМП: 70° 30’ N и 95° 30’ W. Оказалось, что СМП за последующие 70 лет, переместился по направлению к Северному географическому полюсу, в точку, отстоящую от предыдущего измерения всего на 50 км. Этот факт не нашел объясненя.

Этап современных наблюдений положений СМП начинается с измерений, проведенных канадским магнитологом П. Серсоном в 1948 г. С тех пор примерно раз в 10 лет наблюдения за дрейфом СМП ведутся сотрудниками канадской обсерватории Crescent. Измерения положения СМП 1999 г. показали, что скорость дрейфа СМП по сравнению с 1994 г увеличилась в 1.5 раза за последние 5 лет и достигла значения в 26 км/год. Известно сообщение о совместном Natural Resources Canada и Bureau de Recherches Geologiques et Minieres, France определении положения СМП в мае 1999 и, повторно, в мае 2001. Авторы, участники этих экспедиций определили положение СМП и оценили скорость современного дрейфа его выше 40 км/год.

Анализируя эффект увеличения скорости дрейфа СМП, обнаруженный в течение последних 30 лет наблюдений, авторы (Newitt et al., 2002) высказывают предположение, что ускорение полюса каким-то образом связано с явлением Jerk-1969 и следующими за ним джерками. Возможно, авторы правы, и действительно это явление связано с дрейфом полюса и даже оказало какое-то влияние на ускорение его дрейфа, однако, прежде чем обсуждать это предположение, обратимся к данным, характеризующим направление и

скорость дрейфа СМП за значительно больший период времени, чем последние 30 лет его ускорения.

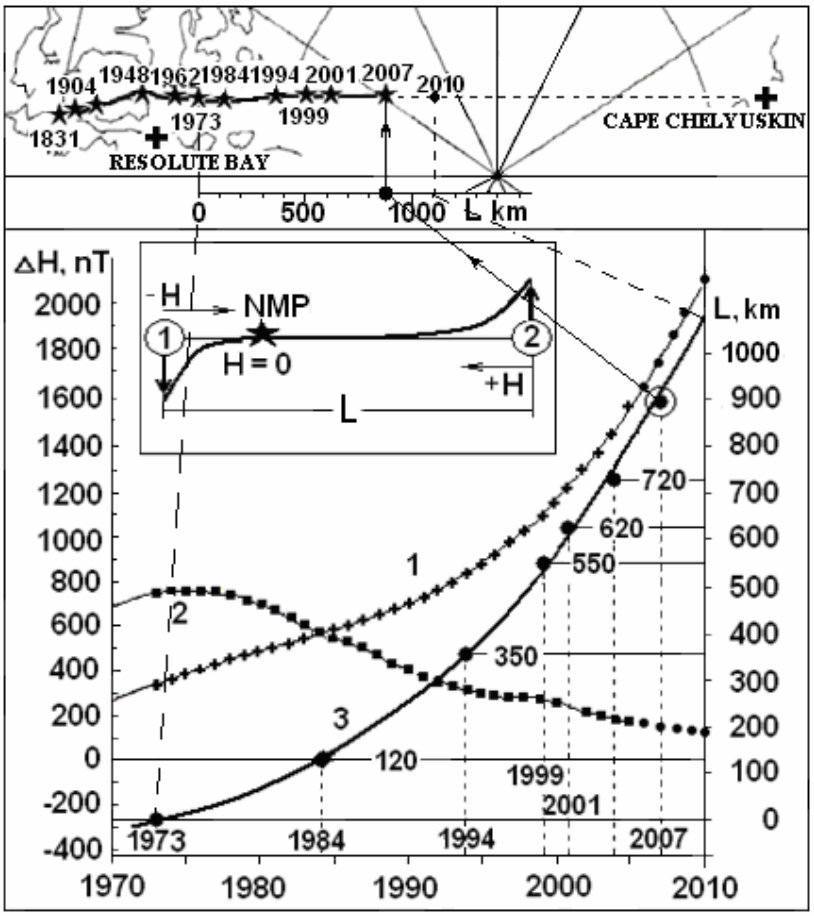


Рис. 14-20. Верхняя панель: Дрейф СМП: звездочки и годы, Крестики – местоположения обсерваторий. Вставка: схема дрейфа СМП. 1 и 2 квазиисточники горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Нижняя панель: Вариации Н-компонент, определенных в обсерваториях Резольют Бей – 1 (крестики) и Мыс Челюскин – 2 (квадраты). Точки – экстраполяция. Кривая 3 – разность величин ΔН между кривыми 1 и 2 (нТл). Точки на кривой – положения СМП на шкале расстояний, в которой за нуль принято положение СМП-1973.

Определение местоположения северного магнитного полюса (СМП), проведенное в 1994 году, показало, что полюс за прошедшие 10 лет не изменил направления своего движения. Этому направлению СМП следует, по крайней мере, 90 лет (см. рис. 20-18). Средняя скорость дрейфа в течение этого периода времени - немного возросла. Она достигла 15 км/год, против 11 км/ год, в предыдущие 11 лет (Newitt, Niblett, 1986; Newitt, Barton, 1996).

Обратим внимание на то, как происходил дрейф СМП в течение последних 100 лет и, особенно, в самое последнее время. Рисунок 14-20 показывает направление дрейфа СМП, которое отмечено звездочками, причем около каждой приведен год измерения его положения. Видно, что СМП дрейфует вдоль линии, практически соединяющей две обсерватории Резольют Бей и Мыс Челюскин. В большем масштабе, эта линия соединяет две глобальных магнитных аномалии, одна из них расположена в Канаде, а другая, - в Сибири (рис. 14-21). Направление дрейфа СМП совпадает с местоположением виртуальных магнитных полюсов (ВМП), определенных во время совместной Канадско-Российской лыжной экспедиции 1988 г. Перед началом этой экспедиции нами был сделан предварительный прогноз положений ВМП. Наш прогноз базировался на известных

измерениях компонент магнитного поля в Арктике (Кузнецов и др., 1990). Вычисленные по прогнозу координаты ВМП практически совпали с координатами, измеренными на значительной части пути экспедиции. Очевидно, что характер дрейфа СМП не случаен. Этот факт оставляет надежду понять природу его дрейфа.

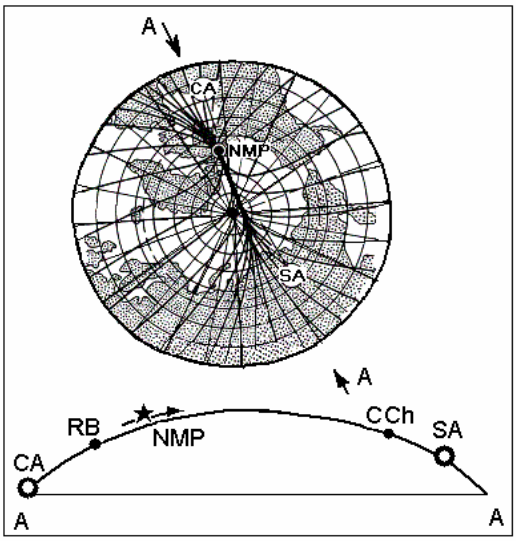


Рис. 14-21. Структура магнитных силовых линий в Арктике (Hope, 1959). На схеме: CA, SA - ГМА, RB, CCh – обсерватории.

ГМА, инверсии, экскурсы, джерки и ФВХ, это “особые точки” геомагнетизма, в которых это явление проявляется наиболее ярко. Мы уже упоминали, что такие “проявления” должны логично “вписываться” в общую концепцию. К таким особым точкам с полной уверенностью можно отнести магнитные полюса и их дрейф. Нельзя сказать, чтобы движение СМП, как и южного магнитного полюса (ЮМП), вызывало бы повышенный интерес у магнитологов. По-видимому, отсутствие интереса оправдывалось тем, что в модели магнитного динамо не существовало ни одной правдоподобной идеи, связанной с дрейфом полюсов. Первым, кто высказал мысль о возможной связи дрейфа СМП с глобальными магнитными аномалиями (ГМА) Канадской (CA) и Сибирской (SA), был канадский магнитолог Р. Хоуп (Hope, 1959). В своей статье он изобразил магнитные силовые линии в Арктике, которые как бы сжимались в районе дрейфа СМП в некий "жгут" (см. рис. 14-21). Хоуп считал, что СМП перемещается по линии, соединяющей обе аномалии. Идеи Хоупа не нашли должного внимания среди магнитологов и были забыты.

Двадцать лет назад автором предложена модель, согласно которой движение СМП определялось влиянием трех (а не двух, как у Хоупа) независимых друг от друга источников магнитного поля (Кузнецов, 1984). Два из них это ГМА, а третий (или точнее, первый) - это источник основного (дипольного) поля Земли. Основное отличие этой модели от общепринятых представлений о магнитном поле Земли заключалось в том, что ГМА представлялись не недипольной частью, как это обычно принято, а достаточно интенсивными источниками, квазинезависимыми от основного поля (Кузнецов, 1990). Интенсивность источников ГМА оказывается сравнимой с интенсивностью источника основного поля. Компьютерное моделирование магнитного поля в Арктике, как суммы независимых источников, дает результат, весьма схожий реальной ситуацией (рис. 20-7).

Разработанная модель позволяет делать прогноз положения СМП в зависимости от интенсивностей источников поля ГМА. При этом полагается, что интенсивность дипольного источника постоянна. На основе этой модели и интерполяции интенсивности магнитного поля в районе ГМА к 1994 году (по данным полярных магнитных обсерваторий) был составлен прогноз местоположения СМП-1994. Прогнозируемое

положение СМП практически совпало с определением его по результатам наблюдений во время экспедиции к СМП в 1994 году (Кузнецов, 1996).

Прогноз положений СМП. Систематические наблюдения за склонением и наклонением начинаются примерно с 1540 года. Наиболее полные данные известны для Лондона на обсерватории в Хартленде (координаты: 51° 00’ N, 355° 31' E), после перевода ее из Гринвича и Абингера. На рисунке 12-9 представлены сглаженные результаты наблюдений за I и D, опубликованные впервые Бауэром для Лондона и Бостона (Bauer, 1895) и впоследствии повторенные в нескольких монографиях по геомагнетизму. Взглянув на этот рисунок, можно видеть, что, по крайней мере, в течение 450 лет наша модель движения СМП не противоречит реально наблюдаемой ситуации. Более того, анализируя результаты наблюдений склонения и наклонения в Лондоне и Бостоне (данные для Бостона, после того как они заканчивались 1900 годом, редуцированы по результатам наблюдений обсерватории в Оттаве), можно получить информацию о том, как в действительности перемещался СМП в течение последних 450 лет.

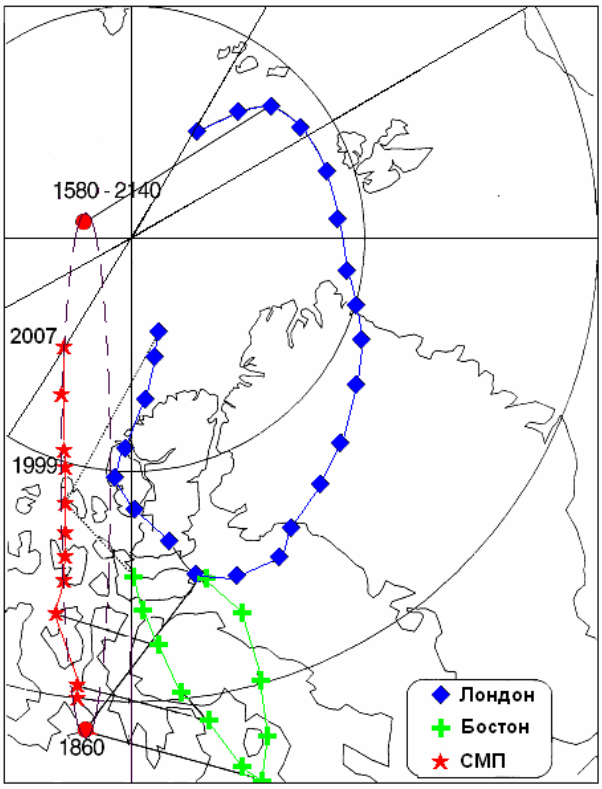


Рис. 14-22. Перемещение СМП и виртуальные магнитные полюса, построенные по данным склонения и наклонения на обсерваториях Лондона и Бостона (Bauer, 1895).

Если бы СМП двигался по эллипсу, как это показано на рисунке 12-9, то вполне возможно, что определение местоположения СМП, сделанное Дж. Россом, было ошибочное, и в действительности СМП в 1831 году находился восточнее примерно на 100 км. Если мы правильно восстановили дрейф СМП за этот период времени, то он перемещался в полном соответствии с нашей моделью. Что же касается возможной ошибки Джеймса Росса, то при существовавшем в то время техническом уровне измерений и отсутствии контроля за временными вариациями магнитного поля, это вполне допустимо. Можно добавить еще один аргумент в пользу того, что Росс ошибся. Анализ данных по магнитному полю в период с 1550 по 1990 г.г. показывает плавный характер его изменения в 1830-1900 гг., что должно было бы быть не так, если бы Росс не ошибся. Действительно, СМП дрейфовал, начиная с 1904 года с более или менее

постоянной скоростью (примерно 10 км/год). В то же время как за 70 с лишним предыдущих лет (1831-1904) он "прошел" всего 50 км. Нам представляется, что наша модель движения СМП, когда он сначала дрейфовал к югу, а затем (в 1860 году) изменил направление дрейфа и стал двигаться к северу, подкрепленная данными по дрейфу ВМП, более логична, чем тот его путь, который изображен на рис. 12-9 и 14-22. Таким образом, дрейф СМП можно представить как периодическое, колебательное движение.

Обратимся к рисунку 14-20, иллюстрирующему нашу модель дрейфа СМП, на которой основан прогноз его местоположений. При обсуждении модели дрейфа магнитных полюсов будем пользоваться нижеследующим определением. Магнитный полюс - условная точка на земной поверхности, в которой равна нулю горизонтальная компонента магнитного поля Земли. Если по какой-то причине в двух точках [1] и [2], где горизонтальные компоненты магнитного поля Земли (H-компоненты) имеют противоположные направления, их величина меняется, - положение точки, где эти величины уравновешивают друг друга ($H = 0$), - меняется. При этом магнитный полюс перемещается между этими точками. Можно ли предсказать, в какой точке окажется магнитный полюс в будущем? По-видимому, можно, если в магнитном поле Земли, по крайней мере, в районе полюса, не наблюдается резких неоднородностей: как пространственных, так и временных (к которым, в частности, относятся и джерки).

Магнитные обсерватории ведут регулярное наблюдение за вариацией величин компонент магнитного поля Земли. Наиболее близки к СМП две обсерватории: Резольют Бей в Канаде и Мыс Челюскин – в России (рис. 14-20). Контролируя величины Н-компонент на этих обсерваториях при условии, что характер их изменения вполне логичен, можно предсказать местоположение СМП в будущем. Этот прием использовался при прогнозе положения СМП в 1994 (Кузнецов, 1996) и в 2007 (показано на рис. 14-18). На нем изображены переменные во времени (1973 – 2010 г.г.) составляющие Н-компонент, измеренные на этих обсерваториях $H_1(t)$ и $H_2(t)$, а также их разность $\Delta H = H_1(t) - H_2(t)$. Вектора Н-компонент на этих обсерваториях направлены навстречу друг другу. К примеру, значения Н-компонент на этих обсерваториях: Резольют-Бей (1989) H_1 = 1041 нТл; Мыс Челюскин (1990) H_2 = 3160 нТл.

Для упрощения модели примем, что в 1984 г. разность между их величинами равна нулю: $H_1 - H_2 = 0$, и в дальнейшем будем рассматривать только переменную часть этих величин. Для удобства представления, разность между переменными составляющими величин Н-компонент (кривая 3): $\Delta H = H_1 - H_2 + k$, где k = - 400 нТл.

Предположим, что путь, проходящий СМП $L(t)$, линейно связан с $\Delta H(t)$: $L(t) \sim \Delta H(t)$. Рассмотрим линейный участок дрейфа СМП (рис. 14-20), примем: $L = 0$, для СМП-1973. Принятые предположения позволяют получить зависимость: $L(t)$(км) – кривая 3 на рис. 14-20-а. В принципе существуют две возможности поведения Н-компонент, регистрируемых на обсерваториях Мыс Челюскин и Резольют Бей. Это либо замедление дрейфа СМП примерно в 2000 и её снижение до нуля в 1580 (рис. 14-22). В этом случае дрейф СМП имеет периодический характер, как это следует из рис 12-9. Если бы, к примеру, величина Н-компоненты в районе обсерватории Мыс Челюскин $H_2(t)$ начнет возрастать, а на обсерватории Резольют Бей $H_1(t)$ – уменьшаться, то, в принципе, может оказаться возможной ситуация, когда скорости увеличения H-компонент на обеих обсерваториях окажутся равными и $\Delta H = 0$. В такой ситуации полюс остановится и может начать двигаться в обратном направлении. Существует вероятность того, что это произойдет именно в точке 2140 (1580). В этом случае дрейф СМП имеет колебательный характер. Если этого не произойдет и $H_2(t)$ будет продолжать уменьшаться, а $H_1(t)$ – возрастать *как это видно из рис. 14-20), СМП может «проскочить» точку 1580 (2140), и устремиться навстречу с ЮМП. В этом случае существует вероятность того, что на Земле началась инверсия, либо очередной экскурс.

Последнее наблюдение на этих обсерваториях известны до 2007 г. Последнее измерения положения СМП производилось группой Л. Ньюитта в мае 2007. Прогноз положения СМП-2007, полученный по анализу данных обсерваторий (120˚W; 84˚10'N) практически совпал с измеренным местоположением полюса (123.44˚W; 84.01˚N). Рисунок 14-20 позволяет оценить, - насколько продвинется полюс к 2010 году: полюс может пойти за три года расстояние в 200 км, скорость дрейфа СМП вырастет до 70 км/год. Очевидно, что, если ситуация не изменится, полюс к 2015 – 2020 гг. пересечет меридиан 180° и перейдет в восточное полушарие. Двигаясь на юг, он может достичь положения ЮМП примерно к 2400 году. *Это означает, что в наше время происходит инверсия, или экскурс.*

О связи между джерками и дрейфом магнитных полюсов. Для выяснения этого вопроса, представим скорость дрейфа магнитного полюса как:

$$V = dL/dt = (dH/dt) / (dH/dL), \qquad (14.18)$$

где dH/dt суммарное изменение величины горизонтальной компоненты геомагнитного поля в районе магнитного полюса. Для СМП и ЮМП эта величина составляет ≈ 40 нТл/год. Пространственные градиенты H-компоненты геомагнитного поля (dH/dL) в районах дрейфа полюсов значительно различаются: dH/dL в районе СМП ≈ 1 нТл/км; в районе ЮМП ≈ 10 нТл/км. Подстановка в (14.18) пространственных и временных градиентов поля H-компоненты (Паркинсон, 1986) показывает их совпадение с измеренными скоростями дрейфа магнитных полюсов. Как отмечалось, современные (2005г.) скорости дрейфа: СМП ≈ 40 км/год, ЮМП ≈ 4 км/год.

Зависимость dY/dt (dD/dt) (Mandea et al., 2000) показывает, что по мере того, как амплитуда dY/dt с течением времени уменьшается, частота проявления джерков (ω - величина обратная интервалу времени между событиями, когда $d^2Y/dt^2 = 0$) – возрастает. Причём это происходит таким образом, что произведение $Y \times \omega$, ($dY/dt \times \omega$) остается примерно постоянным. Подобный процесс можно описать уравнением колебаний с мягкой упругой силой (уравнением для осциллятора с затуханием) (Берже и др. 1991):

$$m(d^2x/dt^2) + \varphi(dx/dt) + f(x) = F \cos \omega t. \qquad (14.19)$$

Первый компонент левой части уравнения (19) характеризует силу инерции. Второй, – силу сопротивления (затухания), третий, - восстанавливающую (упругую) силу. После знака равенства, справа, в уравнении (19) - внешняя, возмущающая сила. Если она равна нулю ($F \cos \omega t = 0$), то уравнение (19) характеризует затухающие колебания. Например, уравнение:

$$m(d^2x/dt^2) + \varphi(dx/dt) + f(x) = 0 \qquad (14.20)$$

описывает движение маятника при наличии сил сопротивления. Не вдаваясь пока в физику джерков и физику генерации геомагнитного поля, вместо (14.20) применим уравнение Ван дер Поля (Уиттекер, Ватсон, 1963):

$$d^2Y/dt^2 - \gamma[1 - Y^2/Y^2_o]\, dY/dt + \omega^2 Y = 0, \qquad (14.21)$$

здесь Y_o – исходная амплитуда, γ - коэффициент затухания, ω - частота, $\omega^2 Y$ – упругая сила. Уравнение (14.21) характеризует поведение осциллятора с вынуждающей силой, в котором колебания с малой амплитудой усиливаются, а колебания с большой амплитудой – затухают. Решение этого уравнения:

$$Y(t) = Y_o \exp(-\gamma t/2) \cos(\omega t + \varphi),$$

при соответствующем подборе коэффициентов может с хорошей точностью описать зависимость dY/dt от времени, полученную из наблюдений. Учет упругой силы в (14.21) соответствует экспериментально наблюдаемой зависимости: $\omega^2 \sim 1/Y$.

В рассматриваемом случае фазовый портрет уравнения (14.21) соответствует сходящейся спирали: $\gamma > 0$. Механическим эквивалентом такой системы может быть модель, в которой шарик совершает колебательные движения в сферическом объеме, в нижней части которого имеется отверстие, размером чуть больше диаметра шарика. Когда

шарик приходит в равновесие и успокаивается (dY/dt = 0), он проваливается в дырку (происходит бифуркация) и попадает в другой объем, аналогичный первому и т.д. Процесс повторяется при условии несовместимости отверстий этих объёмов. Шарик, попадая в нижний объем, теряет часть своей потенциальной энергии.

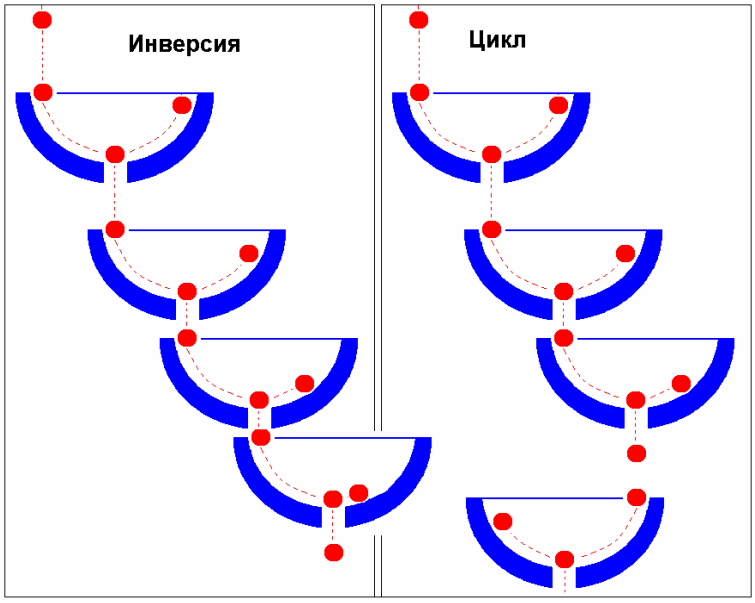


Рис. 14-23. Механическая модель изменения частоты джерков со временем (рис. 14-18).

Рассмотрим процесс возникновения джерков в контексте поведения геомагнитного поля в момент времени, предшествующий инверсии. Можно ли связать частоту образования джерков с бифуркацией, возникающей после установления в системе неустойчивого равновесия, с одной стороны. И, с другой, - попытаться выявить феноменологию экспериментально наблюдаемой связи увеличения скорости дрейфа СМП и увеличения частоты джерков ω: $V \sim dH/dt \sim \omega$. Как следует из наших рассуждений, $\omega^2 \sim 1/Y$, однако, если скорость V однозначно (по модели) связана с dH/dt, то в геомагнетизме связь между dH/dt и dY/dt неоднозначна, следовательно, нет и прямой связи между V и ω.

Зададимся вопросом, как долго может продолжаться ускорение СМП в случае инверсии? Скорость дрейфа магнитного полюса: $V = dL/dt$, где $L = k\,t^2$, или $V \sim t$, т.е. скорость дрейфа СМП, согласно (14-20), будет и дальше возрастать со временем. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока градиент dH/dL будет оставаться малым, что характерно для полярной области. Как только градиент dH/dL возрастет, а именно так и должно произойти по мере приближения СМП к одной из магнитных аномалий, скорость СМП – уменьшится (т.к. $V \sim dL/dH$).

Предварительное обсуждение. Автор комментария (Campbell, 2003) к работам (Newitt et al. 2002; Barton, 2002) ставит под сомнение целесообразность самой идеи регистрации дрейфа магнитных полюсов. В качестве аргумента он приводит математическую модель описания геомагнитного поля в виде диполя, смещенного относительно центра Земли. По мнению автора, в такой ситуации вертикальность вектора поля и равенство нулю горизонтальной компоненты, ничего не означает, а является лишь следствием смещения оси генерации поля относительно оси вращения Земли. Авторы (Barton, Newitt, 2003) возражают против такого подхода, объясняя Кэмбеллу (Campbell, 2003) то, что реальная физическая модель геомагнитного поля не может быть подменена математической моделью. Предлагаемый Кэмбеллом пример математического описания поля далеко не единственный. Например, можно сослаться на цикл работ Олдрижда (Alldridge, 1987), в которых он описывает геомагнитное поле не путем разложения его в спектр, как Кэмбелл,

а путем подбора неограниченного количества радиальных диполей. В этом случае, как и в первом, математическая модель ни в коей мере не объясняет природу реального геомагнитного поля. Как известно, в любой реальной модели генерации геомагнитного поля само магнитное поле является следствием протекания электрического тока (или перемещения проводящей жидкости с вмороженным в неё магнитным полем) по проводящему токовому кольцу. В этом плане идеи Олдрижда значительно ближе, по сути, к физической модели геомагнитного поля, чем разложение поля в ряд Гаусса.

Олдридж путем оптимизации расположения токовых колец пришел к заключению, что их самое оптимальное положение соответствует границе внутреннего ядра (глава 12). Этот вывод согласуется с идеей генерации геомагнитного поля на границе внутреннего ядра (в F–слое), следующее из нашей модели горячей Земли. В этой модели дипольный источник представляет собой дифференциальное токовое кольцо, латеральные неоднородности которого точно соответствуют выявленной латеральной анизотропии внутреннего ядра. Заметим, что результаты исследования анизотропии внутреннего ядра опровергают возможность размещения реального источника поля в виде смещенного диполя.

Дрейф магнитных полюсов (направление и скорость дрейфа) - является одной из важнейших характеристик геомагнетизма. Это тем более важно, что направления дрейфа и скорости палеомагнитных полюсов в периоды спокойного поля (Tarling, Abdeldayem, 1996) существенно различаются по сравнению с направлениями и скоростями современных магнитных полюсов.

Мы отмечали выше, что важную роль в движении полюсов в момент инверсии играют ГМА. Эти аномалии в гидродинамической модели, являясь вихрями Россби, они переносят тепло в F-слое между внутренним и внешним ядром, где, согласно модели, происходят фазовые переходы первого рода. Температура фазового перехода при заданном давлении величина постоянная, а термодинамическая система стремится поддержать её на заданном уровне. Если принять эту идею, то оказывается, что явления, - получившие в геомагнетизме название джерки, представляют собой маркированные магнитным полем вариации температуры при релаксации системы к температуре фазового перехода. Увеличение частоты джерков и уменьшение их амплитуды означает выход системы на неустойчивую асимптоту, при которой происходит смена режима – бифуркация. В такой модели ускорение полюсов и увеличение частоты джерков может характеризовать, том числе и начало инверсии, или очередного экскурса. Однако имеющиеся в нашем распоряжении данные по джеркам и дрейфу магнитных полюсов не дают оснований для того, чтобы определенно ответить, началась ли в настоящее время инверсия или нет.

Южный магнитный полюс. Модель дрейфа южного магнитного полюса (ЮМП) аналогична модели дрейфа СМП. Как и раньше, рассматриваемые в модели источники будем представлять диполями. Допустим, что мы имеем два диполя интенсивностью A и B, находящихся на расстоянии x (в географических градусах) один от другого. Наша задача состоит в том, чтобы найти расстояние k (внутри отрезка x), показывающее положение МП. Условие равенства нулю горизонтальных компонент источников можно записать в следующем виде (Кузнецов, 1998-б):

$$A \cos(\pi/2 + k) + B \cos\{\pi/2 + (x - k)\} = 0. \qquad (14.22)$$

Решение уравнения (20.22): $c\ tg\ k = (A/B + \cos x)/\sin x$. Если: $A = B$, то: $k = x/2$; если $A = 0$, то: $k = x$; если $B = 0$, то: $k = 0$. Так как $x << \pi/2$ (т.е. источники расположены один относительно другого ближе, чем 90 географических градусов), то для представления наших функций вместо тригонометрических кривых можно использовать наклонные прямые, пересекающие горизонтальную ось в точках расположения источников A и B. Представим себе, что источник A соответствует аномалии, а B - дипольному основному

полю. Если их интенсивности равны, то местоположение МП: $k = x/2$. Допустим, что A не меняется со временем, а B - уменьшается. Уменьшение интенсивности источника дипольного поля вызовет смещение МП влево. В точках 1, А и 2, в результате этого уменьшения, H-компонента поля уменьшится. Уменьшится она и в точке 5, а в точках 3 и 4 - увеличится. В точке В, как следует из нашей схемы, величина H-компоненты останется без изменения. Допустим, что ЮМП действительно дрейфует в направлении от дипольного источника (интенсивность которого, как известно, убывает со скоростью 5% за 100 лет), к глобальной магнитной Антарктической (Южной) аномалии. Тогда, в этом регионе должна наблюдаться выявленная нами особенность: уменьшение величины H-компоненты "левее" и "правее" МП, увеличение ее в области, примыкающей к МП и отсутствие вариации H-компоненты в районе положения дипольного, основного поля.

С целью проверки этого предположения, были исследованы временные зависимости H-компонент на 16 магнитных обсерваториях, расположенных в Австралии, Новой Зеландии, Антарктиде и на островах, ближайших к этим материкам, приведенные в (Головков и др. 1993). Перечень обсерваторий, их географические координаты и характер зависимости величины H-компоненты: ↑ - возрастает, ↓ - убывает, о - не меняется, представлены в Таблице 4. Рисунок 14-25 показывает пространственное распределение характера изменения величины H-компоненты поля. Проецируя данные обсерваторий на 140° E меридиан, легко видеть, что область, в которой H-компонента возрастает, соответствует примерно 65° - 85° S. В районе 85° - 90° S величина H-компоненты поля постоянна. В других районах: < 65° и > 90° (см. рис. 14-25) - поле уменьшается. Замеченная особенность поведения H-компоненты поля в пространстве и во времени подтверждает нашу модель. (Знак "> 90°" надо понимать условно, т.к. широты, большей чем 90°, - быть не может).

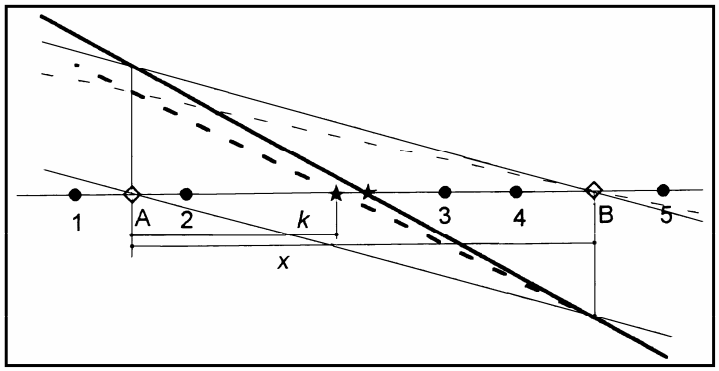


Рис. 14-24. Схема дрейфа южного магнитного полюса (ЮМП). H-компоненты поля изображены прямыми. А и В – источники поля, 1 – 5 – точки наблюдений. Звездочка – ЮМП.

Таблица 4

		Lat. 00° 00'	Long. 000° 00'	↑ o ↓
1	Toolangi	37 32	145 28	↓
2	Gnangara	31 47	115 57	↓
3	Amberli	43 09	172 43	↓
4	Macquarie	54 30	158 57	↓
5	Dumont d'Urville	66 40	140 00	↓
6	Мирный	66 33	93 01	↑
7	Scott Base	77 51	166 47	↑
8	Восток	78 27	106 52	↑

9	Casey	66 17	110 32	↑
10	South Pole	90 00	346 41	↑
11	Orcadas	60 44	315 13	↓
12	Argentine Island	65 15	295 45	↓
13	Syowa Base	69 02	39 36	o
14	Sanae	70 19	357 40	↓
15	Hallett Station	72 18	170 14	↑
16	Byrd Station	79 59	240 00	↑

Как следует из рис. 14-26-а, координаты ЮМП надежно измерены начиная примерно с 1965 г. Известно, что полюс находился непосредственно в районе обсерватории Dumont d'Urville в 1959 г., когда X-компонента была равна нулю. Можно ли сказать что-либо определенное о траектории дрейфа ЮМП раньше (до 1959г). Насколько она соответствует нашей модели? Находился ли ЮМП в 1909 г действительно там, где он был определен Маусоном? Знание данных австралийских обсерваторий и особенно, обсерватории Toolangi, начавшей работать примерно в 1860 г, позволяет ответить на эти вопросы. Для этого воспользуемся данными обсерваторий (с 1 по 9 из Таблицы 4) для оценки поведения во времени виртуальных магнитных полюсов (ВМП).

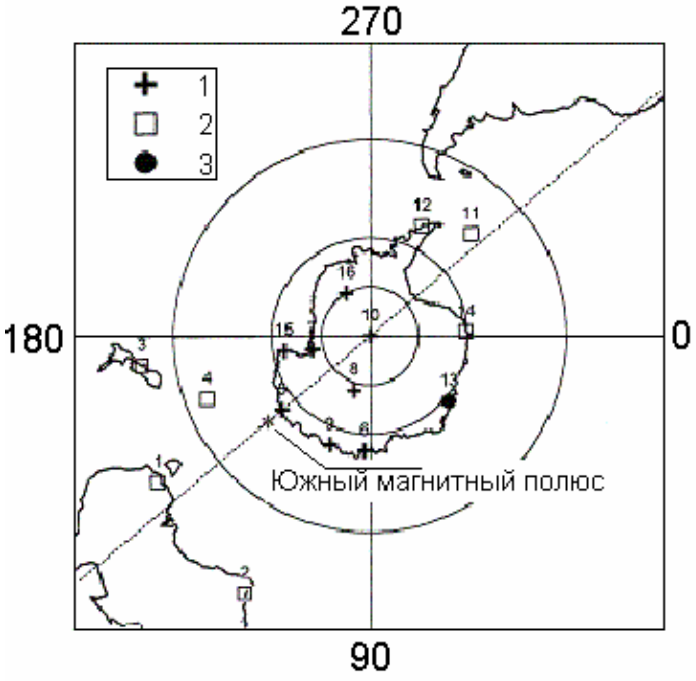


Рис. 14-25. Расположение магнитных обсерваторий в районе ЮМП, 1 – в которых *H*-компонента поля возрастает со временем, 2 – убывает, 3 – не меняется.

Изменение координат ВМП в течение периода работы обсерваторий изображено на рисунке20-25. Здесь же приведен дрейф ЮМП с 1965 по 1990 г.г. Из рис. 14-27 видно, что и ВМП, и ЮМП движутся вдоль меридианов на север. На рисунке отдельной звездочкой с координатами 72° S и 155° E изображено положение ЮМП определенное в 1909 во время экспедиции Шеклтона (Маусон). Из рисунка видно, что виртуальные полюса явно группируются в две области. Одна, тяготеющая к 120°-меридиану, принадлежит к обсерваториям Новой Зеландии и Австралии (1-4 на рисунке и в таблице 4). Другая группа ВМП, расположенная вблизи 150°-меридиана, показывает ВМП обсерваторий Антарктиды (9 табл. 4). Виртуальные полюса, определенные по данным обсерватории Дюмон д'Юрвиль, располагаются вблизи ЮМП.

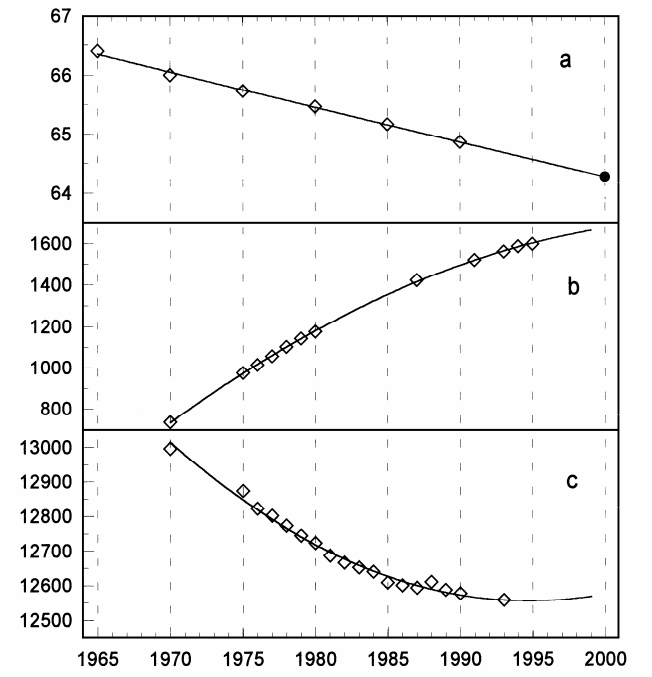


Рис. 14-26. Прогноз положения широты ЮМП - **a**, изменение во времени интенсивности *H*-компоненты на обсерваториях Dumont d'Urville - **b** и Macquarie - **c**, показывают плавный ход этого параметра.

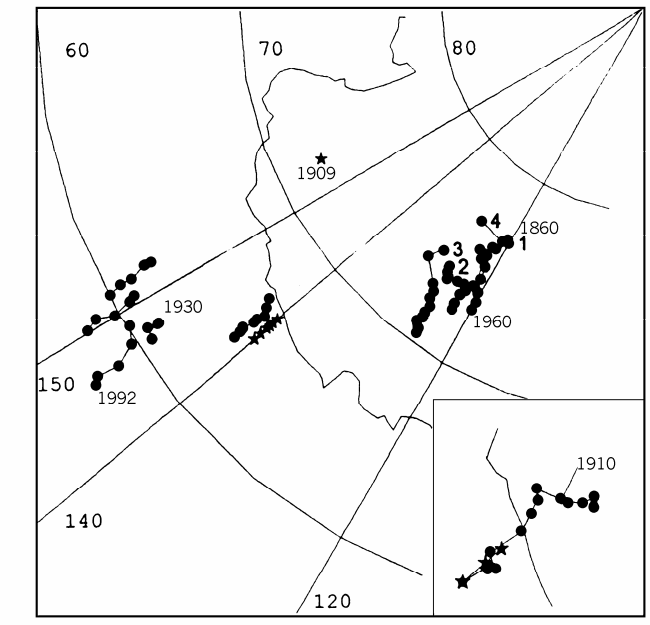


Рис. 14-27. Изменение координат ЮМП (с 1965 по 1990 г.г.) и ВМП в течение периода работы обсерваторий (1-9 на рис. и в табл. 4). Звездочка с координатами 72° S и 155° E - положение ЮМП, определенное в 1909 г. во время экспедиции Шеклтона.

Рисунок 14-27 демонстрирует, что ЮМП находится примерно посередине между этими областями, отстоя от каждой на 8.5°. Из анализа характера движения австралийских и новозеландских ВМП следует, что примерно в 1920 произошло изменение направления движения ЮМП. Южный полюс отклонился от первоначального направления дрейфа к востоку на 2-3 градуса, а затем вернулся к прежнему, северному направлению дрейфа вдоль меридиана.

Хорошее совпадение между направлением и величинами скоростей дрейфа ЮМП и ВМП дает основание путем простого геометрического преобразования получить возможный путь дрейфа ЮМП (см. вставку внизу на рис. 14-27) начиная с 1860 года (года начала работы обсерватории Туланги). Такое "восстановление" пути дрейфа ЮМП представляется автору вполне обоснованным. Однако в этом случае оказывается, что измерение положения ЮМП, выполненное участниками экспедиции Э. Шеклтона в 1909 (отдельная звездочка на рисунке) году, отстоит от определенного нами положения ЮМП в 1910 г. примерно на 500 км. Могли ли авторы этого определения так ошибиться? В пользу этого и справедливости нашей оценки, приведем еще один достаточно важный на наш взгляд аргумент. Если бы южный магнитный полюс действительно находился в 1909 году там, где его обнаружил профессор Моусон, то скорость его дрейфа за 50 лет (с 1909 по 1960) была бы не 6 км/год (как сейчас), а примерно в 2 - 3 раза быстрее. Такое "ускорение" движения ЮМП обязательно нашло бы отражение в данных магнитных обсерваторий Австралии и Новой Зеландии, чего реально не наблюдается.

Картина дрейфа ЮМП, отличающаяся от нашей, представлена в работе (Barton et al., 1986), где авторы пытаются совместить данные по современному дрейфу ЮМП с прошлыми измерениями. Подобная картина дрейфа ЮМП приведена в работе (Dawson, Newitt; 1982).

Попытаемся восстановить характер дрейфа ЮМП, по крайней мере, за последние 100 лет. Воспользуемся для этого данными обсерватории Туланги и предположим, что изменение величины *H*-компоненты прямо связано с величиной и направлением скорости дрейфа ЮМП ($v_{др} \sim dH/dt$). Известно, что в 1860 г. скорость дрейфа полюса уменьшалась до нуля, а в 1920-30 г.г. она даже меняла знак. Эти факты не противоречат нашей модели, наоборот, находят в ней простое объяснение. Для этого достаточно того, чтобы по какой-либо причине изменился характер вариации величины одного (или обеих) источников поля: аномалии, либо основного поля. Ход зависимости скорости дрейфа ЮМП показывает, что наша оценка местоположения ЮМП-99, сделанная выше, правильна. По-видимому, Бартон и Ньюитт, восстанавливая картину дрейфа ЮМП, были не совсем точны.

В заключение оценим географическое положение источников: дипольного (ДИ) и ГМА. Очевидно, что они близки к 140° E-меридиану. Из нашей модели следует, что ДИ должен находиться в области, где H-компонента не меняется. Это происходит примерно на 85° - 90° S. “Выберем” координату ДИ = 85° S. Как оценить положение источника ГМА? Воспользуемся правилом, согласно которому магнитное поле двух источников выглядит как от одного, если их интенсивности различаются меньше чем в 0.67, а их эпицентры отстоят друг от друга меньше чем на 40° (Knapp, 1955).

Аномалия “Южный полюс” обычно представляется как следствие одного источника - ДИ. По нашей модели она “обязана” аддитивному сложению интенсивностей двух источников: ДИ и ГМА. Согласно модели, интенсивности обеих источников соизмеримы. Все это дает основание предположить, что расстояние между ними может оказаться порядка 35° (т. е. < 40°). В этом случае положение источника ГМА будет соответствовать примерно 50° S. В настоящее время ЮМП дрейфует в районе 65°. Это может говорить, в рамках наших предположений и оценок, о том, что интенсивности ДИ/ГМА соотносятся как 0.75 или, примерно, 30 и 37 мкТл, соответственно.

Дрейф полюсов в момент инверсии. Как мы отмечали выше, полюса дрейфуют в момент инверсии по вполне определенным траекториям. Выяснилось, что в момент инверсии виртуальные геомагнитные полюса (ВГП) движутся не по случайным траекториям, а совсем наоборот, направления их дрейфа вполне однозначны. Выделяются всего две трассы дрейфа ВГП. Одна из них “проходит” через Центральную Азию и

Австралию, другая, через обе Америки (см. рис. 14-28). Обе трассы сравнительно близки к 90°-меридиану в западном и восточном полушариях (Constable, 1992). Многие работы посвящены исследованиям направлений дрейфа ВГП: (Clement, 1991; Tric et al. 1991; Koci, 1990; Gubbins, Coe, 1993; Gubbins, 1993; Gubbins, Sarson, 1994; Jackson, 1992; McFadden, 1992; McFadden et al., 1993; Hollerbach, Jones, 1993; Constable, 1993). В других рассматриваются возможные модели дрейфа, естественно, исходя из концепции динамо механизма генерации магнитного поля Земли: (Gubbins, Coe, 1993; Gubbins, 1993; Jackson, 1992; McFadden, 1992; McFadden et al., 1993; Hollerbach, Jones, 1993). Поток статей на эту тему не прекращается и количество предлагаемых моделей возрастает. Недавно вышла в свет вторая редакция книги (Jacobs, 1994), целиком посвященной этой проблеме. Это означает только то, что проблема интересует научное сообщество и не находит пока "разумного" решения. Коснемся этой проблемы чуть подробнее.

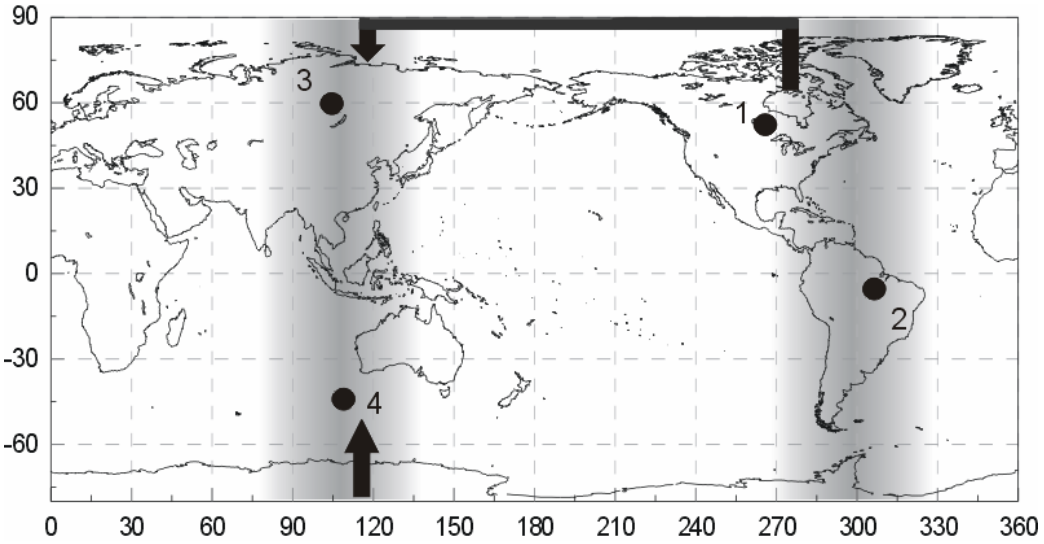


Рис. 14-28. Пути дрейфа магнитного полюса во время инверсий (Constable, 1992; Kuznetsov, 1999), 1-4 ГМА.

Клемент показал, что распределение трасс ВГП по земному шару в момент смены полярности МПЗ между эпохами Matuyama-Brunhes (Clement, 1991) обладает определенной симметрией. Автор обнаружил, что ВГП разбросаны по всему земному шару, однако, наибольшее количество их определений в момент инверсии Matuyama-Brunhes приходится на "полосу" 60° W ± 30°, при этом антиподальная часть ВГП занимает "коридор" вдоль 110° E (± 30°). В работе (Tric et al. 1991) изучалось распределение траекторий дрейфа ВГП в течение инверсии Upper-Olduvai. Авторы выделили два случая смены полярности МПЗ с обратной на нормальную (R → N) и при обратной перемене (N → R). ВГП двигались только по Американским континентам. Авторы полагают, что ВГП в данном случае "предпочитали" Америку по сравнению с Азией и Австралией. Автор (Koci, 1990) зафиксировал интересную особенность дрейфа ВГП в момент инверсии, происходящей после экскурса Jaramillo. Виртуальный полюс дрейфовал из южного полушария в северное от 90°S до 20°S, затем его "трасса" прервалась и ВГП "обнаружился" в северном полушарии на широте 40°N и дальше двигался к северу вдоль 90°E-меридиана. Ряд авторов (Clement, 1991; Tric et al. 1991; Gubbins, Coe, 1993) полагают, что ВГП в момент (N → R) дрейфуют по Азии-Австралии, а в момент (R → N) вдоль Американских континентов.

Проблема дрейфа ВГП в момент инверсии рассматривалась в статьях (Fuller et al., 1996; Mc Fadden, Merrill, 1995; Gubbins, Sarson, 1994), опубликованных в самое последнее время. Авторы этих работ, анализируя все предшествующие попытки (основанные на

использовании модели магнитного динамо) найти объяснение особенностям дрейфа ВГП, приходят к заключению, что пока это явление все еще остается загадочным (Fuller et al., 1996). Рассмотрим, как эта проблема решается в рамках нашей модели дрейфа магнитных полюсов.

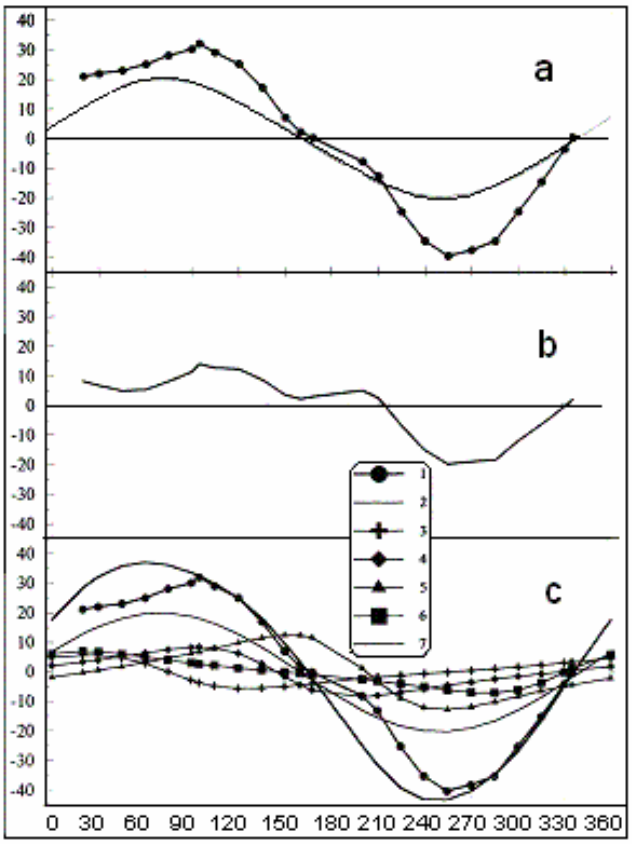


Рис. 14-29. (a) H-компонента геомагнитного поля вдоль 90° меридиана. Синусоида, смещенная на запад на 20°. Разность между этими кривыми -(b). Кривые, показывающие изменение интенсивности источников поля (c): 1) H-компонента геомагнитного поля, 2) дипольная компонента поля, 3), 4), 5), 6) - Бразильская, Канадская, Сибирская и Антарктическая ГМА (соответственно), 7) - сумма источников: дипольного и 4-х ГМА (Kuznetsov, 1999).

В первом приближении МПЗ дипольно. Магнитные силовые линии “выходят” из ЮМП и “входят” в СМП. Будем считать, что в нашей двумерной модели величина поля вдоль силовой магнитной линии положительна, если линия направлена по часовой стрелке и отрицательна, если - против. Совместим (Kuznetsov, 1999) начало отсчета двумерного поля (0°) с южным географическим полюсом, тогда на северном будет 180° и т.д. Если бы географические и магнитные полюса совпадали, то МПЗ представляло бы собой синусоиду с началом на ЮМП. Это не как, и поэтому “магнитная” синусоида сдвинута примерно на 20°. Реальное магнитное поле значительно отличается от идеализированного. Рисунок 14-29-a показывает распределение интенсивности H-компоненты МПЗ вдоль 90°-меридиана в восточном и западном полушариях. Здесь же проведена «сдвинутая» синусоида, которая обозначает собой дипольную часть МПЗ. Рисунок 14-29-b показывает недипольную часть МПЗ. Как следует из нашей модели, недипольная часть поля определяется наличием источников поля ГМА, поэтому, задача сводится к представлению недипольной части МПЗ, как суммы полей источников аномалий. Рисунок 14-29-c демонстрирует такую возможность.

Обозначим источники: A для основного (дипольного) поля, B - поля Бразильской аномалии, C - Канадской, D - Сибирской и E - поля Антарктической аномалии. Полагаем, что все аномалии размещаются на одном меридиане. Начало координат относим к

Южному полюсу. Как известно, эпицентр Бразильской аномалии располагается на широте 15° S. В наших координатах это соответствует: $x_1 = 75°$, для Канадской аномалии (C) $x_2 = 145°$, для Сибирской (D) $x_3 = 203°$, и, наконец, Антарктическая (E) находится на координате $x_4 = 330°$. Дипольный источник (A) несколько смещен относительно географического нуля и соответствует 340° ($x_o = -20°$). Углы α, при которых H-компоненты МПЗ равны нулю (H = 0), определяют положения магнитных полюсов. В нашей системе координат: $\alpha_1 = 168°$ для Северного магнитного полюса и $\alpha_2 = 335°$ для Южного.

Запишем уравнение для H-компоненты МПЗ, как суммы дипольного источника и источников четырех аномалий:

$$H = A \sin(\alpha + x_o) - B \sin(\alpha - x_1) k_1 - C \sin(\alpha - x_2) k_2 - D \sin(\alpha - x_3) k_3 - E \sin(\alpha - x_4) k_4, \quad (14\text{-}23)$$

здесь $k_i = [1 - 0.2 \cos(\alpha - k_i)]/[1 - 0.4\cos(\alpha - k_i)]^{5/2}$, ($i$ = 1, 2, 3, 4).

Приравнивая нулю выражение (23), получаем два решения, определяющие положения магнитных полюсов α_1 и α_2.

Сумма кривых, описывающих интенсивность H-компоненты МПЗ, наилучшим образом совпадает с наблюдаемым распределением горизонтальной компоненты МПЗ вдоль 90-градусного меридиана, если интенсивности источников присвоить значения: A = 20 мкТл, B = 4 мкТл, C = 6 мкТл, D = 9 мкТл и E = 4 мкТл. Эта ситуация отражена на рис. 6-27-с. Заметные расхождения между экспериментальной и расчетной кривыми наблюдаются на углах 30-90° и 180-240°

Обсуждение модели дрейфа в момент инверсии. Ключевая идея нашей модели заключается в том, что в момент, когда A = 0, МПЗ равно суммарному полю ГМА, а МП должен указывать на эпицентр ближайшей глобальной магнитной аномалии. Действительно, как показано в (Petrova, 1990), виртуальные полюса, зарегистрированные в Сибири в период инверсии Matuama-Brunhes, ориентированы на глобальную магнитную аномалию. Этот факт подтверждает справедливость нашей модели, из которой следует, что в момент, когда A = 0, СМП мог бы находиться либо в точке с координатой 160° (КМА), либо 210°. ЮМП в этот момент находился в точке 330°, т.е. тоже в области влияния АМА. Этот рисунок показывает, что в этот момент (A = 0) МПЗ может иметь два МП в районах северных ГМА.

Момент времени, в течение которого сохраняется A = 0, по-видимому, не столь велик, и весь предшествующий ему период, когда $A \rightarrow 0$, не оказывал существенного влияния на дрейф МП. Собственно смена положений полюсов начинается в тот момент, когда начинается увеличение A обратного знака (- A). Рис. 14-30 демонстрирует “картину” дрейфа полюсов, следующую из нашей модели. Здесь величина A постепенно увеличивает свое значение от - 10 до - 30 мкТл. Появление даже небольшой по величине (порядка 10 мкТл) дипольной части МПЗ обратного знака, однозначно “устанавливает” наличие всего двух МП (см. рис. 14-30-а).

Положение (на нашей шкале) СМП соответствует 180°, а ЮМП 330°. Дальнейшее возрастание A приводит не только к тому, что МП начинают перемещаться в пространстве, но и к возникновению новых МП (A = - 15 мкТл, рис. 14-30-б). Этот рисунок фиксирует факт “рождения” (угол примерно 90°) пары “новых” полюсов. При дальнейшем увеличении A, “новые” полюса начинают “разъезжаться”, в то время как “прежние” МП сближаются (рис. 14-30-в, A = -20 мкТл). Магнитное поле в этом случае становится квадрупольным. (Обратим внимание на то, что возможность проявления квадрупольного характера магнитного поля Земли в момент инверсии была отмечена в работе (Fuller et al., 1996), где, правда, не было объяснено, каким образом могла бы

возникнуть подобная структура поля). Два “прежних” полюса продолжают сближаться и, в конечном счете, взаимно уничтожаются - аннигилируют (см. рис. 14-30-г, где A = - 23 мкТл, угол аннигиляции ≈ 240°). На рис. 14-30-д величина дипольной компоненты достигает A = - 30 мкТл, магнитное поле приобретает явно выраженный дипольный характер, при этом магнитные полюса занимают положения: ЮМП ≈ 0° и СМП ≈ 150°.

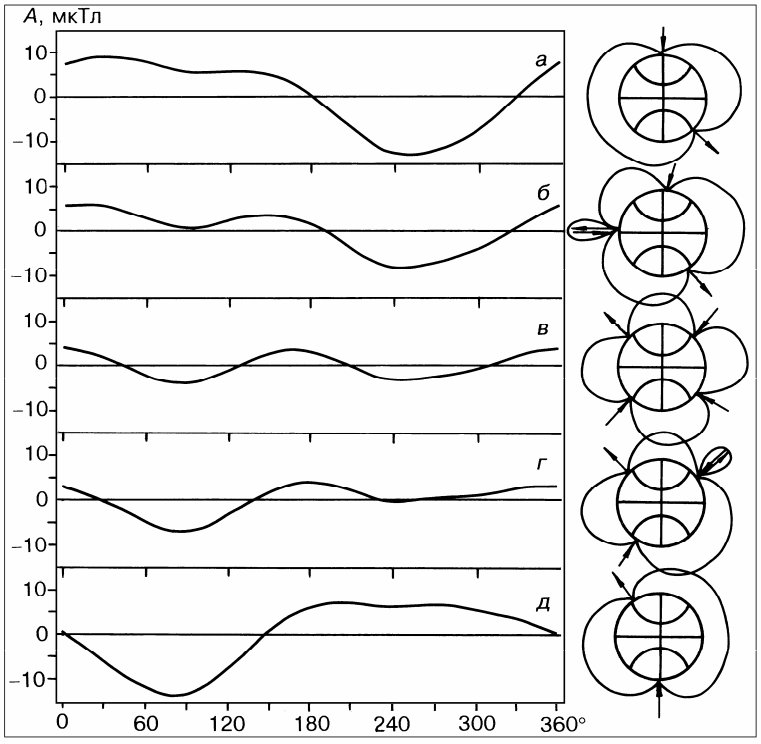


Рис. 14-30. Схема дрейфа полюсов. Величина A увеличивает свое значение от - 10 до - 30 мкТл: а) A = - 10 мкТл; б) A = - 15 мкТл; в) A = - 20 мкТл; г) A = - 23 мкТл; д) A = - 30 мкТл (Kuznetsov, 1999).

В нашей модели ВГП перемещаются по обоим полушариям. Наличие такого явления, как взаимное уничтожение полюсов объясняет “загадочное” исчезновение ВГП в процессе его дрейфа. Здесь рассмотрен только один тип инверсии: N $\rightarrow$ R. Модель базируется на использовании “остаточного” поля присущего ГМА. Мы не можем проверить, каким будет поле аномалий при обратной полярности дипольной части МПЗ. Поэтому, модель не в состоянии так же подробно рассмотреть движение ВГП в обратном направлении. В этой связи, модель не может ответить на вопрос: всегда ли дрейф полюсов занимает оба полушария, или есть ситуация, когда полюса меняются местами только по трассе, в одном полушарии?

Необходимо затронуть еще один момент в модели, касающийся не совсем удовлетворительной подгонки суммарного поля ГМА к реальному полю Земли на углах 30° - 90° и 180° - 240° (рис. 14-29-с). Заметим, что в первом случае, это область влияния БМА, во втором - СМА. Возможная причина состоит в том, что мы, в модели, использовали представление ГМА как радиального диполя. Если представить аномалию в виде наклоненного диполя, можно подогнать поле с лучшей точностью. Однако это не должно принципиально изменить ни нашей модели, ни приведенных выше результатов.

Возникает вопрос: как часто в истории Земли повторялось это явление? Оказывается, все инверсии и экскурсы, которые происходили в течение, по крайней мере,

последних 12 млн. лет обладают этой особенностью - полюса дрейфуют по траекториям вдоль 90° - меридианов. О чем это может говорить:
- о том, что структура магнитного поля примерно совпадает с современной морфологией поля;
- магнитные аномалии, это очень "долгоживущие" образования;
- наша модель влияния ГМА на движение магнитных полюсов справедлива, по крайней мере, в течение последних 12 млн. лет.

20. 5. Обсуждение модели.

Предложенную идею генерации магнитного поля Земли можно рассматривать как некоторую попытку разработки модели, альтернативной магнитному динамо. Основная идея состоит в согласовании модели генерации МПЗ с моделью "горячей" Земли, с одной стороны, а с другой, в согласовании между собой в одной непротиворечивой модели самых различных сторон явлений, связанных с геомагнетизмом и магнетизмом других планет. В этой модели была сделана попытка, рассмотреть в едином контексте такие явления как: генерация основного поля и его инверсии; наличие магнитных аномалий, джерков и фокусов векового хода, движение магнитных полюсов в наше время и в геологическом прошлом.

В модели, по мнению автора, удачно решены некоторые вопросы:
- Наличие фазового перехода в F-слое определяет источник энергии теплового потока, движений материков и плит, магнитного поля Земли.
- Смена режима работы фазового перехода автоматически приводит к изменению геодинамического режима Земли и перемене полярности (инверсии) ее магнитного поля.
- Суточное вращение разделенных на толщину F-слоя электрических зарядов, образовавшихся при фазовом переходе, обеспечивает появление "затравочного" магнитного поля B_o, которое, усиливаясь, преобразуется в МПЗ.
- Полярность электрического поля E_R изменяется с изменением режима работы фазового перехода. Это приводит с смене направления магнитного поля B_o и смене полярности МПЗ.
- Постоянство магнитного поля Земли во времени определяется в модели постоянством pT-параметров в области фазового перехода, которые являются достаточно стабильными.
- Относительная независимость от основного поля Земли источника магнитного поля ГМА. Модель, в которой реализуется независимое изменение поля ГМА, позволила найти объяснение современному дрейфу магнитных полюсов и их дрейфу в геологическом прошлом.
- Представление ФВХ как гидродинамические вихри Россби, у которых западный дрейф определяется кориолисовыми силами, позволило найти простое объяснение западному дрейфу не применяя идеи «прокручивания» ядра относительно мантии, как в модели холодной Земли.
- Модель джерков, как результат изменения режима авторегулирования температуры в области генерации ГМА хорошо «вписалась» в термодинамику горячей модели. Явление джерков широко дискутируется в литературе, причем даже существует точка зрения, что это скорее магнитосферные процессы.
- Модель открывает путь к объяснению особенностей магнитных полей планет, Луны и спутников больших планет.

Возникает вопрос о том, имеются ли какие-нибудь особенности на Земле, которые можно истолковать в поддержку нашей модели? Так как наша модель определяет конкретное положение области генерации - границу между внутренним и внешним ядром (F-слой), то вопрос должен касаться именно этой области. В самое последнее время, именно на границе внутреннего ядра была обнаружена цилиндрическая анизотропия акустических свойств (Кузнецов и др., 1989; Кузнецов, 1997), расположенная вдоль оси

вращения. Эти результаты находятся в соответствии с нашей моделью генерации геомагнитного поля.

20. 6. Магнитное поле планет и спутников.

Продвижение в изучении магнитных полей планет и спутников достигнуто благодаря успехам космической технологии. Начало исследованиям было положено измерениями магнитного поля Луны, проведенными космическим аппаратом Луна-2 (Долгинов, 1982). За минувшие годы были измерены магнитные поля планет: Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, и спутников: Луны, Ио, Ганимеда и Титана. Поразительным открытием в этом цикле работ было обнаружение следов магнитного поля на спутниках планет-гигантов. Похоже, завершился более чем двадцатилетний спор между нашими (Долгинов) и американскими (Russell) магнитологами о том, имеется ли на Марсе дипольное поле, или оно только осталось в горных породах. Последнюю "точку" в этом споре поставил американский космический аппарат "Марс-Глобал-Сервейер", который вышел на орбиту вокруг Марса в сентябре 1997 г. и получил убедительные данные о существовании в марсианской коре остаточной намагниченности - "вмороженной" памяти о когда-то существовавшем магнитном поле.

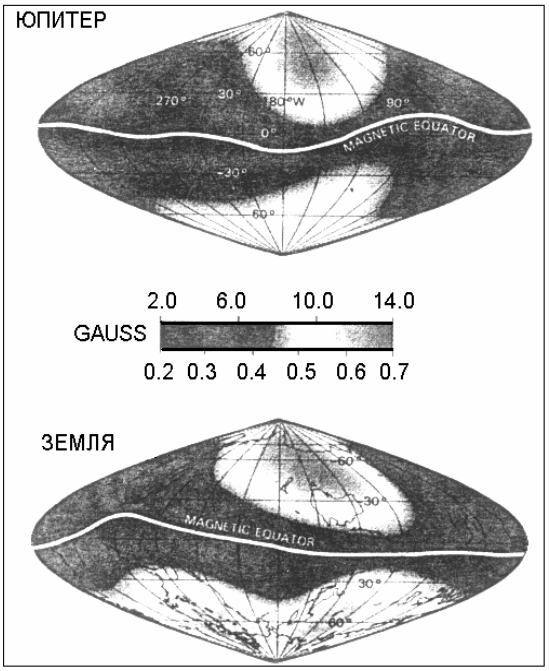


Рис. 14-31. Морфология магнитного поля Юпитера и Земли.

К сожалению, такой ясности нет с магнитным полем Венеры, не удается обнаружить каких-либо убедительных данных о результатах его измерения. То, что на Венере нет дипольного поля не вызывает сомнений, но было ли оно раньше? Ответ на этот вопрос весьма интересен в контексте нашей модели. Если его никогда не было, значит можно оценить минимально допустимую величину поля B_o, которое в значительной степени определяется скоростью вращения планеты. Тем интереснее, что Меркурий, который вращается всего в четыре раза быстрее Венеры, дипольным полем обладает. Если нет дипольного поля, но есть палеополе, то не происходит ли сейчас на Венере инверсия, или вещество внутреннего ядра Венеры уже релаксировало и генерация поля прекратилась?

Одна из последних сенсаций в области изучения магнитного поля спутников, это обнаружение магнитного поля на спутниках Юпитера во время посещения его окрестностей космической станцией Galileo. Особую дискуссию вызвало наличие

магнитного поля на Ганимеде (Stevenson, 1997; Crary, Bagenal, 1998). В этом плане обсуждались две возможности: Первая, это намагничивание горных пород Ганимеда магнитным полем Юпитера в более ранние времена, когда Ганимед был значительно ближе к Юпитеру, чем в настоящее время и, вторая возможность, это динамо в ядре Ганимеда. Однако, по данным о плотности ядра, на Ганимеде не может быть жидкого железного ядра, а оценки намагниченности пород от магнитного поля Юпитера дают только 5% от требуемой величины палеополя Ганимеда. Магнитологи высказывают и такие «фантастические» идеи относительно возможности генерации дипольного магнитного поля на Ганимеде в настоящее время. В любом случае, современные модели геомагнетизма не находят однозначного ответа на вопрос о магнитном поле на Ганимеде. Заметим, что эта задача очень близка и настолько же неразрешима, как и проблема генерации магнитного поля Луны, активно обсуждаемая учеными 20 и более лет тому назад (Runcorn, 1975).

Выше мы упоминали о том, что морфология геомагнитного поля весьма напоминает магнитное поле Юпитера (рис. 20-29). Для достижения большего эффекта, картина земного поля перевернута и вверху находится Южный полюс, а интенсивность поля Юпитера примерно в 10 раз выше, чем у Земли, однако общность этих проекций поразительна. Трудно себе представить, что Природа "выбрала" различные способы и механизмы для достижения таких похожих результатов. Еще раз хочется обратиться к Ньютону и вспомнить, что "Природа проста и не роскошествует излишними причинами вещей". В этом плане рассмотрим те данные о магнитных полях планет и спутников, которые известны на сегодня. Эти данные приведены в таблице 20.5 в первом столбце, во втором они же относительно геомагнитного поля. В третьем столбце приведены данные по скорости осевого вращения планет и спутников и их средний радиус. Эти данные потребуются нам для того, чтобы оценить, очень грубо, по порядку величин, возможное значение магнитного поля по нашей модели (н.м.).

Здесь необходимы пояснения. Дело в том, что по нашей модели величина дипольного поля: $B = \mu_o^2 \, (\sigma_X \, \sigma_R \, \omega/R) \, E_R \, S_X^2$. Положим, что электрические параметры токового контура для всех планет и спутников примерно одинаковы, а так же одинакова площадь S_X, занятая током, тогда мы можем записать: $B \sim \omega/R$, или: $B \sim 1/TR$.

Именно такая оценка относительного значения поля приведена в последнем столбце табл. 20.5. Это ориентировочная оценка, и к ней не надо относиться с особым доверием. Это связано с тем, что параметры: σ_X, σ_R, E_R и S_X, - могут быть различными у разных космических тел. Кроме этого, не совсем ясно, как сказывается величина ω. Затем, нам неизвестны величины ω и R планеты (спутника) в момент генерации дипольного поля и, наконец, мы не знаем, как могло бы происходить "старение" палеополя того или иного космического объекта. Поясним последнюю мысль на примере.

Все работы, посвященные интенсивности магнитного поля Земли в геологическом прошлом, показывают, что интенсивность поля раньше была в несколько раз выше и экспоненциально уменьшалась по мере приближения к настоящему времени. Чаще речь идет о виртуальном дипольном моменте p_m геомагнитного поля (Smith, 1967). Интенсивность земного поля в докембрии была примерно в 6 - 8 раз выше современного значения (R был примерно в два раза меньше, а $T \sim R^2$). Наша модель не противоречит экспериментальному факту уменьшения величины p_m.

В своих оценках мы, как правило, не учитывали эффект старения магнитных пород и, естественно, связанного с этим эффектом уменьшения интенсивности поля. Этот эффект действительно известен в палеомагнитологии. Оценим его возможную роль в оценке палеоинтенсивности поля. Положим, что процесс старения описывается экспонентой $exp(-t/\tau_o)$, где t - текущее время, а τ_o - характерное время релаксации, в течение которого модуль палеополя уменьшается в 2.7 раза. Если принять $\tau_o = 75$ млн. лет, то такая кривая неплохо описывает ход старения, следующий из нашей модели. Возникает вопрос: реально ли, чтобы интенсивность магнитного поля в течение такого срока

уменьшилась бы в *e* раз? Если это правдоподобно, то можно считать, что мы нашли еще один аргумент в пользу нашей модели...

Таблица 5

Планета, спутник	*B*, (Гс)	Поле, отн. Зем.	T, сут	R, км	Поле (модель)
Меркурий	$1.7\ 10^{-3}$	$5\ 10^{-3}$	59	2425	0.04
Венера	$< 310^{-5}$	0	243	6070	0.004
Земля	0,31	1	1	6378	1
Марс	$< 10^{-4}$	0	1	3395	2
Юпитер	4.2	10	0.4	71300	0.2
Сатурн	0.21	1	0.43	60100	0.25
Уран	0.25	1	0.7	24500	0.4
Луна	$< 10^{-5}$	0	27.3	1738	0.13
Ио	-	0	1.7	1810	2
Ганимед	-	0	7	2600	0.35

В заключение сформулируем основную идею геомагнетизма в модели горячей Земли:
- Земля рассматривается нами как саморегулирующаяся термодинамическая система.
- Процессы саморегуляции Земли происходят в F-слое. Здесь реализуются: фазовый переход (ФП) первого рода (конденсация-испарение), механизм образования и разделения электрических зарядов и образования двойного электрического слоя (ДЭС) и радиального электрического поля E_R.
- Суточное вращение ДЭС приводит к генерации слабого дипольного поля B_o. Это поле усиливается за счет холловского (или динамо) механизма, возникающего в области ФП под действием ортогональных E_R и B_o.
- Температура F-слоя за счет протекания процессов тепло и массопереноса поддерживается постоянной. В слое возникают: - стационарные вихри (глобальные магнитные аномалии), - вихри, движущиеся вдоль поверхности F-слоя в западном направлении (фокусы векового хода) (и те, и другие - вихри Россби), конвективные механизмы, приводящие к охлаждению или нагреву слоя, изменения режима ФП (переход от преимущества конденсации над испарением и наоборот) и т.п.
- Эти гидродинамические процессы происходят в хорошо проводящей двухфазной среде в “присутствии” дипольного поля. Возможны явления “вмораживания” поля в проводящую среду и “маркировки” этих процессов на земной поверхности, как известных явлений геомагнетизма, таких как глобальные магнитные аномалии, фокусы векового хода, джерки, экскурсы и инверсии.
- Модель генерации геомагнитного поля находит простое и естественное объяснение дрейфу магнитных полюсов.

Литература

Адушкин В.В., Ан В.А., Овчинников В.М., Краснощеков Д.Н. О скачке плотности на внутренней границе земного ядра по наблюдениям волн PkiKP на расстояниях 6°. ДАН. 1997. Т. 334. № 3. С.382-385.

Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок и хаос. О детерминистском подходе к турбулентности. М.: Мир. 1991. 367 с.

Ботвиновский В.В. Моделирование генератора главного магнитного поля Земли с помощью магнитных диполей и токовых контуров. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Новосибирск. 2000.

Головков В.П., Коломийцева Г.И., Коняшенко Л.П., Семенова Г.М. Каталог среднегодовых значений элементов геомагнитного поля на мировой сети магнитных обсерваторий. Выпуски XVI - XXX. 1983 - 1997. М.: ИЗМИРАН.
Долгинов Ш.Ш. Магнетизм планет. М.: 1982. 130 с. Итоги науки и техники. ВИНИТИ. Серия: Исследования космического пространства. Т. 18.
Кузнецов В.В. Физика Земли и солнечной системы (Модели образования и эволюции) 1984. Новосибирск: ИГГ. Вып. 639. 90 с.
Кузнецов В.В., Павлова И.В., Семаков Н.Н. Оценка степени недипольности главного магнитного поля Земли. ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 4. С. 819-821.
Кузнецов В.В., Доровский В.Н., Семаков Н.Н. и Котляр П.Е. Физика Земли. Новый взгляд на некоторые проблемы. Новосибирск: Наука, 1989. 128 с.
Кузнецов В.В. Физика Земли и солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 217 с.
Кузнецов В.В., Павлова И.В., Семаков Н.Н. Оценка положения виртуальных магнитных полюсов (По результатам советско-канадских измерений в Центральной Арктике). Геология и геофизика. 1990. Т. 31. № 2. С. 115-116.
Кузнецов В.В. Фокусы векового хода как гидродинамические вихри Россби. ДАН. 1995. Т. 340. №. 5. С. 685-687.
Кузнецов В.В. Положение северного магнитного полюса в 1994 г. ДАН. 1996. Т. 348, N.3. С. 397- 399.
Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра. УФН. 1997. Т. 167. № 9. С. 1001-1012.
Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998-а. Т. 38. С. 166-172.
Кузнецов В.В. Прогноз положения южного Магнитного Полюса на 1999 г. ДАН. 1998-б. Т. 361. № 2. С. 348-251.
Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский КГУ им. Беринга. 2008.
Незлин М.В., Снежкин Е.Н. Вихри Россби и спиральные структуры. М.: Наука. 1990. 238с.
Паркер Е. Космические магнитные поля. М.: Мир. 1982. 608 с. (ч. I), 479 с. (ч. II).
Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М. Мир.: 1986. 525 с.
Петрова Г.Н., Сперантова И.Б. Напряженность поля во время инверсии. В сб. Тонкая структура геомагнитного поля. 1986. М.: ИЗМИРАН. С. 33-44.
Петрова Г.Н., Поспелова Г.А. Экскурсы геомагнитного поля. Земля и Вселенная. 1992. № 3. С. 3 - 7.
Рикитаки Т. Электромагнетизм и внутреннее строение Земли. Л.: Недра. 1968. 331 с.
Ришбет Г., Гарриот О.К. Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 1975. 303 с.
Тихомолов Е.М. Поддержание вихревых структур в подогреваемом слое жидкости. Письма ЖЭТФ. 1994. Т. 59 Вып. 3. С. 155-158.
Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж.Н. Курс современного анализа. Ч II.М.: Г.И. ФМ.Л. 1963.
Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. М.: Гостехиздат. 1949. 155с.
Эйхенвальд А.А. Электричество. М.Л.: ГИЗ. 1927. 758 с.
Яновский Б.М. Земной магнетизм. М.: ГИТТЛ. 1953. 591 с.

Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Moul J.-L., Saracco G. Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks. J. Geoph. Res. 1996. V. 101. N. B10. P. 21975-21994.
Alldredge L.R., Hurwitz L. Radial dipoles as the sources of the Earth's main magnetic field. J. Geophys. Res. 1964. V. 69. P. 2631- 2636.
Alldridge, L.R., Stearns C.O. Dipole model of the sources of the Earth's magnetic field. J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 6583-6593.

Alldridge, L.R. Circular current loops, magnetic dipoles and spherical harmonic analyses. J. Geomag. Geoelectr. 1980. V. 32. P. 357-364.
Alldridge, L.R. Current loops fitted to geomag
Barton C.E. Survey tracks current position of South Magnetic Pole. EOS. Trans. AGU. 2002 V. 83. P. 291.
Barton C.E , Newitt L.R. Reply of Campbell W.H. Comment on " Survey tracks current position of South Magnetic Pole" and "Recent acceleration of the North Magnetic Pole linked to magnetic jerk" EOS. Trans. AGU. 2003. V. 84. P. 42.
Bauer L.A. Beitrage zur Kenntnis des Wesens der Sakular-variation des Erdmagnetismus. Dissert. Univ. Berlin. 1895.
Campbell W.H. Comment on " Survey tracks current position of South Magnetic Pole" and "Recent acceleration of the North Magnetic Pole linked to magnetic jerk" EOS. Trans. AGU. 2003. V. 84. P. 42.
Clement B.M. Geographical distribution of transitional VGPs: evidence for non-zonal equtorial symmetry during the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal. Earth Planet. Sci. Lett. 1991. V. 104. P. 48-58.
Constable C. Link between geomagnetic reversal paths and secular variation of the field over the past 5 Myr. Nature. 1992. V. 358. P. 230-233.
Constable C. About turn for reversals. Nature. 1993. V. 361. P. 305-306.
Courtillot V. et al., Sur une acceleration recente de la variation seculare du champ magnetique terrestre. C.R. Acad. Sci. Paris. Ser. D. 1978. V. 287. P. 1095-1098.
Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversal, polar wander, and core-mantle coupling. Science. 1987. V. 237. P. 1140-1147.
Crary F.J., Bagenal F. Remanent ferromagnetism and interior structure of Ganymede. J. Geophys. Res. 1998. V. 103. N. E 11. P. 25757-25773.
Dawson E., Newitt L.R. The magnetic poles of the Earth. J. Geomag. Geoelectr. 1982. V. 34. P. 225-240.
Fuller M., Laj C., Herrero-Bervera E. The reversal of the Earth's magnetic field. American Scientist. 1996. V. 84. P. 552-561.
Gavoret J., Gibert D., Menvielle M., Le Mouel J.L. Long-term variations of the external and internal components of the Earth's magnetic field. J. Geophys. Res. 1986. V. 91. N. B5. P. 4787-4796.
Gubbins D., Coe R.S. Longitudinally confined geomagnetic reversal parths from non-dipolar transition fields. Nature. 1993. V. 362. P. 51-53.
Gubbins D. Influence of the inner core. Nature. 1993. V. 365 . P. 20.
Gubbins D., Sarson G. Geomagnetic field morphologies from a kinematic dynamo model. Nature. 1994. V. 368. P. 51-55.
Hollerbach R., Jones C.A. Influence of the Earth's inner core geomagnetic fluctuations and reversals. Nature. 1993. V. 365. P. 541-543.
Hope E.P. Geotectonics of the Arctic Ocean and the Great Arctic Magnetic Anomaly. J. Geophys. Res. 1959. V. 164. N. 4. P. 407-427.
Inglis D.R. Theories of the Earth's magnetism. Rev. Mod. Phys. 1955. V.27. N. 2. P. 212-248.
Jackson A. Still poles apart on reversals? Nature. 1992. V. 358. P. 194-195.
Jacobs J.A. Reversals of the Earth's magnetic field. 1994. Cambridge Univ. Press. New York. 346 p.
Kuznetsov V.V. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals. Phys. Earth Plan. Inter. 1999. V. 115. P. 173-179.
Madden T., Le Mouel J.L. The recent secular variation and the motion at the core surface. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1982. V. A 306. P. 271-280.
Mandea M., Bellander E., Le Mouel J.-L. A geomagnetic jerk for the end of the 20th century? Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 183. P. 369-373.
McFadden P.L. Reversal ideas up-ended. Nature. 1992. V. 356. P. 381.

McFadden P.L., Barton C.E., Merrill R.T. Do virtual geomagnetic poles follow preferred parths during geomagnetic reversals? Nature. 1993. V. 361. P. 342-344.
McFadden P.L., Merrill R.T. History of Earth's magnetic field and possible connections to core-mantle boundary processes. J. Geophys. Res. 1995. V. 100. N. B1. P. 307-316.
Nevanlinna H. Some characteristics of the horizontal field variations around the geomagnetic jerk of 1970. J. Geophys. 1984. V. 55. N 1. P. 37-40.
Newitt L.R., Niblett E.R. Relocation of the north magnetic dip pole. Can. J. Earth Sci. 1986. V. 23. P.1062-1067.
Newitt L.R., Barton C.E. The position of the North Magnetic dip pole in 1994. J. Geomagn. Geoelectr. 1996. V. 48. N. 2. P. 221-232.
Newitt L.R., Mandea M., McKee L.A., Orgeval J.J. Recent acceleration of the North Magnetic Pole linked to magnetic jerk. EOS, Transactions AGU. 2002. V. 83. P. 385.
Petrova G.N. Displacement of VGP during reversals. Geomagnetic field in Quaternary. Potsdam. 1990. P. 37-42.
Runcorn S.K. On the interpretation of lunar magnetism. Phys. Earth Plan. Inter. 1975. V. 10. P. 327-337.
Russell C.T. Magnetic fields of the terrestrial planets. J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N. E10. P. 18681-18695.
Serson P.H. Tracking the north magnetic pole. New Scientist. 1981. June.
Smith P.J. Intensity of the Earth's magnetic field in the geological past. Nature. 1967. V. 216. P. 989-990.
Stevenson D.J. What might Ganymede tell us about Geodynamo? Abstracts 8th Scientific Assembly of IAGA with ACMA and STP Symposia. 1997. Uppsala. P. 7.
Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a "small-circle" assessment of the Gondwanan polar-wander path. Geophys. J. Int. 1996. V. 125. P. 115-122.
Tikhomolov E.M. Anomalous poleward drift of the solar magnetic field as a result of Rossby cyclone excitation. Astronomy and Astrophysics. 1995. V. 301. P. 277-281.
Tikhomolov E.M. Short-scale convectional long-scale deformationally unstable Rossby wave in a rotating fluid layer heated from below. Phys. Fluids. 1996. V. 8. № 12. P. 3329-3337.
Tric E., Laj C., Jehanno C., et al. High resolution record of the Upper Olduvai transition from Po Valley (Italy) sediments: support for dipolar transition geometry? Phys. Earth Planet. Inter. 1991. V. 65, P. 319-336.
Vestine E.H. The Earth's core. Trans. Am. Geophys. Union. 1954. V. 35. P. 63-72.

Глава. 16. Дрейф материков.

В главе 16 обсуждаются методы регистрации и результаты измерений современного дрейфа материков, в частности, РСДБ и GPS методы оценки скоростей дрейфа. Включен рздел, посвященный описанию лазерных деформографов и полученных на них результатов. Данные дрейфа материков представлены в контексте тектоники плит. Отмечаются успехи и ошибки этой теории.

16. 1. Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ).

Наиболее заметный прогресс в точных геодезических методах стал возможен благодаря интерферометрии внеземных сигналов, поступающих от «фиксированных» источников, настолько удаленных, что их собственное движение не может наблюдаться с Земли. Исследование радиоизлучения этих источников позволяет получить базисные линии (расстояния между станциями) очень большой длины и не требует при этом измерений элементов орбиты. Этот метод позволяет измерить базисную линию длиной в тысячи километров с точностью до нескольких сантиметров. К недостаткам метода относятся слабость сигнала и сложность его обработки. Источниками радиоизлучения служат квазары – наиболее удаленные от Земли астрономические объекты. Если известно направление на квазар, по разновременности поступления сигнала от квазара на две станции на Земле определяют длину базисной линии. Вследствие вращения Земли эта временна́я задержка изменяется вместе с изменением ориентировки базисной линии по отношению к поступающему сигналу. Наблюдаемая величина запаздывания сигнала может использоваться для высокоточного определения скорости вращения Земли.

Рис. 16-1. Параболическая антенна обсерватории Грин-Бэнк (западная Виргиния, США). Зеркало размером 100×100м (слева). Радиотелескоп недалеко от Калязина (справа).

Другие геодинамические процессы, как, например, движение полюсов Земли и движение плит земной коры, существенно воздействуют на результаты длиннобазисной радиоинтерферометрии, изменяя ориентировку геоцентрической системы координат по отношению к инерциальному пространству, определяемому квазарами. Таким образом, РСДБ позволяет усовершенствовать геофизические модели этих процессов с помощью мониторинга (систематических измерений) длин базисных линий, соединяющих станции слежения. Например, если станции находятся на противоположных сторонах материка или океана, с помощью РСДБ выявляется движение континентальных плит (составляющее несколько сантиметров в год). Считается, что этот результат служит подтверждением гипотезы тектоники плит. Для геодезии особенно важно то, что РСДБ позволяет очень

жестко определить ориентировку опорной геодезической сети по отношению к небесной сфере. Однако необходимо учитывать погрешности, источниками которых являются движение полюсов, дрейф материков и изменения параметров вращения Земли.

По-видимому, первый результат по глобальному мониторингу дрейфа континентов был получен с применением радиотелескопов РСДБ направленных не на квазары, а на спутники системы Navy Navigation Satellite (Anderle, Malyevac, 1983). В статье (Kuznetsov, 1990) сравнивается направление дрейфа материков с вектором градиента высоты геоида. Показано, что наблюдается хорошее совпадение (больше половины из 20 точек наблюдений) направлений векторов скоростей дрейфа - с максимальным градиентом высот геоида (см. рис 16-2).

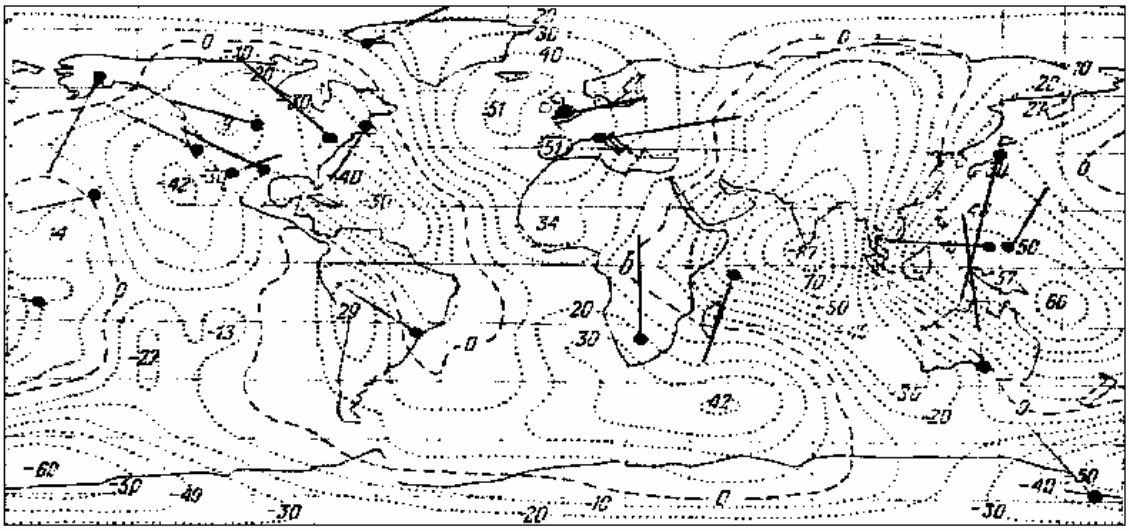


Рис. 16-2. Направления современных движений материков (Anderle, Malyevac, 1983) на карте высот геоида (в метрах) (Kuznetsov, 1990).

16. 2. Система Глобального Позиционирования (GPS - Global Positioning System).

Система является спутниковой и работает под управлением Министерства Обороны США. Система является глобальной, всепогодной и обеспечивает возможность получения точных координат и времени 24 часа в сутки (По материалам "Mapping Systems: General Reference, Trimble Navigation Limited, 1996").

Определение положения точек с помощью спутников. Появление искусственных спутников Земли произвело переворот в методах геодезии и значительно повысило точность навигации и определения положения точек и объектов на поверхности Земли. Большое преимущество, которое дает геодезии использование искусственных спутников, состоит в том, что спутник может синхронно наблюдаться с нескольких наземных станций, что позволяет определять их взаимное расположение. Сам спутник при этом может играть пассивную роль (например, отражая луч лазера, посланный с наземной станции, обратно на ту же станцию) или активную роль (непрерывно осуществляя передачу радиосигнала). На первых этапах развития космической геодезии сигналы подавались в виде вспышек света, которые фотографировались на фоне звезд одновременно с нескольких наземных пунктов, находящихся вне непосредственной видимости. Положение спутника на фотографии относительно опорных звезд давало возможность определить точное направление на него с данной станции наблюдения. Спутниковые системы позволяют наблюдателю, где бы он ни находился, точно определять свое местонахождение (например, Система глобального определения местоположения – Global Positioning System, GPS, использующая созвездие навигационных спутников NAVSTAR).

Основы системы GPS можно разбить на пять основных подпунктов:
* Спутниковая трилатерация - основа системы.
* Спутниковая дальнометрия – измерение расстояний до спутников.
* Точная временная привязка – зачем нужно согласовывать часы в приёмнике и на спутнике и для чего требуется 4-й космический аппарат.
* Расположение спутников – определение точного положения спутников в космосе.
* Коррекция ошибок – учёт ошибок вносимых задержками в тропосфере и ионосфере.

Спутниковая трилатерация

Точные координаты могут быть вычислены для места на поверхности Земли по измерениям расстояний от группы спутников (если их положение в космосе известно). В этом случае спутники являются пунктами с известными координатами. Предположим, что расстояние от одного спутника известно, и мы можем описать сферу заданного радиуса вокруг него.

Если мы знаем также расстояние и до второго спутника, то определяемое местоположение будет расположено где-то в круге, задаваемом пересечением двух сфер.

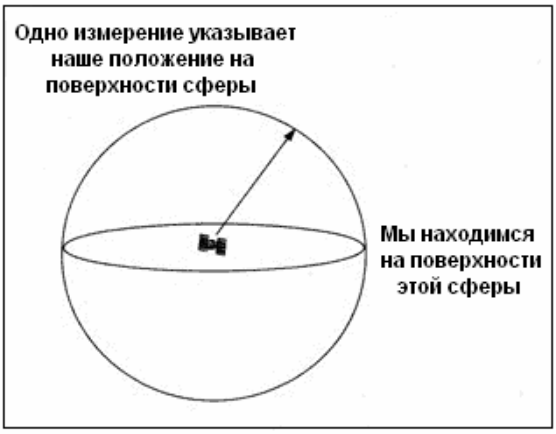


Рис. 16-3-а и Рис.16-3-б

Третий спутник определяет две точки на окружности.
Теперь остаётся только выбрать правильную точку. Однако одна из точек всегда может быть отброшена, так как она имеет высокую скорость перемещения или находится на ,или - под поверхностью Земли. Таким образом, зная расстояние до трёх спутников, можно вычислить координаты определяемой точки.

Спутниковая дальнометрия.

Расстояние до спутников определяется по измерениям времени прохождения радиосигнала от космического аппарата до приёмника умноженным на скорость света. Для того, чтобы определить время распространения сигнала нам необходимо знать когда он покинул спутник.

Для этого на спутнике и в приёмнике одновременно генерируется одинаковый Псевдослучайный Код*. Большинство гражданских пользователей используют C/A код при работе с GPS системами. Некоторые приёмники Trimble геодезического класса работают с P-кодом.

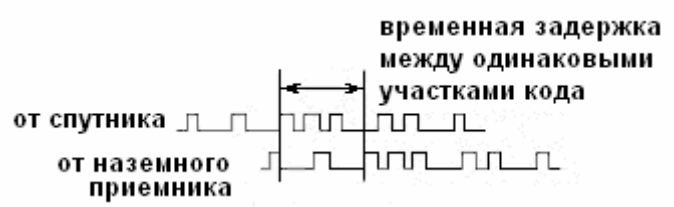


Рис. 16-3-в

---

* - Каждый спутник GPS передаёт два радиосигнала: на частоте L1=1575.42 МГц и L2=1227.60 МГц. Сигнал L1 имеет два дальномерных кода с псевдослучайным шумом (PRN), Р-код и С/А код. “Точный” или Р-код может быть зашифрован для военных целей. “Грубый” или С/А код не зашифрован. Сигнал L2 модулируется только с Р-кодом. Приёмник проверяет входящий сигнал со спутника и определяет когда он генерировал такой же код. Полученная разница, умноженная на скорость света (~ 300000 км/с) даёт искомое расстояние.

Использование кода позволяет приёмнику определить временную задержку в любое время. Кроме того, спутники могут излучать сигнал на одной и той же частоте, так как каждый спутник идентифицируется по своему Псевдослучайному коду (PRN или PseudoRandom Number code).

Точная временная привязка.

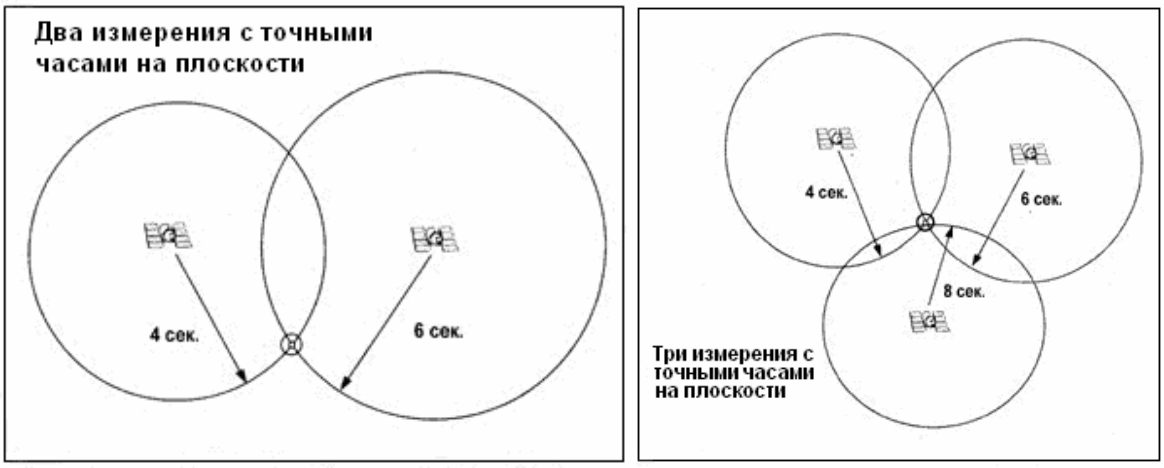


Рис. 16-3-г и Рис. 16-3-д

Как видно из сказанного выше, вычисления напрямую зависят от точности хода часов. Код должен генерироваться на спутнике и приёмнике в одно и то же время. На спутниках установлены атомные часы имеющие точность около одной наносекунды. Однако это слишком дорого, чтобы устанавливать такие часы в каждый GPS приёмник, поэтому измерения от четвёртого спутника используются для устранения ошибок хода часов приёмника.

Эти измерения можно использовать для устранения ошибок, которые возникают, если часы на спутнике и в приёмнике не синхронизированы. Для наглядности, иллюстрации, приведённые ниже, рассматривают ситуацию на плоскости, так как только три спутника необходимо для вычисления местоположения объекта.

Если часы на спутнике и в приёмнике имеют одинаковую точность хода, то точное местоположение может быть найдено по измерениям расстояния до двух спутников.

Если получены измерения с трёх спутников и все часы точные, то круг описанный радиус-вектором от третьего спутника будет пересекаться как показано на рисунке.
Однако если часы в приёмнике спешат на 1 секунду, то картина будет выглядеть следующим образом.
Если сделать замер до третьего спутника, то полученный радиус-вектор не пересечётся с двумя другими как показано на рисунке.
Когда GPS приёмник получает серию измерений которые не пересекаются в одной точке, то компьютер в приёмнике начинает вычитать (или добавлять) время методом последовательных итерации до тех пор, пока не сведёт все измерения к одной точке. После этого вычисляется поправка и делается соответствующее уравнивание.

Если вам требуется третье измерение, то необходим четвёртый спутник для устранения ошибок хода часов в приёмнике. Таким образом, при работе в поле вам необходимо иметь минимум четыре спутника, чтобы определить трёхмерные координаты объекта.

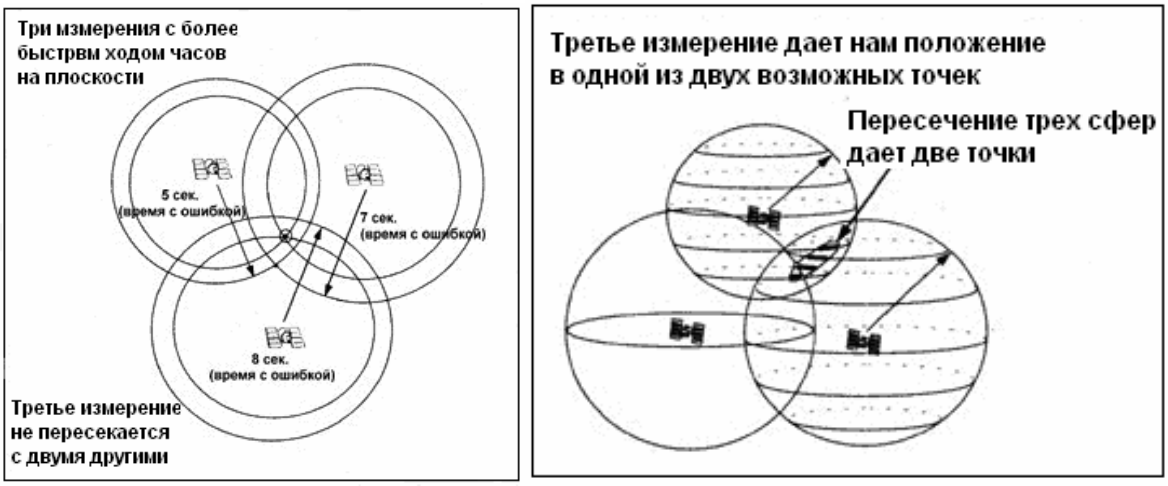


Рис. 16-3-е и Рис. 16-3-ж

Расположение спутников.

Система NAVSTAR имеет 24 рабочих спутника с орбитальным периодом в 12 часов на высоте примерно 20200 км от поверхности Земли. В шести различных плоскостях имеющих наклон к экватору в 55° , расположено по 4 спутника. Указанная высота необходима для обеспечения стабильности орбитального движения спутников и уменьшения фактора влияния сопротивления атмосферы.

Министерство Обороны США (DoD) осуществляет непрерывное слежение за спутниками. На каждом спутнике расположено несколько высокоточных атомных часов и они непрерывно передают радиосигналы с собственным уникальным идентификационным кодом*. МО США имеет 4 станции слежения за спутниками, три станции связи и центр, осуществляющий контроль и управление за всем наземным сегментом системы. Станции слежения непрерывно отслеживают спутники и передают данные в центр управления. В центре управления вычисляются уточнённые элементы спутниковых орбит и коэффициенты поправок спутниковых шкал времени, после чего эти данные передаются по каналам станций связи на спутники по крайней мере один раз в сутки.

Каждый спутник GPS передаёт два радиосигнала: на частоте L_1=1575.42 МГц и L_2=1227.60 МГц. Сигнал L_1 имеет два дальномерных кода с псевдослучайным шумом (PRN), Р-код и С/А код. “Точный” или Р-код может быть зашифрован для военных целей. “Грубый” или С/А код не зашифрован. Сигнал L_2 модулируется только с Р-кодом.

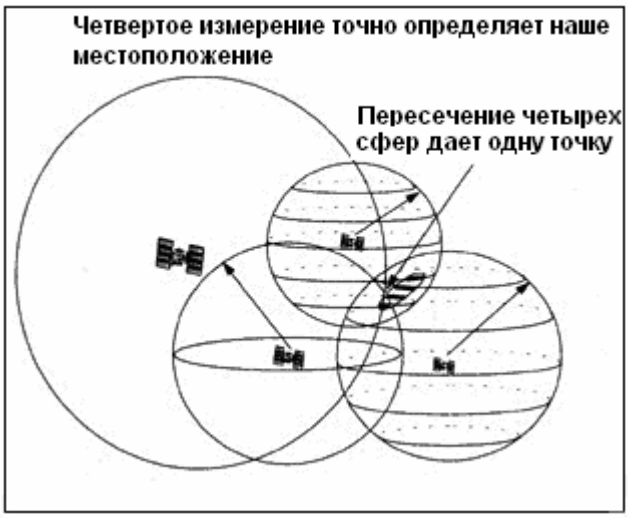


Рис. 16-3-з

Большинство гражданских пользователей используют C/A код при работе с GPS системами. Некоторые приёмники Trimble геодезического класса работают с P-кодом.

Коррекция ошибок.

Некоторые источники ошибок возникающих при работе GPS являются трудно устранимыми. Вычисления предполагают, что сигнал распространяется с непрерывной скоростью, которая равна скорости света. Однако в реальности всё гораздо сложнее. Скорость света является константой только в вакууме. Когда сигнал проходит через ионосферу (слой заряженных частиц на высоте 130-290 км) и тропосферу, его скорость распространения уменьшается, что приводит к ошибкам в измерения дальности. В современных GPS приёмниках используют всевозможные алгоритмы устранения этих задержек.

Иногда возникают ошибки в ходе атомных часов и орбитах спутников, но они обычно незначительны и тщательно отслеживаются со станций слежения.

Многолучёвая интерференция также вносит ошибки в определение местоположения с помощью GPS. Это происходит, когда сигнал отражается от объектов расположенных на земной поверхности, что создаёт заметную интерференцию с сигналами приходящими непосредственно со спутников. Специальная техника обработки сигнала и продуманная конструкция антенн позволяет свести к минимуму этот источник ошибок.

Обычно измеряют расстояние между наземным пунктом и спутником и скорость изменения этого расстояния при прохождении спутника. Расстояния рассчитывают, исходя из времени, которое затрачивает электромагнитный сигнал (лазерная вспышка или радиоимпульс) на прохождение пути от спутника до принимающей станции, при условии, что скорость движения сигнала известна. Вводятся поправки за атмосферную задержку сигнала и рефракцию. Скорость изменения расстояния между спутником и принимающей станцией определяется по величине наблюдаемого доплеровского сдвига частоты – изменения частоты сигнала, поступающего со спутника. Еще одна группа спутниковых наблюдений основана на принципе интерферометрии (т.е. наложения волн), когда радиоимпульс принимается в двух пунктах на земной поверхности и определяется время его запаздывания в одном пункте по отношению к другому. По величине этой задержки и известной скорости распространения волны с учетом угла подхода (который рассчитывается на основе известных параметров орбиты спутника) вычисляется расстояние между двумя пунктами. Наблюдения нескольких спутников позволяют также точно определить направление базисной линии, соединяющей наземные станции.

Пример использования GPS-системы.

GPS состоит из трех частей: 18 рабочих искусственных спутников, размещенных симметрично на круговых орбитах, системы управления и пользователей. Каждый спутник в этой системе снабжен микропроцессором для обработки данных, приемником и передатчиком для связи с наземной системой управления и для передачи функциональных сигналов пользователям, несколькими атомными часами для определения точного времени. Энергоснабжение спутника осуществляется двумя большими солнечными батареями. Система управления объединяет операторов и наблюдателей станций слежения, рассредоточенных по всей планете. Они определяют орбиты спутников, постоянно контролируют функционирование их систем и точность хода часов и передают информацию на спутники для ретрансляции ее пользователям, имеющим специальный приемник, преобразующий сообщения со спутников в информацию о координатах. Приемное устройство состоит из антенны, источника энергии, процессора с несколькими каналами ввода для приема различных сигналов со спутника, записывающего устройства для хранения обработанных данных и приборов, дающих возможность считывания информации пользователем.

БиБиСи сообщает, что группа учёных из графства Ноттингем, Великобритания, использует GPS для определения уровня моря и изучения дрейфа материков. В проекте участвуют пятьдесят станций, разбросанных по всей Великобритании, и практически незаметное движение материков определяется по изменению расстояний между станциями и их высоты над уровнем моря. Это даёт учёным возможность прогнозировать местоположение острова на тысячелетия вперёд. Они обнаружили, в частности, что Британские острова наклоняются – северная часть поднимается, а южная, наоборот, опускается в море (рис. 16-4).

Рис. 11-4. (BBC NEWS 4 June, 2003, 09:28 GMT 10:28 UK)

11. 3. ***Наблюдения деформаций земной поверхности.***

Под действием приливных сил отдельные регионы земной поверхности растягиваются, другие - сжимаются. Величину таких деформаций можно измерить с помощью приборов, которые называются экстенсометрами (деформографами). В распоряжении отдела гравитационных измерений ГАИШ имеется лазерный деформограф, смонтированный в штольне Баксанской обсерватории ГАИШ. Он предназначен для обнаружения возможного проявления гравитационных волн, пришедших из далекого Космоса. Но на него, в первую очередь, влияют приливные деформации земной коры, которые в значительной степени зависят от локальных особенностей местных условий (от геологии).

Лазерные деформографы.

Лазерный деформограф является оптическим прибором, предназначенным для регистрации микродеформаций земной коры в низком и сверхнизком диапазоне частот. Оптическая часть всех лазерных измерителей деформации собрана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона с системой электронной регистрации изменения разности длин плеч интерферометра. Блок-схема оптико-механической части лазерного деформографа представлена на рисунке 16-5. Деформограф включает в себя источник когерентного излучения – частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер «ЛГН-303М» с долговременной стабильностью 10^{-10}-11^{-11} и длиной волны 0.63 мкм, коллиматор и интерференционный узел: полупрозрачная плоскопараллельная делительная пластина, плоскопараллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах, лучевод, уголковый отражатель и фотодиод с электронным блоком регистрации.

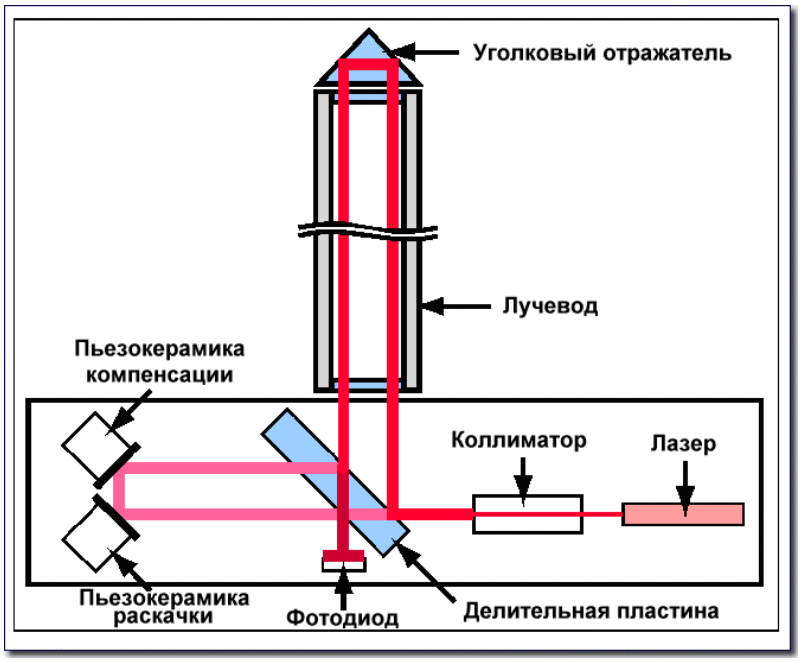


Рис. 16-5. Блок-схема оптико-механической части лазерного деформографа.

Элементы, ответственные за формирование интерференционной картины, расположены на едином жестком основании П-образного профиля – оптической скамье. Оптическая скамья выполнена из материала, обладающего малым коэффициентом теплового расширения (инвар). Уголковый отражатель и оптическая скамья жестко закреплены на массивных бетонных блоках, имеющих хороший контакт с коренными породами. Лучевод, в котором проходит лазерный луч, выполнен из трубы нержавеющей стали. Лучевод закреплен на стойках и предусмотрено его перемещение в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Лазерный деформограф использует интерференционный метод измерения расстояния, в основе которого лежит разница длин пробега луча по дистанции оптической скамьи и дистанции измерения. Луч лазера, пройдя коллиматор, попадает в интерференционный узел, где разделяется на полупрозрачном зеркале на два луча. Луч №1 направляется по лучеводу на уголковый отражатель, от которого возвращается на полупрозрачное зеркало. Луч №2, пройдя интерференционный узел, возвращается на полупрозрачное зеркало. Возвращенные лучи сбиваются на полупрозрачном зеркале в одной точке, образуя интерференционную картину, вариации которой регистрируются фотодиодом.

Принцип регистрации изменений интерференционной картины- компенсационный, позволяющий удерживать интерференционную картину неизменной. Цепь компенсации является и выходом сигнала деформации, который пропорционален величине деформации. Известно, что количество максимумов интерференционной картины бесконечно, поэтому шкала прибора условно делится на отрезки $\pm\lambda/2$, где λ – длина волны лазера. Если деформация превышает диапазон $\pm\lambda/2$, на зеркало-компенсатор подается сигнал смещения шкалы, благодаря которому интерференционная картина с одного максимума перескакивает на соседний, что учитывается при проведении измерений. Таким образом, суммарная деформация определяется формулой:

$$\Delta L = \left[(k_- - k_+) + \frac{U_2 - U_1}{U_{\lambda/2}} \right]$$

где k_+ и k_- - число сбросов положительной и отрицательной полярности, возникающих при изменениях превышающих ΔL на величину, равную $\pm\lambda/2$; $U_{\lambda/2}$ – нормирующий множитель в вольтах; U_1, U_2 – значения выходного напряжения в начальный и конечный моменты времени.

16. 4. Тектоника плит.

Основой теоретической геологии начала XX века была контракционная гипотеза. Земля остывает подобно испечённому яблоку, и на ней появляются морщины в виде горных хребтов. Развивала эти идеи теория геосинклиналей, созданная на основании изучения складчатых сооружений. Эта теория была сформулирована Джеймсом Даной, который добавил к контракционной гипотезе принцип изостазии. Согласно этой концепции Земля состоит из гранитов (континенты) и базальтов (океаны). При сжатии Земли в океанах-впадинах возникают тангенциальные силы, которые давят на континенты. Последние вздымаются в горные хребты, а затем разрушаются. Материал, который получается в результате разрушения, откладывается во впадинах.

Немецкий учёный-метеоролог Альфред Вегенер выступил на собрании Немецкого геологического общества с докладом о дрейфе материков против этой схемы. Исходной посылкой к созданию теории стало совпадение очертаний западного побережья Африки и восточного Южной Америки. Если эти континенты сдвинуть, то они совпадают, как если бы образовались в результате раскола одного праматерика.

Вегенер не удовлетворился совпадением очертаний побережий (которые неоднократно замечались до него), а стал интенсивно искать доказательства теории. Для этого он изучил геологию побережья обоих континентов и нашёл множество схожих геологических комплексов, которые совпадали при совмещении, так же, как и береговая линия. Другим направлением доказательства теории стали палеоклиматические реконструкции, палеонтологические и биогеографические аргументы. Многие животные и растения имеют ограниченные ареалы, по обе стороны Атлантического океана. Они очень схожи, но разделены многокилометровым водным пространством, и трудно предположить, что они пересекли океан.

Кроме того, Вегенер стал искать геофизические и геодезические доказательства. Однако в то время уровень этих наук был явно не достаточен, чтобы зафиксировать современное движение континентов. В 1930 году Вегенер погиб во время экспедиции в Гренландии, но перед смертью уже знал, что научное сообщество не приняло его теорию.

Изначально *теория дрейфа материков* было принята научным сообществом благосклонно, но в 1922 году она подверглась жёсткой критике со стороны сразу нескольких известных специалистов. Главным аргументом против теории стал вопрос о силе, которая двигает плиты. Вегенер полагал, что континенты двигаются по базальтам океанического дна, но для этого требовалось огромное усилие, и источника этой силы никто назвать не мог. В качестве источника движения плит предлагались сила Кориолиса,

приливные явления и некоторые другие, однако простейшие расчёты показывали, что всех их абсолютно недостаточно для перемещения огромных континентальных блоков.

Критики теории Вегенера поставили во главу угла вопрос о силе, двигающей континенты, и проигнорировали всё множество фактов, безусловно подтверждавших теорию. По сути, они нашли единственный вопрос, в котором новая концепция была бессильна, и без конструктивной критики отвергли основные доказательства. После смерти Альфреда Вегенера теория дрейфа материков была отвергнута, получив статус маргинальной науки, и подавляющее большинство исследований продолжали проводиться в рамках теории геосинклиналей. Правда, и ей пришлось искать объяснения истории расселения животных на континентах. Для этого были придуманы сухопутные мосты, соединявшие континенты, но погрузившиеся в морскую пучину. Это было ещё одно рождение легенды об Атлантиде. Стоит отметить, что некоторые учёные не признали вердикт мировых авторитетов и продолжили поиск доказательств движения материков. Так дю Туа (Alexander du Toit) объяснял образование гималайских гор столкновением Индостана и Евразийской плиты.

Вялотекущая борьба фиксистов, как назвали сторонников отсутствия значительных горизонтальных перемещений, и мобилистов, утверждавших, что континенты всё-таки двигаются, с новой силой разгорелась в 1960-х годах, когда в результате изучения дна океанов были найдены ключи к пониманию «машины» под названием Земля.

К началу 1960-х годов была составлена карта рельефа дна Мирового океана, которая показала, что в центре океанов расположены срединно-океанические хребты, которые возвышаются на 1,5—2 км над абиссальными равнинами, покрытыми осадками. Эти данные позволили Р. Дицу и Гарри Хессу в 1962—1963 годах выдвинуть гипотезу спрединга. Согласно этой гипотезе, в мантии происходит конвекция со скоростью около 1 см/год. Восходящие ветви конвекционных ячеек выносят под срединно-океаническими хребтами мантийный материал, который обновляет океаническое дно в осевой части хребта каждые 300—400 лет. Континенты не плывут по океанической коре, а перемещаются по мантии, будучи пассивно «впаяны» в литосферные плиты. Согласно концепции спрединга, океанические бассейны структуры непостоянные, неустойчивые, континенты же — устойчивые.

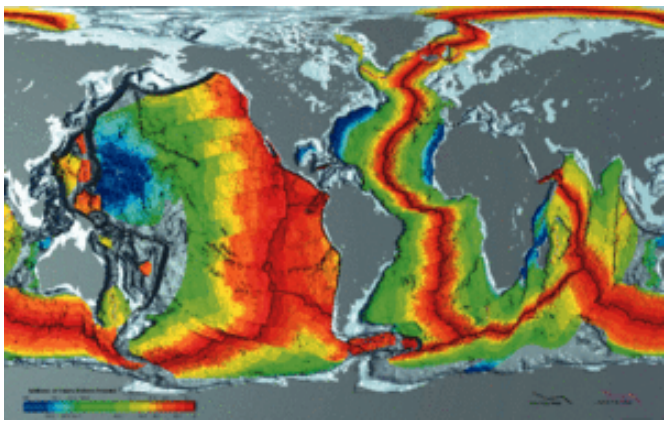


Рис. 16-6. Возраст дна океанов (красный цвет соответствует молодой коре).

В 1963 году гипотеза спрединга получает мощную поддержку в связи с открытием полосовых магнитных аномалий океанического дна. Они были интерпретированы как запись инверсий магнитного поля Земли, зафиксированная в намагниченности базальтов дна океана. После этого тектоника плит начала победное шествие в науках о Земле. Всё больше учёных понимали, что, чем тратить время на защиту концепции фиксизма, лучше взглянуть на планету с точки зрения новой теории и, наконец-то, начать давать реальные объяснения сложнейшим земным процессам.

Сейчас тектоника плит подтверждена прямыми измерениями скорости плит методом интерферометрии излучения от далёких квазаров и измерениями с помощью спутниковых навигационных систем GPS. Результаты многолетних исследований полностью подтвердили основные положения теории тектоники плит.

Современное состояние тектоники плит. Сейчас уже нет сомнений, что горизонтальное движение плит происходит за счёт мантийных теплогравитационных течений — конвекции. Источником энергии для этих течений служит разность температуры центральных областей Земли, которые имеют очень высокую температуру (по оценкам, температура ядра составляет порядка 5000 °C) и температуры на её поверхности. Нагретые в центральных зонах Земли породы расширяются (термическое расширение), плотность их уменьшается, и они всплывают, уступая место опускающимся более холодными и потому более тяжёлым массам, уже отдавшим часть тепла земной коре. Этот процесс переноса тепла (следствие всплывания лёгких, горячих масс и погружения тяжелых, более холодных масс) идёт непрерывно, в результате чего возникают конвективные потоки. Эти потоки — течения замыкаются сами на себя и образуют устойчивые конвективные ячейки, согласующиеся по направлениям потоков с соседними ячейками. При этом в верхней части ячейки течение вещества происходит почти в горизонтальной плоскости, и именно эта часть течения увлекает плиты в горизонтальном же направлении с огромной силой за счёт огромной вязкости мантийного вещества. Если бы мантия была совершенно жидкой — вязкость пластичной мантии под корой была бы малой (скажем, как у воды или около того), то через слой такого вещества с малой вязкостью не могли бы проходить поперечные сейсмические волны. А земная кора увлекалась бы потоком такого вещества со сравнительно малой силой. Но, благодаря высокому давлению, при относительно низких температурах, господствующих на поверхности Мохо и ниже, вязкость мантийного вещества здесь очень велика (так что в масштабе лет вещество мантии Земли жидкое (текучее), а в масштабе секунд — твёрдое).

Движущей силой течения вязкого мантийного вещества непосредственно под корой является перепад высот свободной поверхности мантии между областью подъёма и областью опускания конвекционного потока. Этот перепад высот, можно сказать, величина отклонения от изостазии, образуется из-за разной плотности чуть более горячего (в восходящей части) и чуть более холодного вещества, поскольку вес более и менее горячего столбов в равновесии одинаков (при разной плотности!). На самом же деле, положение свободной поверхности не может быть измерено, оно может быть только вычислено (высота поверхности Мохо + высота столба мантийного вещества, по весу эквивалентного слою более лёгкой коры над поверхностью Мохо). Эта же движущая сила (перепада высот) определяет степень упругого горизонтального сжатия коры силой вязкого трения потока о земную кору. Величина этого сжатия мала в области восхождения мантийного потока и увеличивается по мере приближения к месту опускания потока (за счёт передачи напряжения сжатия через неподвижную твердую кору по направлению от места подъёма к месту спуска потока). Над опускающимся потоком сила сжатия в коре так велика, что время от времени превышается прочность коры (в области наименьшей прочности и наибольшего напряжения), происходит неупругая (пластическая, хрупкая) деформация коры — землетрясение. При этом из места деформации коры выдавливаются целые горные цепи, например, Гималаи. При пластичекой (хрупкой) деформации очень быстро (в темпе смещения коры при землетрясении) уменьшается и напряжение в ней — сила сжатия в очаге землетрясения и его окрестностях. Но сразу же по окончании неупругой деформации продолжается прерванное землетрясением очень медленное нарастание напряжения (упругой деформации) за счёт очень медленного же движения вязкого мантийного потока, начиная цикл подготовки следующего землетрясения.

Таким образом, движение плит — следствие переноса тепла из центральных зон Земли очень вязкой магмой. При этом часть тепловой энергии превращается в

механическую работу по преодолению сил трения, а часть, пройдя через земную кору, излучается в окружающее пространство. Так что наша планета в некотором смысле представляет собой тепловой двигатель.

Относительно причины высокой температуры недр Земли существует несколько гипотез. В начале XX века была популярна гипотеза радиоактивной природы этой энергии. Казалось, она подтверждалась оценками состава верхней коры, которые показали весьма значительные концентрации урана, калия и других радиоактивных элементов, но впоследствии выяснилось, что содержания радиоактивных элементов в породах земной коры совершенно недостаточно для обеспечения наблюдаемого потока глубинного тепла. А содержание радиоактивных элементов в подкоровом веществе (по составу близком к базальтам океанического дна), можно сказать, ничтожно. Однако это не исключает достаточно высокого содержания тяжелых радиоактивных элементов, генерирующих тепло, в центральных зонах планеты.

Другая модель объясняет нагрев химической дифференциацией Земли. Первоначально планета была смесью силикатного и металлического веществ. Но одновременно с образованием планеты началась её дифференциация на отдельные оболочки. Более плотная металлическая часть устремилась к центру планеты, а силикаты концентрировались в верхних оболочках. При этом потенциальная энергия системы уменьшалась и превращалась в тепловую энергию. Другие исследователи полагают, что разогрев планеты произошёл в результате аккреции при ударах метеоритов о поверхность зарождающегося небесного тела. Это вряд ли — при аккреции тепло выделялось практически на поверхности, откуда оно легко уходило в космос, а не в центральные области Земли.

Второстепенные силы. Сила вязкого трения, возникающая вследствие тепловой конвекции, играет определяющую роль в движениях плит, но кроме неё на плиты действуют и другие, меньшие по величине, но также важные силы. Это - силы Архимеда, обеспечивающие плавание более лёгкой коры на поверхности более тяжёлой мантии. Приливные силы, обусловленные гравитационным воздействием Луны и Солнца (различием их гравитационного воздействия на разно удаленные от них точки Земли). А также силы, возникающие вследствие изменения атмосферного давления на различные участки земной поверхности — силы атмосферного давления достаточно часто изменяются на 3 %, что эквивалентно сплошному слою воды толщиной 0.3 м (или гранита толщиной не менее 10 см). Причём это изменение может происходить в зоне шириной в сотни километров, тогда как изменение приливных сил происходит более плавно — на расстояниях в тысячи километров.

Дивергентные границы или границы раздвижения плит. Это границы между плитами, двигающимися в противоположные стороны. В рельефе Земли эти границы выражены рифтами, в них преобладают деформации растяжения, мощность коры пониженная, тепловой поток максимален, и происходит активный вулканизм. Если такая граница образуется на континенте, то формируется континентальный рифт, который в дальнейшем может превратиться в океанический бассейн с океаническим рифтом в центре. В океанических рифтах в результате спрединга формируется новая океаническая кора.

Океанические рифты. На океанической коре рифты приурочены к центральным частям срединно-океанических хребтов. В них происходит образование новой океанической коры. Общая их протяжённость более 60 тысяч километров. К ним приурочено множество гидротермальных источников, которые выносят в океан значительную часть глубинного тепла, и растворённых элементов. Высокотемпературные источники называются чёрными курильщиками, с ними связаны значительные запасы цветных металлов.

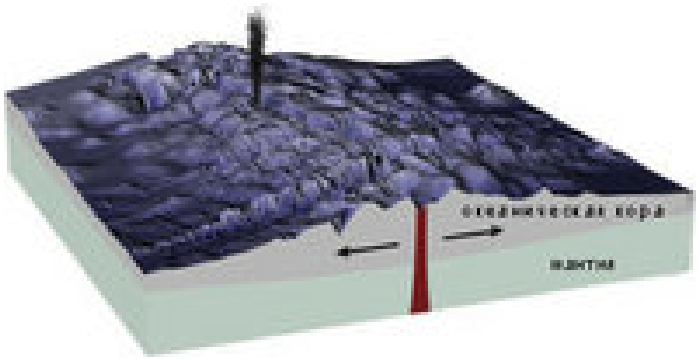


Рис. 16- 7. Схема строения срединно-океанического хребта

Континентальные рифты. Раскол континента на части начинается с образования рифта. Кора утончается и раздвигается, начинается магматизм. Формируется протяжённая линейная впадина глубиной порядка сотен метров, которая ограничена серией сбросов. После этого возможно два варианта развития событий: либо расширение рифта прекращается и он заполняется осадочными породами, превращаясь в авлакоген, либо континенты продолжают раздвигаться и между ними, уже в типично океанических рифтах, начинает формироваться океаническая кора.

Конвергентные границы. Конвергентными называются границы, на которых происходит столкновение плит. Возможно три варианта:
- Континентальная плита с океанической. Океаническая кора плотнее, чем континентальная и погружается под континент в зоне субдукции.
- Океаническая плита с океанической. В таком случае одна из плит заползает под другую и также формируется зона субдукции, над которой образуется островная дуга.
- Континентальная плита с континентальной. Происходит коллизия, возникает мощная складчатая область. Классический пример — Гималаи.

В редких случаях происходит надвигание океанической коры на континентальную - обдукция. Благодаря этому процессу возникли офиолиты Кипра, Новой Каледонии, Омана и другие.

В зонах субдукции поглощается океаническая кора, и тем самым компенсируется её появление в СОХах. В них происходят исключительно сложные процессы, взаимодействия коры и мантии. Так океаническая кора может затягивать в мантию блоки континентальной коры, которые по причине низкой плотности эксгумируются обратно в кору. Так возникают метаморфические комплексы сверхвысоких давлений, один из популярнейших объектов современных геологических исследований.

Большинство современных зон субдукции расположены по периферии Тихого океана, образуя тихоокеанское огненное кольцо. Процессы, идущие в зоне конвегенции плит, по праву считаются одними из самых сложных в геологии. В ней смешиваются блоки разного происхождения, образуя новую континентальную кору.

Активные континентальные окраины. Активная континентальная окраина возникает там, где под континент погружается океаническая кора. Эталоном этой геодинамической обстановки считается западное побережье Южной Америки, её часто называют *андийским* типом континентальной окраины. Для активной континентальной окраины характерны многочисленные вулканы и вообще мощный магматизм. Расплавы имеют три компонента: океаническую кору, мантию над ней и низы континентальной коры.

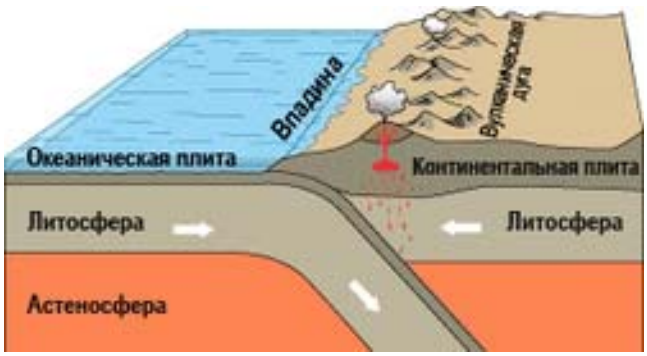


Рис. 16-8. Активная континентальная окраина.

Под активной континентальной окраиной происходит активное механическое взаимодействие океанической и континентальной плит. В зависимости от скорости, возраста и мощности океанической коры возможны несколько сценариев равновесия. Если плита двигается медленно и имеет относительно малую мощность, то континент соскабливает с неё осадочный чехол. Осадочные породы сминаются в интенсивные складки, метаморфизуются и становятся частью континентальной коры. Образующая при этом структура называется *аккреционным клином*. Если скорость погружающейся плиты высока, а осадочный чехол тонок, то океаническая кора стирает низ континента и вовлекает его в мантию.

Островные дуги. Островные дуги — это цепочки вулканических остров над зоной субдукции, возникающие там, где океаническая плита погружается под океаническую. В качестве типичных современных островных дуг можно назвать Алеутские, Курильские, Марианские острова, и многие другие архипелаги. Японские острова также часто называют островной дугой, но их фундамент очень древний и на самом деле они образованы несколькими разновременными комплексами островных дуг, так что Японские острова являются микроконтинентом**.**

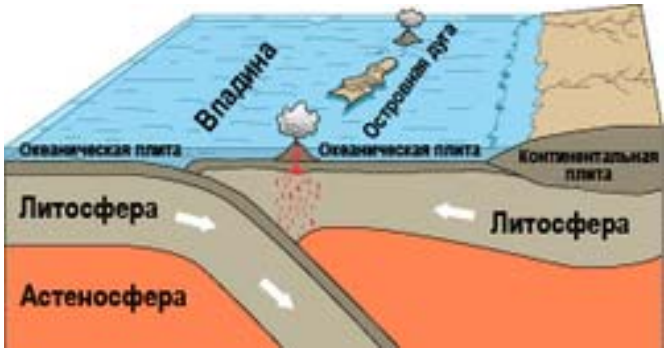


Рис. 16-9. Островная дуга.

Островные дуги образуются при столкновении двух океанических плит. При этом одна из плит оказывается снизу и поглощается в мантию. На верхней же плите образуются вулканы островной дуги. Выгнутая сторона островной дуги направлена в сторону поглощаемой плиты. С этой стороны находятся глубоководный желоб и преддуговый прогиб.

За островной дугой расположен задуговый бассейн (типичные примеры: Охотское море, Южно-Китайское море и т.д.) в котором также может происходить спрединг.

Коллизия континентов. Столкновение континентальных плит приводит к смятию коры и образованию горных цепей. Примером коллизии является Альпийско-Гималайский горный пояс, образовавшийся в результате закрытия океана Тетис и столкновения с Евразийской плитой Индостана и Африки. В результате мощность коры значительно увеличивается, под Гималаями она составляет 70 км. Это неустойчивая структура, она интенсивно разрушается поверхностной и тектонической эрозией. В коре с резко увеличенной мощностью идёт выплавка гранитов из метаморфизованных осадочных и магматических пород. Так образовались крупнейшие батолиты, например, Ангаро-Витимский и Зерендинский.

Рис. 16-10. Столкновение континентов.

Трансформные границы. Там, где плиты двигаются параллельным курсом, но с разной скоростью, возникают трансформные разломы — грандиозные сдвиговые нарушения, широко распространённые в океанах и редкие на континентах.

Трансформные разломы. В океанах трансформные разломы идут перпендикулярно срединно-океаническим хребтам (СОХ) и разбивают их на сегменты шириной в среднем 400 км. Между сегментами хребта находится активная часть трансформного разлома. На этом участке постоянно происходят землетрясения и горообразование, вокруг разлома формируются многочисленные оперяющие структуры — надвиги, складки и грабены. В результате, в зоне разлома нередко обнажаются мантийные породы.

По обе стороны от сегментов СОХ находятся неактивные части трансформных разломов. Активных движений в них не происходит, но они чётко выражены в рельефе дна океанов линейными поднятиями с центральной депрессией.

Трансформные разломы формируют закономерную сетку и, очевидно, возникают не случайно, а в силу объективных физических причин. Совокупность данных численного моделирования, теплофизических экспериментов и геофизических наблюдений позволила выяснить, что мантийная конвекция имеет трёхмерную структуру. Кроме основного течения от СОХ, в конвективной ячейке за счёт остывания верхней части потока, возникают продольные течения. Это остывшее вещество устремляется вниз вдоль основного направления течения мантии. В зонах этого второстепенного опускающегося потока и находятся трансформные разломы. Такая модель хорошо согласуется с данными о тепловом потоке: над трансформными разломами наблюдается его понижение.

Сдвиги на континентах. Сдвиговые границы плит на континентах встречаются относительно редко. Пожалуй, единственным ныне активным примером границы такого типа является разлом Сан-Андреас, отделяющий Северо-Американскую плиту от Тихоокеанской. 800-мильный разлом Сан-Андреас — один из самых сейсмоактивных районов планеты: в год плиты смещаются относительно друг друга на 0,6 см, землетрясения с магнитудой более 6 единиц происходят в среднем раз в 22 года. Город

Сан-Франциско и большая часть района бухты Сан-Франциско построены в непосредственной близости от этого разлома.

Внутриплитные процессы. Первые формулировки тектоники плит утверждали, что вулканизм и сейсмические явления сосредоточены по границам плит, но вскоре стало ясно, что и внутри плит идут специфические тектонические и магматические процессы, которые также были интерпретированы в рамках этой теории. Среди внутриплитных процессов особое место заняли явления долговременного базальтового магматизма в некоторых районах, так называемые горячие точки.

Горячие точки. На дне океанов расположены многочисленные вулканические острова. Некоторые из них расположены в цепочках с последовательно изменяющимся возрастом. Классическим примером такой подводной гряды стал Гавайский подводный хребет. Он поднимается над поверхностью океана в виде Гавайских островов, от которых на северо-запад идёт цепочка подводных гор с непрерывно увеличивающимся возрастом, некоторые из которых, напр., атолл Мидуэй, выходят на поверхность. На расстоянии порядка 3000 км от Гавайев цепь немного поворачивает на север, и называется уже Императорским хребтом. Он прерывается в глубоководном желобе перед Алеутской островной дугой.

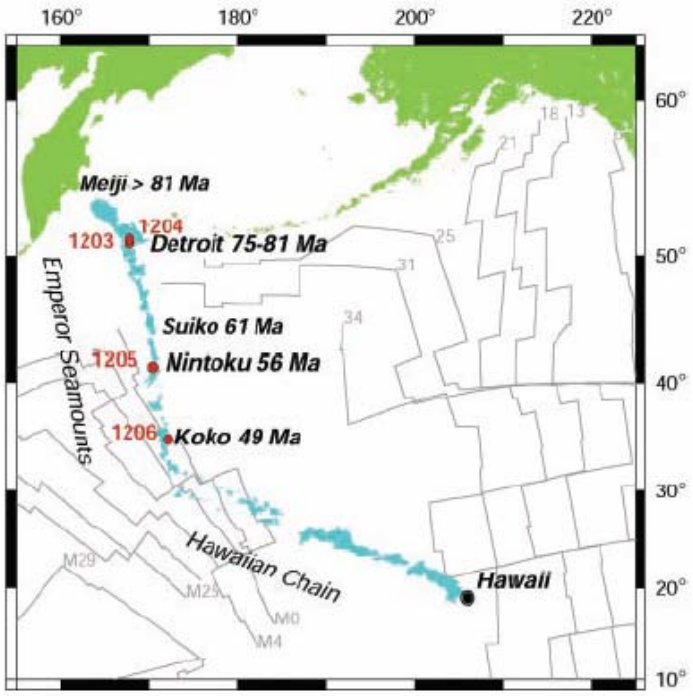


Рис. 16-11. Горячие точки.

Для объяснения этой удивительной структуры было сделано предположение, что под Гавайскими островами находится горячая точка — место, где к поверхности поднимается горячий мантийный поток, который проплавляет двигающуюся над ним океаническую кору. Таких точек сейчас на Земле установлено множество. Мантийный поток, который их вызывает, был назван плюмом. В некоторых случаях предполагается исключительно глубокое происхождение вещества плюмов, вплоть до границы ядра — мантии.

Траппы и океанические плато. Кроме долговременных горячих точек, внутри плит иногда происходят грандиозные излияния расплавов, которые на континентах формируют траппы, а в океанах океанические плато. Особенность этого типа магматизма в том, что он

происходит за короткое в геологическом смысле время порядка нескольких миллионов лет, но захватывает огромные площади (десятки тысяч км²) и изливается колоссальный объём базальтов, сравнимый с их количеством, кристаллизующимся в срединно-океанических хребтах.

Известны сибирские траппы на Восточно-Сибирской платформе, траппы плоскогорья Декан на Индостанском континенте и многие другие. Причиной образования траппов также считаются горячие мантийные потоки, но в отличие от горячих точек они действуют кратковременно, и разница между ними не совсем ясна.

Горячие точки и траппы дали основания для создания так называемой плюмовой геотектоники, которая утверждает, что значительную роль в геодинамических процессах играет не только регулярная конвекция, но и плюмы. Плюмовая тектоника не противоречит тектонике плит, а дополняет её.

Тектоника плит как система наук. Сейчас тектонику уже нельзя рассматривать как чисто геологическую концепцию. Она играет ключевую роль во всех науках о Земле, в ней выделилось несколько методических подходов с разными базовыми понятиями и принципами.

С точки зрения *кинематического подхода*, движения плит можно описать геометрическими законами перемещения фигур на сфере. Земля рассматривается как мозаика плит разного размера, перемещающихся относительно друг друга и самой планеты. Палеомагнитные данные позволяют восстановить положение магнитного полюса относительно каждой плиты на разные моменты времени. Обобщение данных по разным плитам привело к реконструкции всей последовательности относительных перемещений плит. Объединения этих данных с информацией, полученной из неподвижных горячих точек, сделало возможным определить абсолютные перемещения плит и историю движения магнитных полюсов Земли.

Теплофизический подход рассматривает Землю как тепловую машину, в которой тепловая энергия частично превращается в механическую. В рамках этого подхода движение вещества во внутренних слоях Земли моделируется как поток вязкой жидкости, описываемый уравнениями Навье — Стокса. Мантийная конвекция сопровождается фазовыми переходами и химическими реакциями, которые играют определяющую роль в структуре мантийных течений. Основываясь на данных геофизического зондирования, результатах теплофизических экспериментов и аналитических и численных расчётах, учёные пытаются детализировать структуру мантийной конвекции, найти скорости потоков и другие важные характеристики глубинных процессов. Особенно важны эти данные для понимания строения самых глубоких частей Земли — нижней мантии и ядра, которые недоступны для непосредственного изучения, но, несомненно, оказывают огромное влияние на процессы, идущие на поверхности планеты.

Геохимический подход. Для геохимии тектоника плит важна как механизм непрерывного обмена веществом и энергией между различными оболочками Земли. Для каждой геодинамической обстановки характерны специфические ассоциации горных пород. В свою очередь, по этим характерным особенностям можно определить геодинамическую обстановку, в которой образовалась порода.

Исторический подход. В смысле истории планеты Земля, тектоника плит — это история соединяющихся и раскалывающихся континентов, рождения и угасания вулканических цепей, появления и закрытия океанов и морей. Сейчас для крупных блоков коры история перемещений установлена с большой детальностью и за значительный промежуток времени, но для небольших плит методические трудности много большие. Самые сложные геодинамические процессы происходят в зонах столкновения плит, где

образуются горные цепи, сложенные множеством мелких разнородных блоков — террейнов. При изучении Скалистых гор зародилось особое направление геологических исследований — террейновый анализ, который вобрал в себя комплекс методов, по выделению террейнов и реконструкции их истории.

Тектоника плит на других планетах. В настоящее время нет подтверждений современной тектоники плит на других планетах Солнечной системы. Исследования магнитного поля Марса, проведённые в 1999 космической станцией Mars Global Surveyor, указывают на возможность тектоники плит на Марсе в прошлом.

Некоторые процессы ледяной тектоники на Европе аналогичны процессам, происходящим на Земле.

Когда началась тектоника плит на Земле. Считается, что первые блоки континентальной коры, кратоны, возникли на Земле в архее, тогда же начались их горизонтальные перемещения, но полный комплекс признаков действия механизма тектоники плит современного типа встречается только в позднем протерозое. До этого мантия, возможно, имела иную структуру массопереноса, в которой большую роль играли не установившиеся конвективные потоки, а турбулентная конвекция и плюмы.

В прошлом поток тепла из недр планеты был больше, поэтому кора была тоньше, давление под более тонкой (в разы) корой было ниже (также в разы). А при существенно более низком давлении и чуть большей температуре вязкость мантийных конвекционных потоков непосредственно под корой была намного ниже нынешней. Поэтому в коре, плывущей на поверхности мантийного потока, менее вязкого, чем сегодня, возникали лишь сравнительно небольшие упругие деформации. И механические напряжения, порождаемые в коре менее вязкими, чем сегодня, конвекционными потоками, были недостаточны для превышения предела прочности пород коры. Поэтому и не было такой тектонической активности, как в настоящее время.

16. 5. Ошибки тектоники плит.

Перемещения плит и парадокс Мезервея. Восстановление прошлых перемещений плит - один из основных предметов геологических исследований. С различной степенью детальности положение континентов и блоков, из которых они сформировались, реконструировано вплоть до архея.

Рис.16-12. Пангея (слева). Красная линия – побережье Тихого океана. Предполагаемое первоначальное расположение материков; экваториальная проекция периметра Тихого океана и направления дрейфа материков, необходимые для получения исходной картины (Meservey, 1969) - справа.

Из анализа перемещений континентов было сделано эмпирическое наблюдение, что континенты каждые 400-600 млн. лет собираются в огромный материк, содержащий в

себе почти всю континентальную кору - суперконтинент. Современные континенты образовались 200-150 млн. лет назад, в результате раскола суперконтинента Пангеи. Сейчас континенты находятся на этапе почти максимального разъединения. Атлантический океан расширяется, а Тихий океан закрывается. Индостан движется на север и сминает Евразийскую плиту, но, видимо, ресурс этого движения уже почти исчерпан, и в скором геологическом времени в Индийском океане возникнет новая зона субдукции, в которой океаническая кора Индийского океана будет поглощаться под Индийский континент.

Meservey (1969) показал (см. главу 01), что только на расширяющейся Земле можно получить согласие между современной топологией материков и океанов, и палеомагнитными данными, такими как, дрейф магнитных полюсов и полосовые магнитные аномалии в океанах. “Соединение” материков в Гондвану, в которой Африка, Южная и Северная Америки, Австралия и Антарктида образуют единый праматерик, невозможно на земном шаре, имеющем радиус, равный современному.

Мезервей обратил внимание на то, что материки, расположенные по берегам Тихого океана, не могли 200 млн. лет тому назад находиться друг от друга на расстояниях, больших, чем в настоящее время (рис. 16-12). Для того чтобы образовать Гондвану, этим материкам пришлось бы двигаться вдоль по направлениям, показанным на рисунке 16-12 справа, увеличив примерно вдвое площадь поверхности Тихого океана, что противоречит палеореконструкциям.

О чем говорят параметры фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$? Парадокс Эвернденa.

Заголовком к этому параграфу взято название статьи Дж. Ф. Эвернденa (1997). Автор анализирует известную монографию Г. Джеффриса (1960) в части оценки величин параметров, определяющих фигуру Земли, сравнивает результаты Джеффриса с работой Ламба (1947) и приходит к ряду нетривиальных выводов. Основной из них состоит в том, что Земля сплюснута намного меньше, чем её жидкая модель. Автор объясняет реальное сжатие Земли значительно большей, чем ранее предполагалось, прочностью нижней мантии, а совсем не текучестью её вещества. Более того, он пытается доказать, что прочная мантия Земли сохраняется со времени её образования. Эвернден попутно доказывает, что знание параметров фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$ ничего не говорит о реальном распределении плотности в Земле.

Джеффрис полагал Землю гидростатичной, однако при этом должно было выполняться правило: $1/H \approx 1/\varepsilon$ [$H = (C - A)/C$], где C и $A = B$ - полярный и экваториальные моменты инерции Земли, $\varepsilon = 5/4 \times \omega^2 a^3/GM$ - сжатие Земли, ω - скорость её вращения, a - экваториальный, c - полярный радиусы Земли, величина, обратная сжатию: $1/\varepsilon = a/(a - c)$. Условие гидростатичности современной Земли, вращающейся с периодом T = 24 часа, выполняется при: $1/\varepsilon = 232$. Как известно, у Земли: $1/H = 305.5$, $1/\varepsilon = 297.8$ и $1/H - 1/\varepsilon = 7.8$, а наблюдаемая разность 6.75. Все это говорит о негидростатичности Земли. Длительность суток T для планеты, имеющей размер Земли и ее среднюю плотность, должна быть равна: $T = 27.2$ часа, а не $T = 24$, как у Земли. Подчеркнем, что наблюдаемый период вращения T соответствует $1/\varepsilon = 232$, причем отметим, что первым вычислил это ещё Ньютон. Для $T = 22$ часа, Эвернден подсчитал: $1/\varepsilon = 200$. Он пришел к заключению, что если Земля замедляет свое вращение, то её сжатие не будет уменьшаться до тех пор, пока длина суток T не станет: $T \geq 27.2$ часа. Или, если Земля вращалась в прошлом быстрее, и её возможная жидкая конфигурация была более сплюснутой, чем сейчас, но её реальное сжатие было бы таким же, как сейчас. Иначе, вывод, к которому приходит Эвернден: Земля никогда не имела сжатия 1/232. Он формулирует следствия из этого вывода. Получается, что у Земли:

- Очень высокая прочность нижней мантии;

- Температура нижней мантии никогда не достигала значений, при которых возникает заметная текучесть под действием ротационных напряжений, т.о. исключается конвекция в нижней мантии;
- Высокая прочность мантии требует, чтобы земное ядро было связано с верхней мантией и корой только с помощью кондуктивного (неконвективного) теплового потока;
- Глубинные мантийные плюмы не могут существовать;
- Отрицая мантийные плюмы, следует отвергнуть гипотезу о том, что граница ядра является источником иридия.

Астеносфера. Согласно общепризнанной концепции тектоники плит, материки и плиты перемещаются по слою астеносферы, находящемуся в литосфере на глубине порядка сотни километров и обладающему особыми свойствами, в частности, пониженной величиной вязкости. Эти зоны обнаруживаются методами сейсмического и электромагнитного просвечивания. Однако, как было показано Алексеевым и др. (1977), эти зоны локализованы в тектонически активных регионах (см. рис. 16-13) и их нет в пассивных областях планеты.

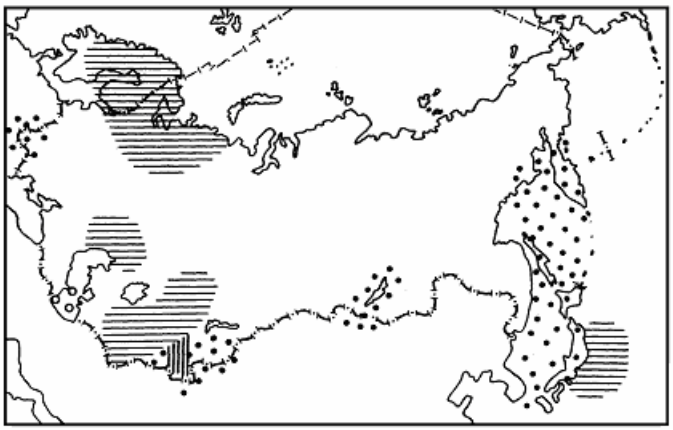


Рис. 16-13. Схема астеносферных зон СССР (Алексеев и др., 1977).

Следовательно, нет того слоя, по которому могли бы дрейфовать плиты и материки. Общепринятая точка зрения относительно того, что причиной понижения скоростей сейсмических волн в астеносфере перегрев вещества вплоть до частичного плавления, тоже подвергается сомнению. Например, Карато считает (Karato, 1990), что изменение термодинамических свойств астеносферы обязано не плавлению, как принято считать, а повышению концентрации водорода в зонах присутствия астеносферы.

Образование океанов. Возможна ли ситуация, чтобы океаны «перетекали» с места на место, как это следует из плитной тектоники? Для выяснения этого вопроса, обратимся к книге Е.М. Рудича (1984), где показано, что в течение последних 160 млн. лет объем Мирового океана значительно увеличился. Эти данные получены на основе анализа результатов глубоководного бурения (более 500 скважин в течение 70 рейсов исследовательского судна «Гломар Челенджер») акватории Мирового океана, исследования разрезов, вскрытых океаническим бурением и оценки толщины океанических осадков.

В результате изучения акватории Мирового океана выяснилось, что имеются как общие черты для трех океанов (Тихого, Атлантического и Индийского), так и весьма существенные отличия Тихого океана от других. Расчеты, приведенные в книге Рудича, демонстрируют, что в течение «последних» 160 млн. лет объем впадины Мирового океана увеличился весьма значительно: по максимальной оценке на 580 млн. км^3. (При глубине океана порядка 4 км, это составляет примерно 1/3 всей поверхности земного шара). Резкое увеличение впадины Мирового океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным

снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины Мирового океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Автор обращает внимание на то, что «… *с позиций мобилистских концепций невозможно объяснить крупное приращение объема Мирового океана. Мобилистские гипотезы исключают возможность заметного изменения объема Мирового океана в течение последних 160 млн. лет*» (Рудич, 1984, с. 232).

Глубоководные желоба. Эти удивительные особенности строения океанического дна принято считать тем местом, где плита ныряет вглубь литосферы. Ранее предполагалось, что океанические осадки должны соскребаться в этом месте и заполнять желоба. Например, только в желобе Кермадек за последние 150 млн. лет должно было поглотиться 13 000 км литосферы (треть окружности Земли!). Можно себе представить, сколько здесь должно скопиться осадков. Как выяснилось, дно желобов, это обнаженные скальные породы без всяких осадков.

Океан Япетус. В тектонике плит принято считать, что примерно 600 млн. лет назад на Земле, на месте современной Северной Атлантики, возник океан шириной около 2-х тыс. км, названный Япетусом. Он отделял Северную Америку от Африки-Европы. Океан сначала разрастался, а затем стал поглощаться в зоне субдукции. Это привело снова к сближению Африки и Европы с Северной Америкой. Несостоятельность этой гипотезы доказывает Кэри (1991). Он тщательно анализирует все геологические и палеомагнитные данные и приходит к выводу, что этого мифического океана никогда на Земле не было.

Парадокс в движении палеомагнитных полюсов.

Данные по местоположению виртуальных магнитных полюсов материков и континентов, приводимые различными авторами для различных геологических эпох, довольно сильно разнятся между собой. Расхождения настолько велики, что восстановление траекторий движения палеополюсов, а по ним - траекторий движения материков в геологическом прошлом, становится лишенным какого-либо смысла. Воспользуемся данными по дрейфу палеополюсов Северной и Южной Америк, Австралии и Африки за последние 240 млн. лет (Tarling, Abdeldayem, 1996). По-видимому, это наиболее достоверные данные. Наш выбор обосновывается тем, что профессор Д. Тарлинг является признанным специалистом по палеомагнетизму и автором известного учебника (Tarling, 1983).

На рис. 16-14 приведены траектории дрейфа палеомагнитных полюсов, определенных по данным, полученным с четырех континентов. Видно, что все зависимости обладают явным соответствием. Например, последние 60 млн. лет полюса дрейфовали по направлению к Северному полюсу практически вдоль меридианов. В более раннее время, характер движения полюсов был другим. Можно видеть, что здесь преобладающими направлениями дрейфа были долготные перемещения МП. На рис. 16-14 можно отметить одновременные (100, 200, 210 млн. лет назад) изменения характера дрейфа для всех четырех траекторий. Наиболее интересен резкий излом в точке, соответствующей 160 млн. лет тому назад. Это явление Тарлинг назвал “экскурсом - 160”, который характерен тем, что его “вектор” (см. рис. 16-14) обращен к тому континенту, где он фиксировался. В трех случаях из четырех (кроме Австралии) экскурс-160 имел направление в сторону более высоких широт. Оценить по рисунку длительность «экскурса» не удалось, т.к. она примерно равна времени дискретизации (10 млн. лет).

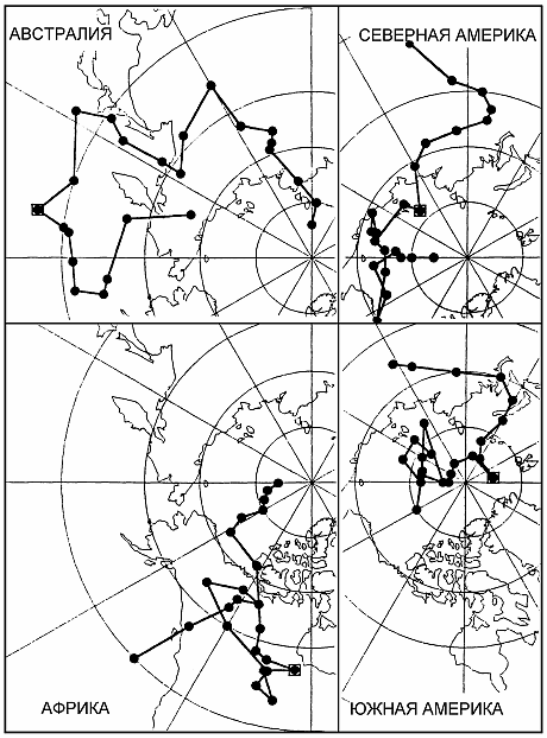


Рис. 16-14. Дрейф ВМП за (10 - 240) млн. лет определенных для Северной Америки, Африки, Австралии и Южной Америки. Прямоугольниками выделены “экскурсы-160” (Tarling, Abdeldayem; 1996).

Рассмотрим внимательнее направление дрейфа ВМП в течение последних 60 млн. лет, когда они дрейфовали в сторону более высоких широт и сравнительно немного отклонялись в долготном направлении. Наибольший интерес для нас представляют траектории дрейфа ВМП, определенные для Австралии и Южной Америки (рис. 16-15). В (Tarling, Abdeldayem, 1996) данные по дрейфу ВМП приводятся, начиная с 10 млн. лет назад. В принципе, мы можем продолжить эти траектории к современному моменту (0 млн. лет). Точка, в которой должны были бы наблюдаться ВМП, в настоящее время имеет координаты: 86°N, 185°E. На этом же рисунке показано местоположение СМП-94 и видно направление его дрейфа. Продолжая траекторию дрейфа СМП, мы также “встретимся” с этой точкой. Возможно, это не случайное совпадение, и эта точка является магнитным полюсом современной эпохи.

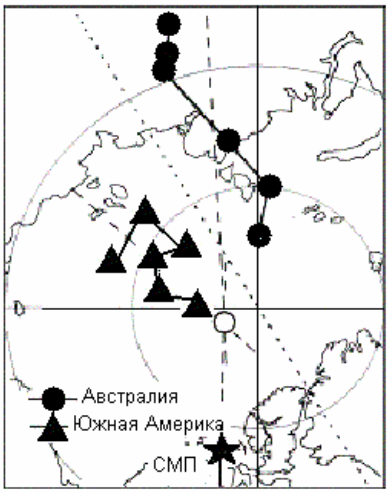


Рис. 16-15. Дрейф ВМП за последние 60 млн. лет. Звездочкой обозначено положение магнитного полюса 1994. Кружком обозначено положение ВМП при приведении траекторий дрейфа к современной эпохе.

Отметим, что направление дрейфа ВМП Южной Америки ориентировано в сторону “своего” материка (где производились наблюдения). Совсем не так ведет себя ВМП Австралии: он дрейфует, удаляясь от “своего” континента (см. рис. 16-15). Обе траектории дрейфа параллельны и скорости дрейфа этих материков примерно равны. Легко показать, что этот парадоксальный факт противоречит современным представлениям.

Литература.

Алексеев А.С., Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н. и др. Схема астеносферных зон Советского Союза. ДАН СССР. Т. 234. № 4. 1977. С. 790-793.

Вегенер А. Происхождение материков и океанов /пер. с нем. П. Г. Каминского под ред. П. Н. Кропоткина. — Л.: Наука, 1984. — 285 с.

Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра. 1984. 110 с.

Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и развитие. М.: ИЛ. 1960. 485 с.

Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир. 1991. 447 с.

Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра. 1984. 250 с.

Эвернден Дж.Ф. О чем говорят параметры фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$? Изв. РАН Физика Земли. № 2.1997. С. 85-94.

Anderle R.J., Malyevac C.A. Current plane motion based on Doppler satellite observation // Geophys. Res. Lett. 1983. V. 10 N. 1. P. 67-70.

Carey S.W. The expanding Earth. Amsterdam. Elsevier. 1976. 486 p.

Karato S-i The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. Nature. 1990. V. 347. P. 272-273.

Kuznetsov V.V. Characteristic features of continental drift // Modern Geology. 1990. V. 14. P. 239-243.

Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth. Science. 1969. V. 166. P. 609-621.

Tarling D.H. Palaeomagnetism. Chapman & Hall. London. 1983.

Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a “small-circle” assessment of the Gondwanan polar-wander path. Geophys. J. Int. 1996. V. 125. P. 115-122.

Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a “small-circle” assessment of the Gondwanan polar-wander path. Geophys. J. Int. 1996. V. 125. P. 115-122.

Vogel K. Recent crystal movements in the light of Earth expansion theory. 6th International Symposium “Geodesy and Physics of the Earth”. Potsdam. 1989. P. 284-289.

Глава 17. Геодинамика.

В главе 17 рассмотрены: принцип минимизации гравитационного потенциала самогравитирующего шара и модель растекающейся капли. Скорости дрейфа. Явления геодинамики в контексте принципа минимизации гравитационного потенциала: спрединг и субдукция в модели горячей Земли, высота геоида, гравитационные аномалии. Течение литосферы и образование гор и их высота. Модель плюма, его образование, выход плюма на поверхность Земли. Суперхроны и суперплюмы.

Термин "геодинамика" приобрел в течение последних 40 лет особую популярность в науках о Земле в связи с созданием и интенсивным внедрением в эти науки плитной тектоники. В более широком плане, под геодинамикой подчас понимают движения в коре, мантии и ядре Земли. Иногда сюда же относят и ту область науки, которую Дж. Педлоски (1984) выделил в геофизическую гидродинамику. Реже, к геодинамике относят динамику ионосферы и магнитосферы.

В этой книге рассмотрены некоторые вопросы геодинамики, имеющие отношение к модели горячей, расширяющейся и пульсирующей Земли. Геологические и, естественно, геодинамические аспекты расширяющейся Земли изучены и подробно описаны в ряде статей и монографий. Следует выделить фундаментальные труды австралийского геолога профессора С.У. Кэри (Carey, 1976; Кэри, 1991).

Развиваемые в этой книге идеи относятся к области науки, называемой геофизической гидродинамикой. В этой главе рассмотрены ряд вопросов, которые, по сути, относятся к разделу физики «Гидродинамика». По-видимому, правильно было бы включить сюда и физику землетрясения, как раздел гидродинамики, изучающий физику ударных волн, в том числе и в твердом теле. Однако это нарушило бы целостность главы, посвященной одному из крупнейших разделов физики Земли - сейсмичности.

Геодинамика (тектоника плит) занимает "ключевую" позицию в современной геологии, однако, именно здесь скопилось наибольшее количество неразрешенных вопросов, противоречий и парадоксов. Перечислим некоторые из них:

- Несоответствие степени сжатия современной Земли и скорости её вращения (показывающее отсутствие глобальной конвекции в мантии);
- Несоответствие между незначительным увеличением периметра Тихого океана и идей распада Пангеи – Гондваны, парадокс Мезервея, показывающий невозможность расположения Гондваны на Земле современного радиуса;
- Нестыковка палеомагнитных оценок положений полюсов, направлению дрейфа материков (отрицающая общепринятый в палеомагнитологии подход);
- Несоответствие фактических данных о Земле, её ядре, мантии, форме геоида и гравитационным аномалиям, идее конвекции в мантии и роли субдукции в этой конвекции и т.п.

В главе 17 обсуждается попытка найти решение этих проблем в контексте модели горячей, расширяющейся Земли.

17. 1. Принцип минимизации гравитационного потенциала самогравитирующего шара.

Известно, что Земля, все другие планеты Солнечной системы и семь больших спутников имеют форму шара. Однако мало кто обращает внимание на этот общеизвестный факт, который, тем не менее, указывает на то, что и Земля, и другие планеты подвержены действию какого-то механизма, приводящего к тому, что планеты принимают именно такую форму. Найти объяснение этому феномену в рамках общепринятой модели холодной Земли не удается. Действительно, если пылинки и небольшие кусочки вещества, формируя Землю, будут слипаться вокруг одного из них, то

почему образующийся в этом процессе «большой камень» должен принять форму шара? На такой, казалось бы, очевидный вопрос, общепринятая модель образования Земли ответа не имеет.

Рассмотрим принцип минимизации гравитационной энергии, выполнение которого выражается как требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара. Выполнение этого принципа предполагает, что вещество планеты после её образования изначально было очень горячим: частично, - расплавленным, частично, в газообразном (метастабильном, плазменном) состоянии. В процессе эволюции планеты её вещество остывало, конденсируясь и кристаллизуясь. При этом, естественно, должен меняться и объем планеты, т.е. планета в течение эволюции ведет себя как динамическая система. В центре некоторых планет (на Земле, например) до сих пор сохранилось вещество в «первородном», газообразном, метастабильном состоянии. Вещество из метастабильного состояния превращается в обычное состояние, претерпевая фазовый переход первого рода: конденсация-испарение. Вещество при этом переходит в менее плотную, чем в момент образования, фазу, а сама планета – расширяется. Процесс эволюции планеты представляет собой череду сменяющих друг друга циклов расширения и сжатия, при преимуществе расширения над сжатием (Кузнецов, 1997). Принцип минимизации действует только во время эволюции планеты, по окончании этапа эволюции, - действие Принципа прекращается.

Обратим внимание на ряд моментов, в той или иной степени связанных с гравитационной энергией и принципом её минимизации у Земли и планет. Принцип минимизации “заставляет” планеты (в недрах которых ещё могут происходить фазовые переходы) стремится к гидростатическому равновесию (рис. 17-1). Пути достижения этой цели известны, это дрейф материков, образование гор, сейсмичность и вулканизм. Действие принципа минимизации автоматически приводит к гравитационной дифференциации вещества планеты и т.д.

В чем причина движения материков, какова физика явлений, происходящих в зонах спрединга и субдукции, возможна ли глобальная конвекция в мантии или нет, почему сжатие Земли не соответствует её гидростатическому равновесию? Эти и многие подобные вопросы не находят убедительного ответа в концепции плитной тектоники. В подтверждение сказанному приведем несколько примеров. Движение материков можно считать установленным фактом, однако, наличие корней материков и гор, которые должны бы были «цепляться» за «дно» и не давать скользить им по астеносфере, вызывают сомнение у многих геологов. Можно добавить сюда тот факт, что астеносфера представляет собой совсем не гипотетичный сплошной слой малой вязкости, как это предполагается в плитной тектонике. Астеносфера обнаруживается реально далеко не повсеместно, она присутствует только в некоторых регионах, в виде отдельных «пятен» не связанных друг с другом (Алексеев и др., 1977). Более того, малая величина скоростей сейсмических волн и повышенная электропроводность астеносферы может быть, например, объяснена не расплавленным состоянием литосферы, а лишь повышенной концентрацией водорода в ней (Karato, 1990).

В зонах субдукции где, согласно плитной тектонике, одна плита «ныряет» под другую, казалось бы, должно наблюдаться, что та часть плиты, которая находится ближе к зоне субдукции, должна быть «старше» другой части плиты, возраст которой моложе. Это один из основных постулатов плитной тектоники. Однако, любому, проявившему интерес к этой проблеме, не нужно большого внимания для того, чтобы убедиться, что в действительности это не всегда так. Обратимся к картам (Карта .., 1981; Plate-tectonic map .., 1985) и увидим, что в районе Японии мезозойские инверсии М1, М2 и т.д., возраст

которых 115 млн. лет, значительно ближе к зоне субдукции, чем инверсии М29, возраст которых 150 млн. лет. Вывод, который можно сделать из этого наблюдения, заключается в том, что плита скорее не «ныряет» под Японию в зоне глубоководных желобов, а наоборот, «вынырнула» оттуда примерно 100 млн. лет тому назад. Ранее, к аналогичному выводу пришел автор работы (Чудинов, 1981), назвав это явление, в противовес общепринятому, - эдукцией. Глубоководные желоба, - это наиболее глубокие "шрамы" на поверхности Земли, полученные более 100 млн. лет тому назад. По всей видимости, в настоящее время Земля стремится «залечить эти шрамы». Современная геодинамика, сейсмичность и вулканизм, это средства механизма такого «залечивания».

Тектоника плит, так же как идея железного ядра и гидромагнитного динамо, занимает в науках о Земле положение, идентичное тому, которое имеют в физике уравнения Максвелла, или теория относительности. Это ситуация явно ошибочна, например, тектоника плит (как и геомагнитное динамо), кроме многих прочих, не может ответить на самый элементарный вопрос: что представляет собой источник энергии, находящийся в недрах Земли. Источник, который приводит к таким колоссальным перемещениям земного вещества, вещества, жесткость которого, - не уступает жесткости стали. Этот источник обеспечивает Земле тепловой поток и способность к генерации геомагнитного поля. Кроме этого, такие важные моменты физики Земли, как её негидростатичность, особенности свойств геоида, да и вообще тот факт, что Земля – шар, как-то выпали из области интересов плитной тектоники. В настоящей работе мы рассмотрим именно эти вопросы и начнем с обсуждения давно привычного для человечества факта, что Земля, - это шар.

Принцип минимизации. Гравитационный потенциал φ удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta\varphi = -4\pi G\rho. \qquad (17.1)$$

Здесь G – гравитационная постоянная, ρ - плотность вещества. Решение уравнения (17.1) записывается в виде:

$$\varphi = G\int(\rho dV)/r + C, \qquad (17.2)$$

r - расстояние между элементом объёма dV и точкой, в которой определяется потенциал φ, C – постоянная. Потенциал φ определим и интеграл (2) сходится в случае, когда при $r\rightarrow\infty$, ρ убывает быстрее, чем r^{-2}. Если $\rho = const$, то интеграл (2) расходится и состояние формы гравитирующего шара оказывается неустойчивым.

Потенциал притяжения $r\varphi$ является функцией, регулярной на бесконечности, то есть. $\lim_{(r\rightarrow\infty)}(r\varphi) = GM$, при этом сама функция φ стремится к нулю: $\lim_{(r\rightarrow\infty)}\varphi = 0$. Принято представлять потенциал силы тяжести реальной Земли $W(x, y, z)$ как сумму:

$$W(x, y, z) = \varphi(x, y, z) + \xi(x, y, z), \qquad (17.3)$$

где $\varphi(x, y, z)$ - потенциал сфероида, а $\xi(x, y, z)$ – возмущающий потенциал, т.е. часть потенциала, связанная с аномалиями силы тяжести. Уравнение (4) называется уравнением геоида, где $T = const$.

$$W(x, y, z) = \varphi(x, y, z) + \xi(x, y, z) = T. \qquad (17.4)$$

Рассмотрим семейство уровенных поверхностей потенциала W. Предположим, что через некоторую точку проходит уровенная поверхность: $W(x, y, z) = T$. Если $\xi(x, y, z) = 0$, то уровенная поверхность соответствует нормальному сфероиду $\varphi(x, y, z) = T$. Добавим к $\varphi(x, y, z)$ некий малый потенциал $\xi(x, y, z)$. Тогда положение рассматриваемой уровенной поверхности изменится и некая точка P, находящаяся на этой поверхности, переместится в точку P'. Расстояние между точками P' и P обозначим Δn, тогда:

$$\Delta n = N = -\xi/(\partial\varphi/\partial n) = \xi/\gamma, \qquad (17.5)$$

где $\gamma = - \partial\varphi/\partial n$ – производная функции φ. Запишем основное уравнение гравиметрии, связывающее аномалии силы тяжести Δg с величиной возмущающего потенциала:

$$\Delta g = 1/\gamma\,(\partial\gamma/\partial n)\;\xi \; - \partial\xi/\partial n. \qquad (17.6)$$

Уравнения (5, 6) показывают связь аномалии силы тяжести Δg с величиной возмущающего потенциала ξ и высотой геоида N.

Равновесной формой самогравитирующего изотропного тела, обладающего фазовой поверхностью, как известно, является шар. С другой стороны, в соответствии с принципом Гиббса-Кюри, форма шара присуща жидким изотропным телам в отсутствие внешних полей. В этом случае равновесная форма шара определяется минимумом свободной поверхностной энергии:

$$\alpha \int dS = \min, \; (V = \text{const}). \qquad (17.7)$$

Здесь α - поверхностное натяжение, S - площадь поверхности раздела фаз, V – объем шара. Приобретение телом шарообразной формы, как в случае самогравитации, так и при проявлении поверхностных эффектов в жидкости, базируются на общем для обоих случаев принципе пространственной корреляции структуры вещества и эффекте возникновения дальнего порядка. Возникновение дальнего порядка (упорядоченной фазы) имеет в физике фундаментальный характер. Как при самогравитации, так и при образовании фазовой поверхности, частицы вещества «чувствуют» не только ближайших к ним соседей, но и весь их «ансамбль», Причиной возникновения дальнего порядка в самогравитирующей структуре может быть, например, континуальное вращение планеты, или, как показано в (Tsallis, 1988), негиббсовская термодинамика самогравитирующих структур.

Представим себе, что дальний порядок устанавливается в объеме фазовой границы самогравитирующего тела. Допустим, что слой фазовой границы примерно соответствует земной коре толщиной z. Предположим, что именно в этом слое реализуется принцип минимизации площади S. Сила притяжения слоя: $dF = (GMdM)/r^2$, его гравитационная энергия $dE = (GMdM)/r$. Приравняем гравитационную энергию слоя литосферы толщиной z, энергии «поверхностного натяжения»: $(GMdM)/r \approx \alpha \int dS$.

Отсюда получим выражение принципа минимизации гравитационного потенциала:

$$G\,M\,dM/r \rightarrow \min. \qquad (17.8)$$

Полученное выше равенство позволяет оценить величину α:

$$\alpha = G\,M\,z\,\rho/R. \qquad (17.9)$$

Подставляя значения для гравитационной постоянной, массы Земли, толщины слоя ($z \approx 10$ км), плотности литосферы и радиуса Земли, получаем величину α порядка 10^{19} дин/см.

Принцип минимизации гравитационной энергии планеты и его роль в процессах, происходящих на поверхности планеты, заключается в том, что площадь фазовой поверхности самогравитирующего шара радиусом R стремится быть минимальной. В нашем случае фазовой поверхностью является поверхность геоида. Ниже рассмотрим следствия, вытекающие из этого принципа и механизмы его реализации.

Как известно, сила поверхностного натяжения заставляет жидкость, находящуюся вне внешних сил, принимать форму шара, а жидкость, смачивающую поверхность сосуда, подниматься на высоту h около его стенки и т.п. Модель “растекающейся капли” иллюстрирует некоторые характерные моменты реализации Принципа. Представим себе, что капля жидкости в виде полусферы попадает на дно стакана с идеально смачиваемой поверхностью и вертикальными стенками, и начинает растекаться (рис. 17-2-a, b).

Начальная высота капли H, радиус стакана R ($R >> H$), поверхностное натяжение жидкости α, капиллярная постоянная $a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}$, g - сила тяжести, ρ - плотность жидкости. Объем капли $2/3 \times \pi H^3$, объем растекшийся на дне стакана жидкости без учета краевых эффектов пленки жидкости на стенке стакана $\pi R^2 \delta$. Краевой угол, образуемый смачивающей жидкостью со стенкой стакана, обозначим θ, высоту подъема жидкости – h (см. рис. 17-2-b). Поверхность растекающейся капли, не плоская, а имеет некий радиус кривизны X, причем может оказаться, что в разных местах поверхности окажутся различные значения X ($X_1 \neq X_2$). Этот эффект приведет к появлению т.н. поверхностного лапласового давления Δp: $\Delta p = \alpha(1/X_1 + 1/X_2)$. При условии, что поверхность жидкости плоская и при условии: $X_1 = X_2 = \infty$, $\Delta p = 0$. Сила поверхностного натяжения заставляет жидкость подниматься вверх на высоту h около стенки сосуда:

$$h = a(1 - sin\theta)^{1/2}. \qquad (17.10)$$

Предположим, что в зонах субдукции и регионах образования гор происходят явления, близкие по характеру с краевыми эффектами при смачивании «стенки жидкой пленкой». Величину поверхностного натяжения» α можно оценить, если воспользоваться формулой: $a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}$, капиллярную постоянную a можно получить из (10), подставив в неё данные для зоны субдукции, приведенные в (Harabaglia, Doglioni, 1998). Если принять величину краевого угла $\Theta \approx 87°$, а высоту $h \approx 6$ - 8 км, то, $a \approx 500$ - 1000 км. Полученное таким образом значение величины "поверхностного натяжения" литосферы соответствует предыдущей оценке: $\alpha \approx 10^{19}$ дин/см. (Для сравнения, α воды 70 дин/см).

Предположим, что поверхность тела отличается от сферической, и можно говорить о том, что фигуру тела можно описать двумя радиусами R_1 и R_2 (немного отличающимися друг от друга). В этом случае на поверхности тела возникает поверхностное давление $p(\alpha)$:

$$p(\alpha) = \alpha\,(1/R_1 + 1/R_2) \approx 2\alpha/R. \qquad (17.11)$$

Это известная формула Лапласа. Отсюда следует условие равновесия поверхности:

$$1/R_1 + 1/R_2 = \text{const}. \qquad (17.12)$$

Если поверхность тела свободна, то это условие означает, что тело должно иметь шарообразную форму. Выполнение условия равновесия поверхности Земли, следующего из соблюдения Принципа, без учета её вращения, приводит к тому, что Земля, вернее её геоид, стремится принять форму шара. Если учесть вращение, то равновесной формой Земли, - будет сфероид, эллипсоид вращения. Поверхностный слой Земли (но не вся Земля) достигнет гидростатического равновесия в тот момент, когда высота геоида в целом по Земле окажется равной нулю.

Если принять во внимание значение величины "поверхностного натяжения" литосферы α, ($\approx 10^{19}$ дин/см), то поверхностное, лапласово давление оказывается вполне существенным: $p(\alpha) = 10$ кбар. Такое давление способно "заставить" поверхностный слой литосферы растекаться, аналогично тому, как это происходит с каплей жидкости. Для сравнения, оценим величину давления $p(N)$, возникающего за счет «дефицита массы», образующегося за счет разности в радиусах эллипсоида вращения и геоида (высоты геоида N) (Kuznetsov, 1990): $p(N) = \rho g N$. = 30 бар. (Реально, никакого «дефицита массы» быть не может, т.к. масса объема геоида равна массе объема сфероида). Величина $p(N)$ оказывается значительно (~ в 300 раз) меньше $p(\alpha)$. Давление такой величины уже не может приводить к растеканию слоя литосферы по поверхности Земли. В свою очередь, давление $p(\alpha)$ стремится, в соответствии с Принципом минимизации гравитационного потенциала, минимизировать высоту геоида таким образом, чтобы Земля приняла форму эллипсоида вращения (сфероида). Соответствующая поверхностная сила и вектор скорости растекания литосферы ориентированы вдоль градиента геоида из областей, где высота геоида принимает максимальные значения $|N|$ в направлении области, в которой

$N \rightarrow 0$. Эту область, где $N = 0$, область притяжения, - можно считать своеобразным аттрактором.

Рассмотрим, на каких объектах может проявляться действие Принципа. Можно ли оценить тот минимальный размер космического объекта, когда Принцип "начинает работать"? Следуя модели горячей Земли (Кузнецов, 2006), далеко не любой космический объект способен "собираться в каплю" и принять форму шара. Это может произойти лишь в том случае, если выполняется правило: $GM/R \geq U_{\Pi}$, где U_{Π} - теплота плавления вещества планеты ($U_{\Pi} \approx 1$ кДж/г). При этом R планеты (спутника) должен быть > 1 тыс. км. Таким образом, только 7 больших спутников и все планеты Солнечной системы подвержены действию Принципа. Надо заметить, что действие Принципа может проявляться до тех пор, пока вещество космического тела полностью не релаксировало, т.е. в его недрах еще осталось вещество в метастабильном состоянии, подобное тому, что находится во внутреннем ядре Земли (Кузнецов,1997; Кузнецов, 2006).

Решение (17.2) уравнения (17.1) устойчиво только в том случае, если плотность вещества гравитирующего шара не постоянна по радиусу. Определим распределение плотности гравитирующего шара, исходя из принципа минимизации гравитационной энергии (Шен, 1984). Запишем требование минимума функционала, описывающего гравитационную энергию шара, в форме (Магницкий, 1965):

$$\Omega = -2\pi \int_0^R \varphi \rho r^2 \, dr, \tag{17.13}$$

где φ – гравитационный потенциал, $\rho = \rho(r)$ - плотность, R - радиус шара (планеты). Минимизировать функционал можно посредством преобразования функции $\rho = \rho(r)$. Эта функция должна удовлетворять заданным значениям массы планеты M и момента инерции I:

$$M = 4\pi \int_0^R \rho r^2 \, dr, \tag{17.14}$$

$$I = 8/3 \, \pi \int_0^R \rho r^4 \, dr. \tag{17.15}$$

Определим распределение плотности по радиусу гравитирующего шара:

$$\rho_{max}(r) \geq \rho(r) \geq \rho_{min}(r), \quad 0 \leq r \leq R.$$

Для определения закона распределения плотности, удовлетворяющего принципу минимизации гравитационной энергии шара, эти условия необходимы и достаточны. Решение имеет вид (Шен, 1984; Шен, 1991):

$$\rho(r) = \rho_{max}(r), \quad 0 \leq r \leq R.$$

Этот результат соответствует однородности планеты в начальном состоянии равновесия. Решение включает и тот случай, когда планета неоднородна, но компоненты ее вещества равномерно перемешаны. При этом возможно протекание процессов гравитационной дифференциации. (Заметим, что возникающий при этом вопрос о неизменности радиуса планеты принято считать очевидным и не подлежащим обсуждению).

Ситуация с возможным переносом (перераспределением) массы планеты в процессе её эволюции вполне обоснована. Оценим величину и направление перемещения массы вещества внутри планеты, которое привело бы к наименьшему значению гравитационной энергии при неизменной массе и моменте инерции. Отличием этой задачи от предыдущей является то, что нуль становится внутренней точкой области допустимых

значений вариации $\delta\rho(r)$ для каждой точки $r_o \le r \le R$. Решение задачи оказывается разрывным:

$$\begin{aligned} \delta\rho(r) &= \delta\rho_{max}(r), \qquad 0 \le r \le r_G, \\ \delta\rho(r) &= \delta\rho(r), \qquad r_G \le r \le r_o, \\ \delta\rho(r) &= \delta\rho_{min}(r), \qquad r_o \le r \le R. \end{aligned} \tag{17.16}$$

Здесь $\delta\rho_{max}$, $\delta\rho$, и $\delta\rho_{min}$ - границы области допустимых значений $\delta\rho(r)$, а r_o и r_G - первая и вторая точки разрыва непрерывности вариации.

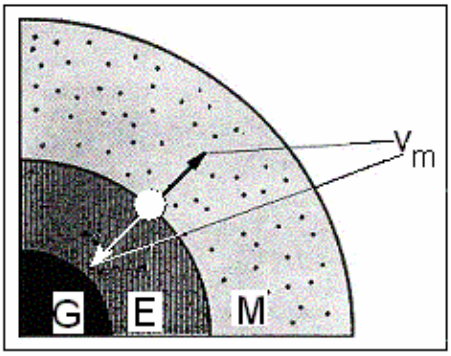


Рис. 17-1. Перенос массы: «положительный» (наружу, в направлении увеличения радиуса Земли) при формировании мантии и "отрицательный" (внутрь), - при формировании внешнего ядра, при условии соблюдения постоянства момента импульса ($+V_m = -V_m$).

Согласно (17.16) однородная Земля превращается в многослойную. Это превращение может происходить только при увеличении объема Земли. Реализация принципа минимизации гравитационной энергии при постоянстве массы и момента инерции планеты - приводят к выводу об её расширении в процессе эволюции. Использование этого Принципа естественным образом ведёт к минимизации времени образования планеты, во-первых. Во-вторых, перемещение вещества планеты в радиальном направлении при превращении однородной модели в многослойную, автоматически, при соблюдении постоянства момента импульса, сопровождается перемещением массы в обратном направлении. Таким образом, Земля, как самогравитирующий шар, - это саморегулирующаяся, самоорганизующаяся система в терминах теории самоорганизации и оптимальных процессов.

Модель растекающейся капли. Очевидно, что физика "растекающейся капли" не может иметь прямой аналогии с процессами, связанными с изменениями высот геоида. Тем не менее, такая аналогия иллюстрирует некоторые характерные моменты нашей модели. Представим себе, что капля жидкости в виде полусферы попадает на дно стакана с идеально смачиваемой поверхностью и вертикальными стенками, и начинает растекаться. Начальная высота капли H, радиус стакана R ($R >> H$), поверхностное натяжение жидкости α, капиллярная постоянная $a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}$, g - сила тяжести, ρ - плотность жидкости. Объем капли $2/3\pi H^3$, объем растекшийся на дне стакана жидкости без учета краевых эффектов пленки жидкости на стенке стакана $\pi R^2\delta$. Краевой угол, образуемый смачивающей жидкостью со стенкой стакана, обозначим Θ, высоту подъема жидкости - h. Поверхность растекающейся капли не плоская, а имеет некий радиус кривизны X, причем может оказаться, что в разных местах поверхности окажутся различные значения X ($X_1 \neq X_2$). Этот эффект приведет к появлению т.н. поверхностного лапласового давления Δp:

$$\Delta p = \alpha(1/X_1 + 1/X_2).$$

При условии, что поверхность жидкости плоская, иначе: $X_1 = X_2 = \infty$, $\Delta p = 0$.

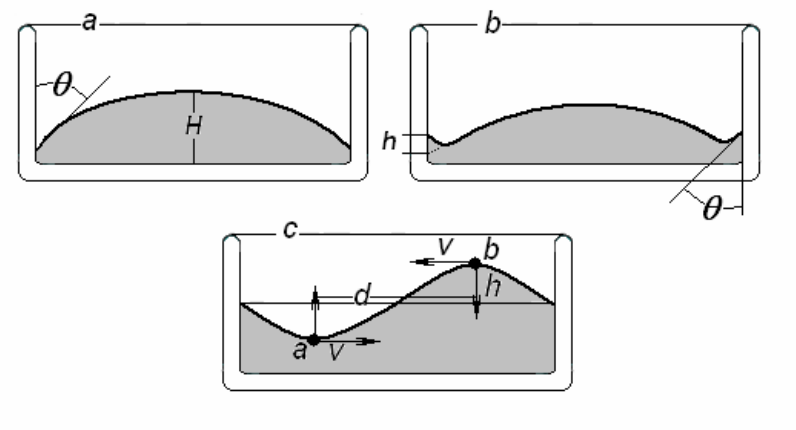


Рис. 17-2. Модель растекающейся капли.

Очевидно, что скорость растекания вещества капли, т.е. скорость перемещения фронта жидкости вдоль поверхности дна стакана $v_R = dR/dt$ намного больше скорости уменьшения высоты капли $v_H = dH/dt$: т.е. $dR/dH \sim H/R$. При растекании капли на границе жидкости с поверхностью дна и окружающем воздухом возникают три силы: сила растекания, сила трения и сила поверхностного натяжения. Эти силы не уравновешены и для их равновесия возникает сила направленная вертикально вверх. Эта сила заставляет тонкую пленку, на которой находится растекающаяся капля, загибаться вверх, как бы обворачивая каплю. Именно эта сила заставляет жидкость подниматься вверх на высоту h около стенки сосуда:

$$h = a(1 - \sin\theta)^{1/2}. \qquad (17.17)$$

Растекание капли вызывает появление капиллярных волн при условии: $k \geq 1/a$, где k - волновое число. Частота капиллярных волн $\omega^2 = (\alpha/\rho)\, k^3$ (Ландау, Лифшиц, 1986).

17. 2. Спрединг и субдукция в модели горячей Земли.

Как известно, 80-90 % землетрясений на Земле происходят в областях, называемых зонами субдукции, областях, расположенных, в своей значительной части, по окраинам Тихого океана. Зоны субдукции находят не только в океане, например, к ним относят Карпаты, Гималаи и Апеннины и т.п. Как следует из плитной модели, в этих зонах плита “ныряет” в литосферу, с той целью, чтобы вновь “появиться” на поверхности Земли в зонах спрединга. Эта идея общепринята большинством геологов мира, хотя даже не очень внимательный взгляд позволяет выявить многие несоответствия этой модели наблюдениям. Во-первых, казалось бы, сейсмичность Земли должна была бы делиться примерно поровну между зонами субдукции и зонами спрединга. Ведь эти процессы - “стороны одной медали”. На самом деле, это совсем не так. Легко убедиться в том, что сейсмичность зон спрединга ничтожна по сравнению с сейсмичностью зон субдукции. Во-вторых, согласно постулатам тектоники плит, в зоне субдукции должна находиться наиболее “старая” часть плиты и, по мере её удаления от зоны погружения, плита должна быть все более “молодой”. Однако это правило нарушается на северо-востоке Тихого океана. В-третьих, скорости движения плит в зонах субдукции составляют, по порядку величины, до десяти см в год, а направление их движения подчас совпадает с направлением, следующим из тектоники плит. Однако подобного явления нет и в помине в районе зон спрединга. Палеоследы такого дрейфа есть, это хорошо изученные полосовые магнитные аномалии, но в настоящее время спрединг, как механизм формирования земной коры и литосферы, “выключился и не работает”. Имеются данные, что последний раз спрединг “включался” с 20 до 12 тысяч лет тому назад, во время последнего экскурса магнитного поля Земли, а в течение последних 12 тыс. лет, он был “выключен”. Почему плита в Тихом океане движется со скоростью 10 см/год, хотя таких

скоростей не фиксируется в зонах спрединга? Должен ли соблюдаться баланс между количеством вещества, генерируемого в зонах спрединга и поглощаемого в зонах субдукции? На многие из подобных вопросов плитная тектоника не находит ответов. Рассмотрим, может ли ответить на них наша модель горячей Земли.

Спрединг. Спрединг логично следует из нашей модели - модели расширяющейся Земли. Собственно спрединг является "инструментом" её расширения. Как мы отмечали в предыдущих главах, радиус внешнего ядра, в рамках нашей модели, остается неизменным. На его границе реализуется кристаллизация вещества мантии, "излишки" которого, либо путем регулярного спрединга, либо путем образования плюмов, "сбрасываются", попадают в область земной коры и приводят к увеличению её поверхности. В течение последних 200 млн. лет увеличивается в основном поверхность океанов. Ранее мы выделяли два типа расширения: "тихоокеанический" и "атлантический" (Кузнецов, 1990). В этом параграфе мы иллюстрируем их различия на примере анализа полосовых магнитных аномалий. Будем использовать карты осей палеомагнитных аномалий мирового океана (Карта .., 1981) и карту плитной тектоники района Тихого океана (Plate-tectonic map, 1985).

Беглый взгляд на характер раздвижения материков позволяет выявить две основные особенности этого процесса. Первая состоит в том, что по мере приближения из прошлого к настоящему, скорость увеличения площади поверхности океанического дна постоянно возрастает. Грубые оценки показывают, что разрастание океанического дна примерно пропорционально t^2, где t - время эволюции Земли. Вторая особенность заключается в заметном различии характера раздвижения, вернее, характера наращивания океанической коры. Легко выделяются два различающихся процесса (и, очевидно, механизма) образования океанической коры. К первому, наиболее широко обсуждаемому, отнесём, так называемый, "атлантический" тип. Суть его состоит в том, что после раскола древнего материка, в зоне раскола стал действовать механизм спрединга в зоне срединно-океанического хребта, возникла астеносферная зона, с толщиной h убывающей с расстоянием от срединно-океанического хребта как: $h \sim t^{1/2}$. Наращивание океанической коры в зоне срединно-океанического хребта (СОХ) сопровождалось постепенным отодвиганием материков друг от друга (по стрелкам). В образованной океанической коре атлантического типа можно выделить: инверсии и соответствующие им полосовые магнитные аномалии последних 80 млн. лет; зона мелового суперхрона (80-120 млн. лет назад); затем зона мезозойских инверсий (120 - 160) и, наконец, зона спокойного поля юрского суперхрона (см. рис 17-3-а).

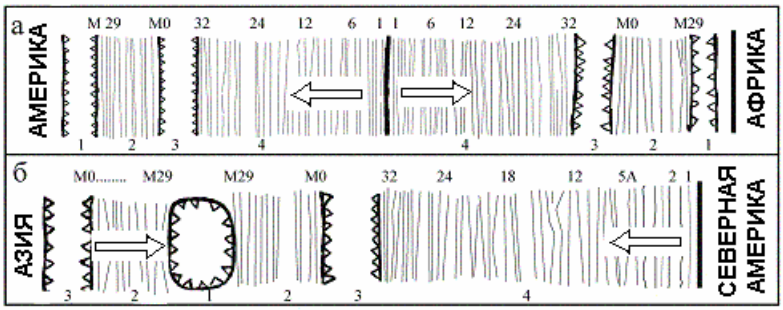


Рис. 17-3. Структура спрединга Атлантического (а) и Тихого океана (б) по данным о полосовых магнитных аномалиях, где выделяются зоны: 1 – юрского суперхрона; 2 – мезозойских аномалий; 3 – мелового суперхрона; 4 - «современных» аномалий. Стрелки показывают направление дрейфа.

Совсем иначе наращивалась океаническая кора в западной части Тихого океана. Здесь реализовывался т.н. "тихоокеанический" тип наращивания океанической коры. Его суть, в

отличие от атлантического, заключается в том, что первоначально в океане наращивалась зона, соответствующая юрскому суперхрону. Вокруг неё расположена зона мезозойских инверсий, далее следует - она мелового суперхрона (в виде «полумесяца») и, наконец, зона инверсий “последних” 80 млн. лет (см. рис 17-3-б и 17-4). Рисунок 17-4 дает представление о возможном пути формирования дна Тихого океана. Исходная ситуация 17-4-1 соответствует началу расширения Земли, росту мантии, разрастания океанов и образования юрской зоны “свободного поля” (ориентировочно 300 - 200 млн. лет тому назад).

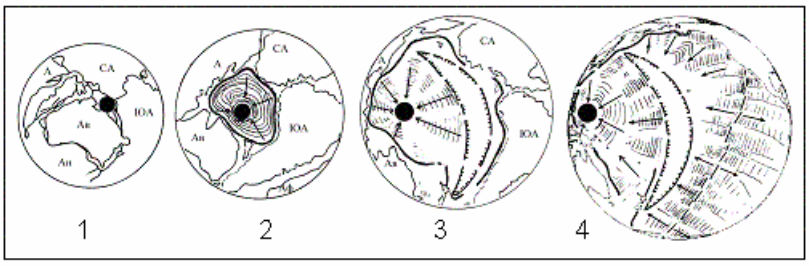


Рис. 17-4. Фазы спрединга Тихого океана: 1 – 200 млн. лет назад; 2 – 120; 3 – 80 млн. лет назад; 4 – настоящее время. Черный круг – юрский суперплюм, «полумесяц» – меловой суперплюм; жирная линия – желоба; стрелками показано направление спрединга.

Второй этап (рис. 17-4-2) эволюции связан с мезозойскими инверсиями (160 - 110 млн. лет). Третий (рис. 17-4-3) - с возникновением мелового суперплюма-суперхрона (110 - 80 млн. лет) и, наконец, последний рисунок (рис. 17-4-4) показывает современную ситуацию. Складывается впечатление, что спредиингг в восточной части Тихого океана, на начальном этапе (рис. 17-4-1) представлял собой расширяющуюся «трубу», действие которой постепенно прекращалось со временем эволюции. Окончание работы этого этапа спрединга приходится на точку в Тихом океане, граничащую с Австралией. Спрединг постепенно затухал, «перемещаясь» от этой точки по часовой стрелке примерно до современного Ванкувера, где около 40 - 50 млн. лет тому назад образовался и начал функционировать срединно-океанический хребет (СОХ), подобный Атлантическому. Можно видеть, что Тихий океан раскрывался, формируя своеобразную спираль Архимеда, чем-то напоминающую раковину улитки.

Отметим, что зона юрского суперплюма соответствует Тихоокеаническому поднятию и практически совпадает с максимальной на Земле высотой геоида. Вторая область поднятия геоида соответствует центральной части Атлантического СОХ.

Ранее, в главе 04, был вскрыта особенность характера спрединга, связывающая глубину астеносферной зоны h и время эволюции t. Принято считать, что в зонах спрединга: h(км) $\approx 10\ t^{1/2}$ (млн. лет). Сравним эту зависимость, с полученной нами ранее аналогичной зависимостью глубины h для Земли в целом: $h = 100\ t^{1/2}$. Аналогичную зависимость можно построить для астеносферы в районе Байкала: $h = 1.8\ t^{1/2}$ для коры и верхней мантии и $h = 5.6\ t^{1/2}$ для нижней мантии. Общность этих зависимостей лишний раз убеждает нас в том, что Земля последние 300 – 500 млн. лет расширялась посредством реализации спрединга. Радиус Земли изменялся следующим образом: $R \sim t^2$, а глубина астеносферы: $h \sim t^{1/2}$. Различные коэффициенты перед $t^{1/2}$ показывают лишь “долю” каждого “участника” в этом процессе.

Субдукция. Механизм спединга, связанный с образованием СОХ и разрастанием дна океанов, более или менее понятен в рамках нашей модели. В то же время такое явление как субдукция, несмотря на то, что появились сообщения о новой геологической специальности - “субдуктология”, остается “темным местом” в физике Земли.

Надо сказать, что зоны субдукции усиленно изучаются, и в последнее время в печати появились весьма интересные результаты наблюдений. Их осмысление позволяет предложить принципиально новую модель субдукции. Однако прежде чем перейти к этому вопросу, упомянем ряд оригинальных исследований зоны субдукции, имеющих, по нашему мнению, отношение к проблеме.

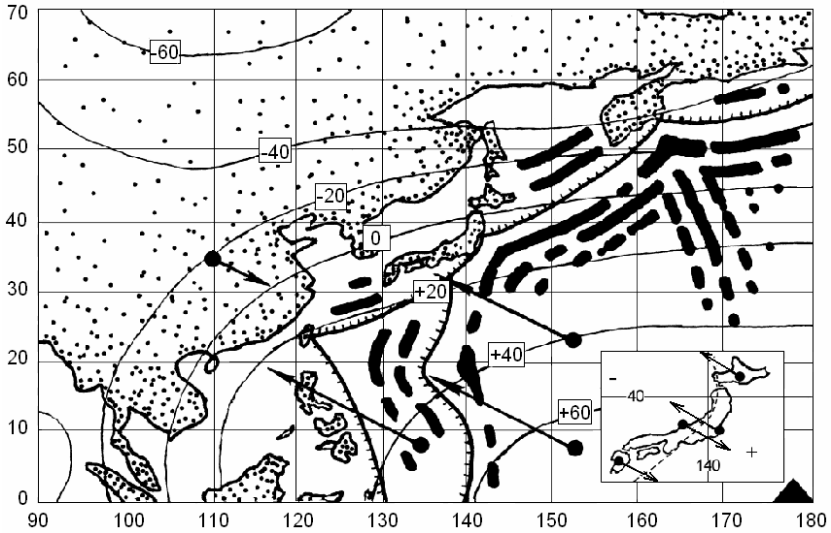


Рис. 17-5. Карта высот геоида (цифры в квадратах - метры), гравитационных аномалий (черные полосы), направлений (стрелки) и величин дрейфа (длина стрелок) материков и плит (Lewis, Smith, 1998; Маслов, 1988; Kato, et al. 1998). Черный треугольник внизу справа показывает положение точки с максимальным значением высоты геоида. В правом нижнем углу рисунка (вставка) показаны направления скоростей дрейфа литосферы, измеренные в Японии с помощью GPS-системы (Imakire, 2000). Штриховая линия, это линия геодинамического равновесия (аттрактор). При достижении равновесия встречные скорости дрейфа равны нулю.

Данные. В последние годы, в область космической геодезии, в дополнение к системам лазерной локации спутников (LAGEOS) и дальнобазовой радиоинтерферометрии (РСДБ), пришла спутниковая навигационная система GPS (Global Positioning System). Полученные с её помощью результаты по высокоточному определению орбит спутников, относительных координат наземных пунктов и величин деформаций земной поверхности, позволили значительно продвинуться в части понимания геодинамической обстановки на Земле. Эта система показала, что тектонические модели, в ряде случаев, не соответствуют реально действующим современным деформациям земной коры. Главным образом, это границы плит и зоны т.н. субдукции. Северо-запад Тихого океана является одним из наиболее хорошо изученных районов и, несомненно, районом, наиболее характерным для зоны субдукции. Рассмотрим комплекс явлений составляющих субдукцию на примере этого региона.

Высота геоида. В правом нижнем углу на карте северо-западной части Тихого океана (см. рис. 17-5) находится область (180°; 0°), характеризуемая максимальной высотой геоида (Lewis, Smith, 1998), достигающей +60 и более метров. Это наибольшее на Земле положительное отклонение высоты геоида, второе аналогичное, положительное отклонение находится на противоположной стороне Земли, - на экваторе и нулевом меридиане. В области коллизии, вдоль побережья Тихого океана, проходит линия нулевой высоты геоида. Дальше на запад высота геоида понижается до максимального значения в районе Индостана (90° E-меридиан), после чего уровень геоида вновь повышается до Гринвича и затем понижается до 90° W-меридиана. Таким образом, высота геоида, если

рассматривать её вдоль экватора, имеет два максимума и два минимума, отстоящих друг от друга почти строго на 90° (см. рис. 17-6).

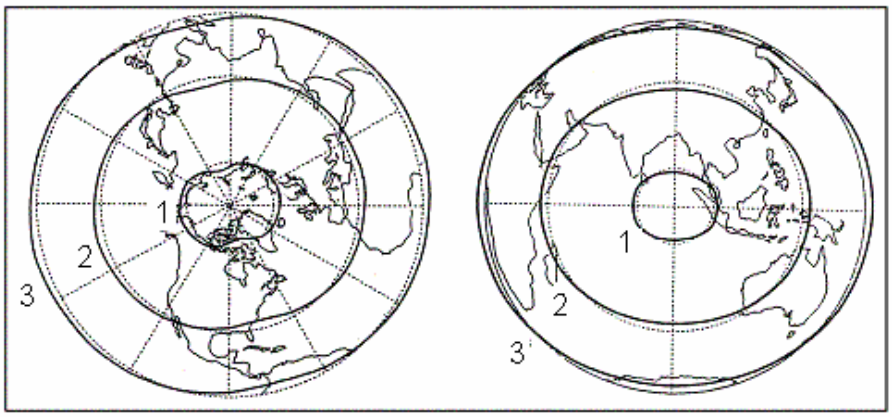


Рис. 17-6. Пространственная структура оболочек Земли полученная по splitting-функциям. 1 - внутреннее G-ядро (на границе его с внешним ядром), 2 -мантия (D"- слой), в виде сечений по экватору (слева), и по "нулевому" меридиану (справа). На этих же рисунках данные по изменению высоты геоида ζ (в тех же сечениях) - 3.

Скорости дрейфа. Дрейф Тихоокеанической плиты, обладающий максимально большими скоростями (до 10 и более см. в год), направлен вдоль градиента геоида (Kato et al., 1998). Связь направлений дрейфа плит с градиентом геоида была выявлена автором раньше, еще по данным лазерной локации спутников и РСДБ (Kuznetsov, 1990). Определения скоростей дрейфа материков и плит, выполненные с использованием систем GPS, уточнили и подтвердили данные, имеющиеся в нашем распоряжении. Анализируя данные работы (Kato et al., 1998) видно, что плиты дрейфуют не в область минимума высоты геоида, а к его нулевой отметке (аттрактору). Так наблюдения, проведенные на китайском пункте Xian и ряде других пунктов, где высота геоида принимает отрицательное значение (репелер), показали, что они перемещаются навстречу Тихоокеанической плите, вдоль градиента геоида в направлении большей его высоты (рис. 17-5).

На вставке, в правом нижнем углу рисунка 17-5, - приведены данные по направлениям перемещений литосферы, измеренным с помощью GPS-системы в Японии (Imakire, 2000). Рисунок 17-5 показывает, что северный остров Японии - Хоккайдо, дрейфует в том же направлении, что и Тихоокеаническая плита, в то время как южный остров - Кюсю, дрейфует в противоположном направлении так, как будто он находится на Азиатской плите (Imakire, 2000). В центральной части Японии, на острове Хонсю фиксируются встречные направления дрейфа, как будто какая-то сила сжимает Японию в этой части. Эта картина могла бы найти объяснение в рамках наших представлений, если бы линия нулевой высоты геоида проходила бы вдоль Японии так, как это показано штриховой линией (аттрактор) на рисунке 17-5. Однако реально положение Японии относительно этой линии не соответствует минимальной *высоте* геоида (Adjaout, Sarrailh, 1997), хотя зонам субдукции, в целом по Земле, соответствует понижение высоты геоида до отметки, близкой к нулевой. Возможная причина этого несовпадения заключается в том, что гидростатическое состояние Земли не совсем точно соответствует нулевой отметке высоты геоида.

Сделаем оценки вертикальных перемещений плит в области максимальных величин высот геоида. Это понадобится в дальнейшем при обсуждении модели горизонтального переноса земной коры. Как показал Маслов (1988), одному метру высоты геоида (при вязкости материала плиты порядка 10^{24} Пз) соответствует скорость изменения его высоты, равная 0.002 мм/год. Если использовать эту оценку для точки с максимальной величиной высоты геоида (примем её равной 50 м), то окажется, что скорость вертикального перемещения здесь, порядка 10^{-2} см/год, что в 1000 раз меньше чем

скорость горизонтального переноса. Рассмотрим физику растекания капли жидкости, как возможную аналогию рассматриваемым процессам дрейфа материков.

Гравитационные аномалии. Обратимся к геодинамической карте американской организации Energy and Mineral Resources (Plate-tectonic map, 1985). На ней, в районах Курильского и Алеутского желобов изображены протяженные аномалии силы тяжести, представляющие собой периодические структуры, с характерным поперечным размером («длиной волны») порядка 200 - 400 км. Амплитуда этих аномалий "затухает" на расстоянии порядка 1000 км от желобов (см. рис. 17-5). Картина гравитационных аномалий, как отмечал Маслов (1988), напоминает эффект интерференции волн, "набегающих" и отраженных от желобов. Он же обратил внимание на то, что аналогичная волновая картина наблюдается и на восточной границе плиты Наска, т.е. в прямо противоположном направлении от Курильской дуги.

Структура зон субдукции. Интересные результаты по структуре зон субдукции, в частности, по их топографии и гравиметрическим профилям поперек зон, а также по классификации зон субдукции, представлены в работе (Harabaglia, Doglioni, 1998). Зоны субдукции разбиты авторами на два класса, в зависимости от направления дрейфа погружающейся плиты: западный (W-class) и восточный (E-class). Средняя длина изучаемого профиля составляет 1250 км, гравитационные аномалии редуцированы по Фаю, максимальная величина аномалий не превышает 200 мГал. На рис. 17-7-а жирной линией изображен типичный усредненный топографический профиль зоны субдукции, тонкими линиями - различные варианты профилей зон, не имеющие принципиального различия со средним. Ниже, на рис. 17-7-б представлено изменение силы тяжести вдоль профиля зоны. Отметим, что во всех 20-ти зонах субдукции, о которых идет речь, их параметры практически идентичны и отличаются друг от друга в весьма незначительных (на наш взгляд) деталях.

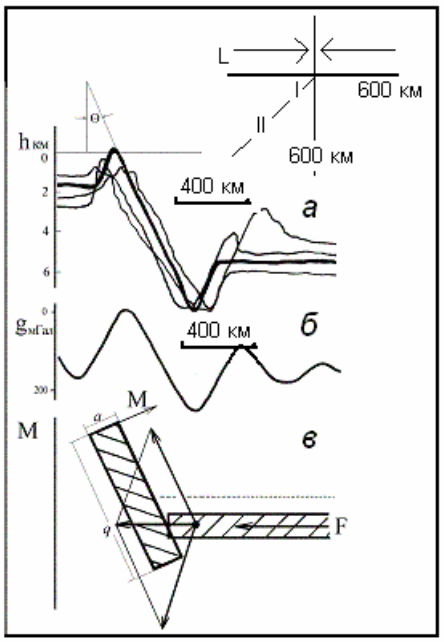


Рис. 17-7. Субдукция: ***а*** – рельеф (Harabaglia, Doglioni, 1998); ***б*** - гравитационные аномалии (Маслов, 1988); ***в*** – механическая модель. Вверху справа схема субдукции и три области сейсмичности и вулканизма.

Модель субдукции. Согласно действию принципа минимизации гравитационного потенциала, Земля в течение своей эволюции стремилась минимизировать площадь своей

поверхности. Это, в конкретном случае, может означать, что на поверхности Земли всегда есть сила, которая стремится привести её в состояние гидростатического равновесия, а форму Земли, - к равновесной форме сфероида. Иначе, эта сила стремится минимизировать высоту геоида. По-видимому, такую силу можно формально уподобить силе поверхностного натяжения жидкости и при определении параметров литосферы в зонах субдукции, воспользоваться формулами, выведенными для оценок капиллярных эффектов.

По данным, приведенными на рис. 17-7-а, оценим высоту h и величину краевого угла Θ. Высота h составляет 6 - 8 км, а угол Θ порядка 85 -87°. Используя формулу 17.17, оценим величину a: $a \approx 500$ - 1000 км, и воспользовавшись формулой:

$$a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}, \qquad (17.18)$$

оценим величину "поверхностного натяжения" α: $\alpha \approx 10^{19}$ дин/см. (Для сравнения, α воды 70 дин/см).

Для Тихого океана $R \approx 5$ тыс. км, высота "капли" H равна примерно 50 м (высота геоида), поэтому отношение $H/R \approx 10^{-5}$. Скорости "растекания" поверхности Тихоокеанической плиты ($v \approx 10$ см/год) соответствует скорость убывания высоты геоида $dH/dt \approx 10^{-3}$ мм/год. Это означает, что собственно "течет" только самый верхний и сравнительно тонкий слой литосферы. Оценим его толщину, для чего воспользуемся формулой (Ландау, Лифшиц, 1986):

$$\eta v \sim - z(d\alpha/dx), \qquad (17.19)$$

где η вязкость вещества слоя литосферы ($\eta \approx 10^{24}$ Пз), $v = 10^{-7}$ см/с, z - толщина слоя, $d\alpha/dx$ - изменение поверхностного натяжения вдоль слоя. Напомним, что величина $\alpha = 10^{19}$ дин/см, разумно предположить, что она может изменяться на 1 % на длине порядка 100 км, т.е. $d\alpha/dx \approx 10^{10}$ - 10^{11} дин/см^2. Отсюда следует ориентировочная оценка $z \approx 10$ - 100 км.

Толщину слоя f, возмущающего величину g, оценим по известной формуле:

$$\Delta g = 2\pi G f \Delta\rho. \qquad (17.20)$$

Возмущение силы тяжести в зоне субдукции порядка 100 мГал (см. рис. 17-7-б), изменение плотности принято считать в таких оценках, порядка 0.2 г/см^3, толщина возмущающего слоя оказывается: $f \approx 40$ км. Эта оценка показывает, что гравитационные аномалии зон субдукции определяются поверхностной, коровой неоднородностью, а совсем не глубинной, мантийной, как должно бы следовать из плитной тектоники. Из наших оценок получается, что толщина слоя растекания одного порядка с толщиной слоя, возмущающего силу тяжести. (Очевидно, что к подобным оценкам надо относится как к ориентировочным, тем не менее, они показывают соотношение эффектов, которые определяют физику явлений).

Использование капиллярной аналогии позволяет оценить порядок лапласовых, поверхностных сил, приводящих к растеканию литосферы. Величина $\Delta p = 2\alpha/X$. Для того чтобы величина этого давления была порядка текучести литосферы (≈ 1 кбар), при величине α, полученной нами выше, кривизна растекающейся литосферы должна быть: $X \approx 10^{10}$ см, что в 20 раз больше земного радиуса и, по-видимому, вполне реализуемо на практике. Таким образом, наши оценки показывают, что зона субдукции, с точки зрения модели растекания, представляет собой область краевых эффектов, возникающих за счет проявления капиллярных сил.

С этих позиций рассмотрим и картину взаимодействия «волн», приводящих к их интерференции при отражении от преграды в виде желоба. Как мы отмечали, длина «волны» порядка 200 - 400 км, следовательно, величина $k = (0.2 - 0.5)\ 10^{-7}$ см$^{-1}$ соизмерима с $1/a = (1 - 2)\ 10^{-8}$ см$^{-1}$, что говорит о необходимости учета капиллярных явлений. Частота капиллярных волн: $\omega^2 = (\alpha/\rho)\ k^3$: $\omega \approx 10^{-2}$ с$^{-1}$, или, если учесть, что длина волны ≈ 400 км, а скорость сейсмических волн $v_p \approx 4$ км/с, то величина ω оказывается того же порядка. При

всей внешней “похожести” картины гравитационных аномалий в зонах субдукции, интерференции капиллярных волн, эта модель абсолютно нереальна, т.к. нет никаких оснований, считать, что, хоть и капиллярные, но всё равно акустические волны, способны создать вариации плотности в литосфере, соответствующие Δg = 100 мГал.

Возможно, более реалистичная оценка эффекта субдукции может получиться, если учесть медленные гидродинамические волны, возникающие в растекающейся литосфере. Причиной возникновения таких волн (автоволн) в медленном ламинарном потоке могут быть эффекты, связанные с неравномерным распределением скорости течения вдоль по плите, которые могут сказаться при взаимодействии потока со «стенкой». По мере приближения к ней, скорость потока уменьшается, и поток как бы разворачивается таким образом, чтобы «встретить» стенку своим фронтом. Именно в этом случае могут возникать отраженные волны и интерференционные эффекты, о которых писал Маслов, и которые «зафиксированы» в виде гряд гравитационных аномалий, параллельных желобам (см. рис. 17-6).

Скорость горизонтального течения литосферы (Маслов, 1988) v_x:

$$v_x = \rho g^2 /(8\pi\mu G\Delta\rho T) \times \int_A^B N(x)dx,$$

где ρ - плотность слоя, $\Delta\rho$ - разность между плотностью вещества слоя и плотностью земной коры, g – сила тяжести, μ - вязкость вещества слоя, G – гравитационная постоянная, T – толщина слоя, $N(x)$ – высота геоида на расстоянии x между точками А и В. Упрощая и подставляя привычные значения величин, получаем для v_x: $v_x \approx 0.1\ N$ см/год (где N в метрах). Эта оценка дает верный результат для скоростей течения литосферы. Отношение скорости вертикального перемещения v_z к $v_x \approx 10^{-5}$.

Можно ли найти другую причину, объясняющую характер гравитационных аномалий в зонах субдукции? Для того чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим явления, происходящие в этих зонах, с другой позиции, не в рамках гидродинамики, как раньше, а с позиции прочности, упругости и изгибных моментов. “Растекающуюся” литосферу будем теперь отождествлять с нагруженной балкой, левый конец которой был приподнят внешними силами на высоту h (см. рис 17-7-в). К торцу “балки” приложена внешняя сила, которая, собственно, и вызывает её поднятие. В жесткой “балке” в этих условиях возникает изгибный момент M (направленный по часовой стрелке), который будет стремиться опустить правый конец “балки” ниже уровня её равновесия. Обозначим длину “рычага” q, а поперечный размер балки - a. Тогда величина изгибного момента:

$$M = 1/2\ gq^2ha\rho. \qquad (17.21)$$

Напряжение, вызываемое наклоном “балки” в области её правого конца, можно оценить по формуле Навье: $\sigma = M/W$, где W - момент сопротивления (примерно равен объему освобожденному “балкой”), $W = 1/2qha$. Величина $\sigma \approx q\ g\ \rho$. Если принять длину “рычага” равной примерно 200 - 400 км, то напряжение σ оказывается весьма большим (до 100 кбар). Оно значительно превышает величину литостатического давления и прочности горных пород, что, по-видимому, можно расценить как подтверждение правомерности нашего подхода.

Форма балки может быть описана уравнением: $w(x) = h\ cos\ (\pi x/\lambda)$, тогда на изгиб балки влияют изгибающий момент M и изгибающий момент от действия осевой нагрузки S, дифференциальное уравнение изогнутой оси балки (упругой линии) при изгибе балки описывается уравнением:

$$d^2w(x)/dx^2 = M(x)/EJ - Sw(x)/EJ, \qquad (17.22)$$

где E - модуль Юнга, J - момент инерции балки. Решение этого уравнения имеет синусоидальный, волновой характер, который, возможно даже в большей степени, чем интерференция акустических, капиллярных или гидродинамических волн, соответствует наблюдаемой картине гравитационных аномалий зон субдукции.

Обсуждение. Основной вывод следующий из нашей модели субдукции состоит в том, что движение материков и плит в этой области обязано «растеканию» литосферы. Крутопадающая в сторону материка область желоба, характеризуемая как астеносферная область пониженных сейсмических скоростей и как сосредоточение глубинных землетрясений и «корней» вулканов, представляет собой давно прекративший существование, «потухший» тихоокеанический спрединг. Напряжения, обязанные растеканию литосферы и влиянию изгибного момента сил, связанного с образованием в зоне желоба наклоненной «балки», приводят к активизации сейсмичности и вулканизма. В этой области астеносферы, во всех зонах субдукции, фиксируется понижение величины силы тяжести. Наша модель, в принципе, находит объяснение многим особенностям, фиксируемым в зонах субдукции, без привлечения глобальной конвекции.

Второй, не менее важный вывод, следующий из нашей модели, заключается в том, что постулируемой в плитной тектонике глобальной конвекции в мантии, нет, и не может быть на Земле. Это совсем не означает, что конвекции нет, и не может быть вовсе. Конвекция в мантии существует, но это турбулентная, мелкомасштабная конвекция, которая не может служить движителем материков и плит. Основанием для такого заключения служат несколько соображений. Например, одно из них состоит в том, что Земля негидростатична, так как иначе, Земля имела бы сжатие, равное 1/232, а не 1/298, как есть на самом деле. Последняя цифра говорит о том, что интегральная жесткость мантии, близкая к жесткости стали, не разрешает существование на Земле глобальной конвекции. В пользу этого вывода говорят ещё ряд фактов, таких как: отсутствие непрерывного слоя астеносферы, слишком малая величина гравитационных аномалий, особенности характера изменения скорости сейсмических волн в мантии и т.п.

Третий вывод, следующий из нашей модели очевиден: Если спрединг на Земле существует, а глобальной конвекции и субдукции нет, то Земля обязана расширяться. То, что сегодня расширение Земли инструментально не фиксируется, вовсе не говорит о его принципиальной невозможности в процессе эволюции Земли. Как мы отмечали, в настоящее время спрединга нет, нет расширения, наоборот, - инструментально фиксируется скорее сжатие Земли. Она стремится занять форму сфероида, что и является причиной «растекания» литосферы.

Модель субдукции базируется на принципе минимизации гравитационной энергии и его физическом воплощении - минимизации высоты геоида. Действительно, если сравнить высоту гор Земли с её радиусом H/R, то окажется, что эта величина порядка 10^{-3}. Сравнивая величины гравитационных аномалий с силой тяжести $\Delta g/g$, убеждаемся, что эта величина на порядок меньше (10^{-4}), в то время как отношение высоты геоида к радиусу Земли $\xi/R \approx 10^{-5}$. Следовательно, Земля, эволюционируя, стремится минимизировать не высоту рельефа, не величину гравитационных аномалий, а высоту геоида.

Таким образом, Земля стремится принять форму сфероида, а если не учитывать эффектов вращения, то шара. К аналогичной цели «стремится» капля жидкости вне сил гравитации. Эта аналогия позволила нам ввести новое понятие в физике Земли – поверхностное натяжение литосферы и оценить его величину. Какова физика этого явления? Очевидно, что здесь уже нельзя использовать аналогию с молекулярными силами, действующими в жидкой капле. В нашем случае должны быть силы, обеспечивающие “дальний порядок” этому явлению, только в этом случае в литосфере Земли могут проявляться эффекты, подобные поверхностному натяжению. В качестве таких сил могут быть силы гравитации и вращения. Именно они действуют на все компоненты литосферы, заставляя её проявлять коллективные свойства, подобные молекулярным.

Предлагая модель субдукции, мы, естественно, рассмотрели и спрединг, причем при анализе этого, казалось бы, хорошо известного явления, выяснилась интересная деталь, касающаяся эволюции Тихого океана. В отличие от линейного и симметричного

атлантического спрединга, в Тихом океане спрединг представлял собой по началу расширяющуюся со временем “трубу”, по стенкам которой происходил подъем вещества в течение юрского и мезозойского периодов. Эта “труба” была впоследствии разорвана и развернута в структуру, напоминающую спираль Архимеда (рис. 17-4). Примерно 60-80 млн. лет назад этот “цилиндрический” спрединг в Тихом океане прекратился и начался линейный и симметричный, аналогичный атлантическому. При развертывании “цилиндрического” спрединга, как результат расширения океанического дна, образовались т.н. окраинные дуги и желоба. Эти остатки, следы древнего спрединга и называются зонами субдукции.

Как отмечалось, формирование Тихого океана начиналось с растяжения коры и мантии и образования разломов-рифтов, одним из которых был и Байкальский рифт. Эти события происходили, по-видимому, раньше, чем 200 млн. лет назад, когда начиналось формирование современных океанов. Толщина мантии (согласно нашей модели горячей Земли) в тот период была значительно меньше современной. Растяжение литосферы сопровождалось не только образованием Байкальского рифта но, возможно, и некоторым “течением” - перемещением его восточной части относительно западной. Такое течение должно было быть связано с нагревом определенной области мантии и возникновением астеносферы. Вполне возможно, что астеносферная зона, обнаруженная группой С.В. Крылова (1993) под Байкалом, это последствие явлений растяжения литосферы в верхней мантии, и её “отображение” в нижней. Надо заметить, что результат, полученный группой С.В. Крылова уникален. Насколько мне известно, таких подробных исследований рифтовых зон никто никогда не проводил. Полученный результат ещё раз убеждает в справедливости нашей модели геодинамических процессов на Земле.

Надо заметить, что значительно раньше Чудинов (1981), отрицая идею субдукции, как затягивание плиты в мантию, предложил в качестве альтернативы эдукцию, как механизм выноса материала на поверхность Земли (спрединг?) из мантии. Его идея согласуется с нашим выводом: Зоны субдукции, - это “следы” угасшего спрединга. Глубоководные желоба, - это наиболее глубокие “шрамы” на поверхности Земли. В настоящее время Земля “залечивает” эти “шрамы”. Современная геодинамика, сейсмичность и вулканизм, это средства процесса такого “залечивания”.

17. 3. Течение литосферы и образование гор.

«Волновую картину», возникшую в литосфере, и несколько напоминающую ситуацию в зоне субдукции описанную выше, можно выявить, если обратиться к схеме горных районов центральной Азии, таких как Тибет, Тянь Шань и Алтай (рис. 17-8-a). По мере того, как мы удаляемся от Индии к северо-востоку, грандиозность горных массивов убывает. Вслед за горными массивами следуют межгорные впадины. По мере приближения к северу Азии уменьшается модуль высоты геоида, причем в районе 42 ° N высота геоида начинает немного возрастать и затем понижается до нулевой отметки, которая приходится на северную границу Азиатской плиты (рис. 17-8-b). Рис. 17-8-a показывает, что характерные размеры «волновой картины» превышают размеры, следующие из похожей «картины» в зоне субдукции в несколько раз, высоты гор h и величины краевых углов θ так же выше и, более того, различны для различных горных районов.

Воспользовавшись формулой (17.10) можно оценить величину капиллярной постоянной a и, вслед за этим, величину «поверхностного натяжения» α (по формуле: $a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}$). Рисунок 17-8-c показывает, что и величина α, и давление p, уменьшаются по мере уменьшения модуля высоты геоида. Это может означать, например, что вдоль оси x линейно меняется упругая сжимающая сила. На рис. 17-8-d показана (точками) некоторая аппроксимация ситуации, согласно которой действие упругой механической силы

вызывает возбуждение пространственных «колебаний» в диссипативной среде. Амплитуда этих «колебаний» связана с изменением рельефа (высоты гор) вдоль направления *x* действия силы. Реальная высота гор на Земле, как видно из сравнения рис. 17-8-a и 17-8-d, ниже, т.к. она определяется соотношением между силой тяжести и прочностью литосферы.

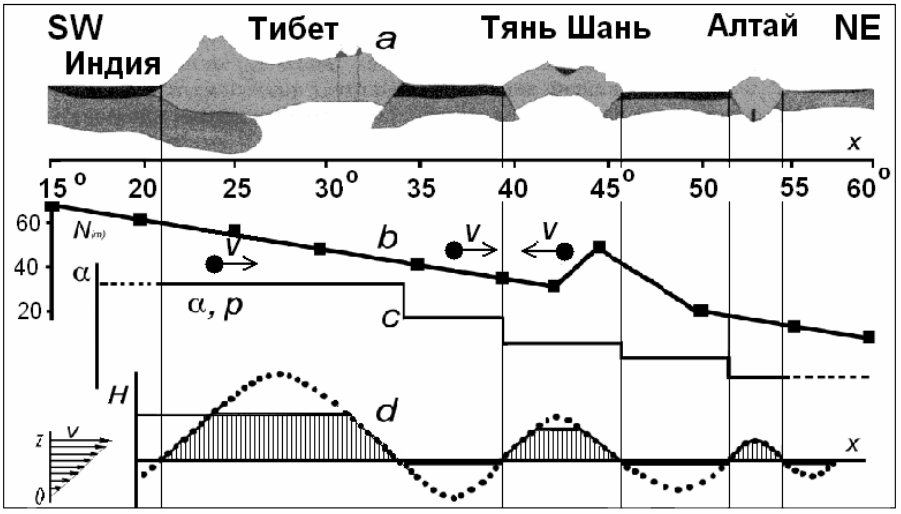


Рис. 17-8. Схема горных районов центральной Азии (рис. a) пересекаемых широтным профилем SW – NE (широта N– в градусах). Высоты геоида (в метрах) вдоль этого профиля (b) и направления скоростей дрейфа. Изменение (в отн. ед.) величины «поверхностного натяжения» литосферы α и величины сдвигового (лапласcового) давления *p* вдоль профиля (c). Модельные представления (d).

Предположим, что кривая, отображенная на рис. 17-8-d точками является решением некоторого дифференциального уравнения, описывающего геодинамику, приводящую к течению материка и образованию гор, как периодических функций в *x*-пространстве. Аналогом рассматриваемой нами задачи может быть, например, механическая система (Стокер, 1952), в которой ползун находится на механическом ремне, двигающимся с постоянной скоростью v_o. Ползун прикреплен к неподвижной точке при помощи упругой пружины, создающей упругую силу, изменяющуюся по линейному закону. Если скорость v_o будет выбрана соответствующим образом, то ползун может совершать прерывистые колебания. Такое поведение ползуна связано с тем, что сила трения (в нашем случае, - вязкость литосферы) между ползуном и ремнем не будет величиной постоянной, а будет изменяться в зависимости от *s* (*ds/dt* - скорость скольжения ползуна относительно ремня). Скорость скольжения можно записать:

$$ds/dt = dp/dt - v_o. \qquad (17.23)$$

Здесь *p* – амплитуда прерывистого движения ползуна. Уравнение движения ползуна будет иметь вид:

$$m(\partial^2 p/\partial t^2) + \varphi(dp/dt - v_o) + kp = 0. \qquad (17.24)$$

Следуя книге Дж. Стокера (Стокер, 1952), введем новую переменную *x,* заменив *p* при помощи соотношения:

$$x = p + 1/k\,(-v_o). \qquad (17.25)$$

Это соотношение означает, что положение ползуна отсчитывается от точки, в которой он находится в равновесии при одновременном действии упругой силы и силы трения. В

нашем случае, положение точки равновесия определяет максимум функции, изображенной на рис. 17-8-d, и означает, что в первой (по оси x) точке равновесия будет возникать упругая сила, приводящая не к горизонтальному смещению слоя, а к его вертикальному перемещению, т.е. образованию гор.

Уравнение, типа уравнения Ван дер Поля (Стокер, 1952), которое может подойти для описания нашего случая, и соответствовать решению 17-8-d, можно записать в виде:

$$m\partial^2 x/\partial t^2 + F(dx/dt) + kx = 0, \qquad (17.26)$$

где

$$F(dx/dt) = \varphi(\, dx/dt - v_o) - \varphi(- v_o) \qquad (17.27)$$

отрицательна при $dx/dt = 0$. Это требование будет выполняться, если скорость v_o такова, что величина трения (вязкости) будет уменьшаться при возрастании v_o. При этом возникают вертикальные автоколебания сплошной среды, которые могут быть причиной образования гор и впадин.

17. 4. Высота гор.

Наличие гор на Земле, казалось бы, должно находиться в противоречии с Принципом минимизации гравитационной энергии. Выше мы отмечали, что отношение максимальной высоты гор к радиусу Земли H/R существенно больше, чем отношение высоты геоида к радиусу. Следовательно, на Земле происходит минимизация высоты геоида, а не высоты гор. Таким образом, для гор Принцип «открывает возможность» увеличивать свою высоту. Более того, как следует из наших обсуждений, действие Принципа приводит к их возникновению и росту.

Надо сказать, что высота горы – величина не случайная, она может быть оценена из соотношения: $\rho g H = \sigma$, где σ - предел текучести материала литосферы (в терминах самоорганизации – перколяционный порог). Примем эту величину равной примерно 3 кбар, тогда максимальная высота гор $H \approx 10$ км, что чуть больше, чем высота самых высоких гор на Земле (> 8 км). Как известно, на Марсе высота гор выше: $H \approx 25$ км, т.е. примерно в 3 раза больше чем на Земле, но ведь и сила тяжести на Марсе $g = 360$ см/с^2 – примерно в три раза ниже земной. Более того, принято считать, что на Земле раньше высоких гор не было. Если принять, что в течение эволюции масса Земли не меняется, а радиус растет, то и сила тяжести – падает. Так что здесь противоречий нет.

Принято считать, что горы образуются в результате натекания поверхностного слоя литосферы на преграду (в плитной тектонике – из-за столкновения плит). Наиболее распространенный пример, это «течение» к северу Индостана и столкновение этого потока с Азиатским материком в районе Гималаев. Надо сказать, что образование горы идет не только вверх, но и вниз, что связано с известным явлением изостазии, которое приводит, в конечном счете, к образованию «корней» гор. Существование явления изостазии лишний раз указывает на то, что, рассматривая образование гор, можно пользоваться гидродинамической моделью.

Возможно, современная геодинамика в значительной мере определяется действием на земной поверхности Принципа минимизации гравитационного потенциала, который приводит к минимизации высоты геоида, не обращая при этом, «внимания» на высоту гор. Возможно так же, что течение литосферы, и связанные с этим явлением вулканизм, землетрясения и образование гор, составляют сумму процессов, обязанных протеканию процессов самоорганизации. Возможно, по сути, что это одни и те же процессы, цель которых привести такую «систему» как Земля в состояние с меньшей энтропией. В случае самоорганизации, высота гор, так же как энергия землетрясения или мощность вулканического извержения - фракталы. Фрактальные среды проявляют свои свойства, выражающиеся в том, что сильных событий бывает мало, более слабых, - больше, ещё более слабых, - ещё больше, и т.д. Степень фрактальности процесса или явления

оценивается по величине Хаусдорфовой размерности D_H. Однако прежде чем оценивать D_H следует убедиться в том, что в логарифмическом масштабе наблюдается линейная зависимость между количеством событий $N(r)$ и амплитудой события r.

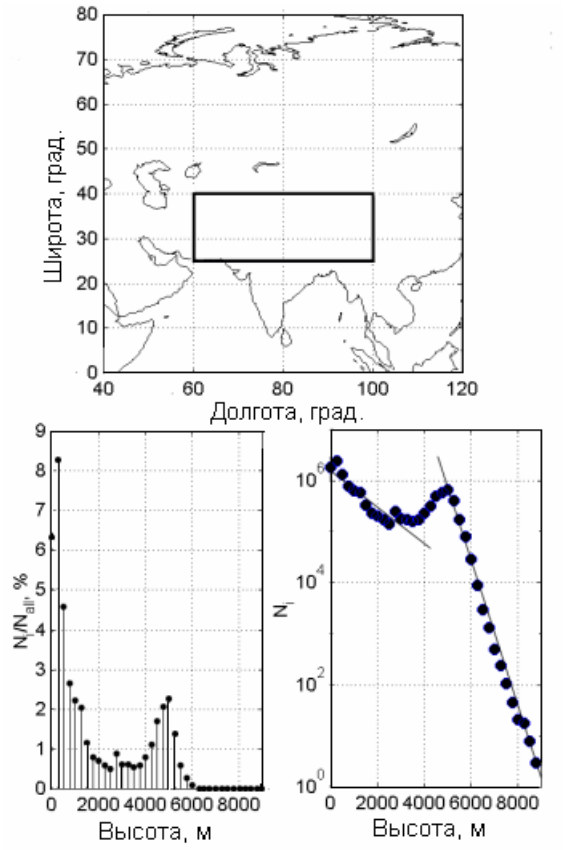


Рис. 17-9. Высота гор. Вверху – исследуемый регион. Слева внизу – гистограмма N-H. Справа внизу зависимость $lg\ N – lg\ H$ (N – число гор, H – их высота).

Интересно выяснить, является ли высота гор фракталом. Для анализа был выбран горный район, включающий Гималаи, ограниченный: по широте: 40° - 25°N, и по долготе: 60° – 100°E (см. рис. 17-9). Использовалась глобальная цифровая база данных о топографии GTOPO30 геологической службы США (http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30) с пространственным разрешением 30 угловых секунд (около 1 км). Общее количество точек 8841600, максимальное значение высоты гор 8752 м. Ширина классового интервала по высоте при вычислении распределения 250 м. (рис. 17-9 внизу слева). На рис. 17-9 внизу справа приведено распределение средних значений высот в ячейках 1×1 км. Можно выделить две наклонных прямых, одна из них характерна для невысоких гор, другая – для более высоких гор. Очевидно, что в исследуемый регион либо «попали» два различных горных района, либо это один район, но он «пережил» два различных этапа горообразования. Величина Хаусдорфовой размерности для исследуемого горного региона равна: для невысоких гор (пологая часть графика) $D_H \approx$ - 0.27, для высоких гор (крутая часть графика) $D_H \approx$ - 0.9.

Не будем делать ни предположений, ни выводов относительно особенностей образования гор в выбранном регионе. Приведенный пример носит только методический характер. Возможно, оценка D_H может оказаться полезной для выяснения физики процессов образования гор и их классификации. Важный вывод, который можно сделать, анализируя рис. 17-9, состоит в том, что высота гор, это фрактал, а это означает: наличие

гор, их количество и высота не случайны, а собственно образование гор является следствием протекания процессов самоорганизации, происходящих на поверхности Земли. Как отмечалось выше, образование гор является так же следствием действия Принципа.

Обратим внимание на то, что высота гор оценивалась из соотношения: $\rho g H \sim \sigma$, (I) где σ - предел текучести материала литосферы. Формулу для высоты гор можно получить из соотношения: $\rho g H^2 \sim \alpha$ (II), (т.к. $H = a(1 - sin\theta)^{1/2}$ и $a^2 = \alpha/\rho g$, α -поверхностное натяжение). Сравнивая I и II, получаем: $H = \sigma a^2/\alpha$: высота гор пропорциональна пределу текучести и квадрату капиллярной постоянной и обратно пропорциональна величине поверхностного натяжения (лапласовой силе). Последнее, казалось бы, противоречит (II), однако это не так, потому, что после подстановки значения a, получаем:
$H = \alpha\ (1 - sin\theta)/\sigma$. Отсюда следует реологический вывод: поверхностное натяжение и сдвиговое лапласово напряжение тем выше, чем выше предел текучести. Оценив выше: $\alpha = 10^{19}$ дин/см; $\sigma = 10^9$ дин/см^2; $a = 10^8$ см и $H = 10^6$ см, можно получить величину:
$(1 - sin\theta) = 10^{-4}$, или $\theta \rightarrow 90°$, что соответствует: $a >> H$.

17. 5. Модель плюма.

Идея плюма, как элемента геодинамики, - возникла сравнительно недавно. Это было вызвано, с одной стороны, несостоятельностью тектоники плит, т.к. она не находила объяснения внутриплитному вулканизму и магматизму и, с другой, - успехами сейсмологии, в частности, сейсмической томографии (Nolet et al. 2006). Разработка и использование метода сейсмотомографии позволило выявить в мантии, в районах т.н. «горячих точек», - мантийные струи, названные плюмами. Хотя, надо заметить, что к этим данным двоякое отношение: некоторые видят в них доказательство реальности плюмов, другие усматривают в них лишь сейсмические шумы (Kerr , 2006).

Как было выяснено ((Fuller, Weeks, 1992; Larson, 1991; Larson, Olson. 1991; Ni, et al., 2002; Foulger, 2003; Shu-Chuan Lin, van-Keken, 2006), плюмы – мантийные струи пронизывают мантию от границы ядра до поверхности Земли. При выходе на поверхность они изливаются базальтами малой вязкости – траппами. Плюмы по внешнему виду (Ni, et al., 2002; Shu-Chuan Lin, van-Keken, 2006) напоминают поднимающийся в атмосфере тороидальный вихрь (Лаврентьев, Шабат, 1973) (рис. 17-10). В книге (Лаврентьев, Шабат, 1973) показано, что только тороидальный вихрь обладает гидродинамической устойчивостью и способен «всплыть» в атмосфере на большую высоту, сохраняя свою первоначальную форму, в то время как, обычный газовый, сферический «пузырь» очень быстро теряет форму и расплывается. В дальнейшем, развивая модель плюма, будем использовать свойство гидродинамической устойчивости тороидального всплывающего вихря, Будем полагать, что в нашей модели, понятия плюм и вихрь обозначают одно и то же явление. На рис. 17-10 (слева) стрелками показаны направления перемещения струй горячего газа в вихре (Лаврентьев, Шабат, 1973). Отсюда следует, что горячая струя вихря поднимается в его центре, затем, взаимодействуя с окружающей средой, приводит к её испарению, закручивается, охлаждается, частично конденсируется, опускается вниз и сливается с горячей струей. Процессы испарения и конденсации вещества среды играют важную роль в физике плюма.

Вихрь, изображенный на рис. 17-10 слева, обычно получается в опыте Вуда, который состоит в том, что вихрь возникает при ударе по гибкой стенке ящика, заполненного дымом, и при выбросе дыма через отверстие в противоположной стенке ящика. Заметим, что, по моделям, не все плюмы похожи на вихрь Вуда, так, например, в работе (Ni, et al., 2002) плюм является практически копией вихря изображенного на рис. 17-10. Однако плюм отличается от нашего вихря тем, что не обладает такой широкой

«юбкой», как это показано на рисунке, он соединяется с «питающей средой» посредством тонкого, вероятно, вращающегося канала («хобота»). В этом случае похожей на плюм структурой обладают образующиеся в атмосфере и океане Земли такие вихри, как, например, торнадо. По-видимому, именно торнадо можно считать наиболее близким физическим аналогом плюма. Здесь следует заметить, что до сих пор высказываются различные взгляды на природу торнадо, довольно часто наблюдаемого явления. Принято считать, что наличие тепловой энергии вихря приводит к возникновению его вращения при взаимодействии с более холодной средой «внедрения» вихря. Источником энергии атмосферных вихрей различных пространственных масштабов является скрытая теплота, выделяющаяся в результате конденсации атмосферной влаги (Писниченко, 1993; Юсупалиев и др. 2000).

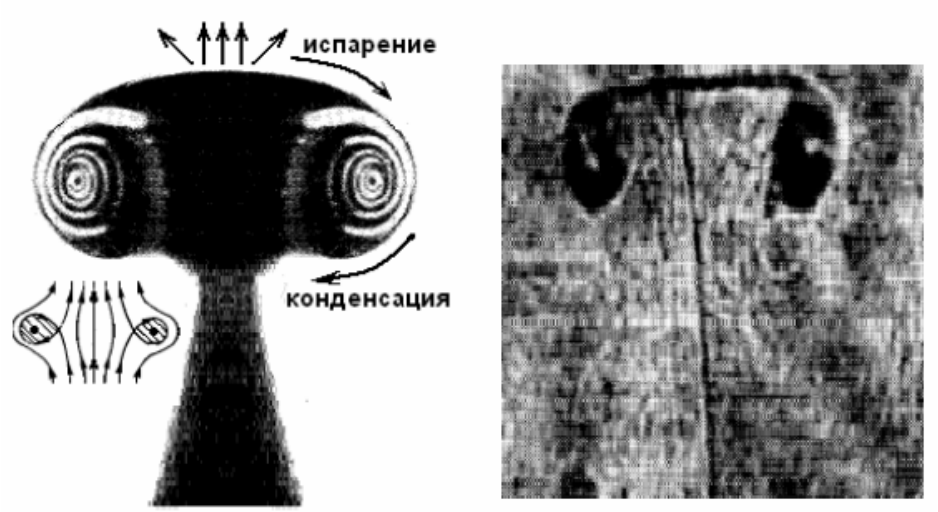


Рис. 17-10. Тороидальный вихрь (Лаврентьев, Шабат, 1973) - слева. Результат эксперимента по образованию двухфазной вихревой структуры при воздействии струи воздуха на расплав парафина в узком канале (Ковалев и др. 2007) - справа.

То, что высказанные идеи имеют реальное основание, можно проиллюстрировать результатом лабораторного моделирования, полученного авторами (Ковалев и др. 2007) (рис. 17-10 справа) при исследовании механизма образования двухфазной вихревой структуры, типа вихрей Тейлора-Гертлера, возникающей при воздействии струи горячего воздуха на расплав парафина в узком канале. Вихревая «гантелька», видимая на рис. 17-10 (справа), - является зоной, где закручивается расплав парафина. Температура парафина соответствует тройной точке (54° С).

Важный вопрос физики плюма состоит в том, какова его энергия и откуда она может черпаться? Оценим минимальную тепловую энергию, необходимую для того, чтобы плюм смог проникнуть сквозь толщину мантии проплавляя её. Положим, что минимальное сечение плюма не должно быть меньше, чем 10×10 км^2, толщина мантии 3000 км, скрытая теплота плавления U = 1 кДж/г, плотность вещества мантии ρ = 4 г/см^3. Тепловая энергия $Q_o = \rho VU$, где V – объём вещества мантии, участвующего в прохождении плюма, $\approx 3\ 10^{20}$ см^3, а $Q_o \approx 10^{24}$ Дж, что примерно соответствует тепловому потоку Земли ($\approx 10^{21}$ Дж/год) за тысячу лет. Откуда может взяться энергия такой величины, необходимая для прохождения всего лишь одного плюма, - современная модель холодной Земли ответа не дает.

Образование плюма. По модели горячей Земли, тепло, которое производится на границе внутреннего ядра, переносится к мантии путем конвекции во внешнем ядре. Если конвекция перенести всё тепло не успевает, внутреннее ядро перегревается, и на границе F-слоя начинают интенсивно образовываться пузыри – ядро «вскипает». Пузыри «всплывают» в жидком E-ядре со скоростью:

$$V = gR^2 / \upsilon_ж (1 - \rho_г / \rho_ж),$$

где g – ускорение силы тяжести; R – характерный размер пузыря; $\upsilon_ж$ – кинематическая вязкость жидкости; $\rho_ж$, $\rho_г$ – соответственно плотность жидкости и газа. Так как $\rho_ж$ и $\rho_г$ близки по величине и разность между ними может составлять единицы процента, то выражение в скобках может быть очень малым (примем его равным 10^{-3}). Вязкость вещества внешнего ядра Земли (η), по разным оценкам, составляет 10^5 – 10^9 Па·с, кинематическая вязкость $\upsilon_ж$ не должна быть больше 10^5 м^2/с, размер плюма ~ 10 - 100 км. Эти величины определяют широкий диапазон возможных скоростей подъема газового пузыря - прообраза плюма во внешнем ядре, ограниченных сверху величиной скорости звука (≈ 10 км/с). В любом случае, это очень большие скорости, значительно превышающие общепринятые величины геологических скоростей (~ см/год). Время подъема плюма во внешнем ядре, по геологическим масштабам, ничтожно и его можно не учитывать, полагая, что плюм, образовавшись на границе внутреннего ядра, моментально переносит тепловой импульс на границу с мантией. Собственно плюмом он становится именно на границе мантии.

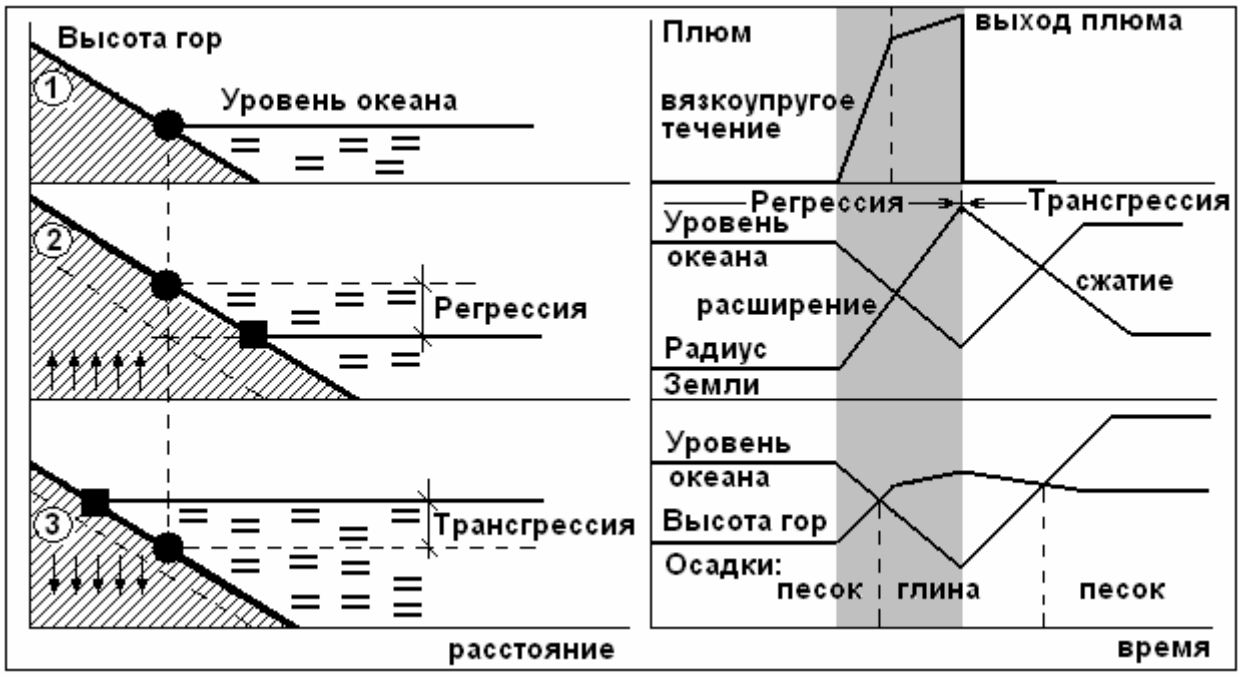


Рис. 17-11. Выход плюма на поверхность Земли и связанные с этим трансгрессии и регрессии.

Таким образом, на границе с упругой мантией формируется газовый «пузырь», который может образоваться в результате слияния более мелких пузырей. Его появление сопровождается импульсом давления, которое, во-первых, является причиной вязко-упругого растяжения мантии и, во-вторых, стимулирует образование волны испарения (Беннет, 1974; Кузнецов, 1985), которая распространяется по мантии от её границы в область меньших плотностей, т.е. к дневной поверхности. Вязко-упругое растяжение вещества мантии, как результат действия вызванного плюмом излишком давления, приводит к изменению формы рельефа и высоты геоида, которая в зоне влияния плюма возрастает. Это является причиной изменения уровня океана, поднятия части суши, изменения седиментационного режима океана и т.п. В зоне влияния плюма может

происходить понижение уровня океана – регрессия, которая, в дальнейшем, перейдет в трансгрессию, т.е. повышение уровня океана (рис. 17-11).

Вязкоупругое растяжение мантии возникает лишь в том случае, если давление, вызываемое появлением плюма, больше некоторого критического. Для твердых тел величина критического давления составляет не менее 10 кбар. Оценка величины газокинетического давления водорода в плюме: $p = nkT = \rho kT/m \approx 1$ Мбар показывает, что вязко-упругое течение мантии вполне возможно. Причем, особенность этого течения состоит в том, что чем медленнее нарастает давление в плюме, тем больше эффект, т.е. большие локальные изменения величины подъема поверхности Земли. Одновременно с вязко-упругим течением начинается подъем тепла и вещества плюма от границы с ядром до поверхности Земли. Локальное выделение тепла плюма на границе мантии, при условии соблюдения адиабатичности, вызовет образование волны испарения. Можно оценить скорость волны испарения V_J, для чего принимаем: $c_p =$ 1000 Дж/кг·Т, $T \approx 10\,000$ К, теплоту испарения $U = 10$ кДж/г. Тогда $E = c_pT = 10$ кДж/г, что равно величине теплоте испарения U ($E/U = 1$). При этом условии $V_J \approx 0.1\ c_o$. Как следует из (Беннет, 1974; Кузнецов, 1985), понижение перегрева в два раза ($E/U = 0.5$) сводит величину V_J практически до нуля. Это означает, что процесс образования плюма, в нашей модели, - процесс пороговый, т.е. плюмов малой энергии (малого объема) возникнуть не может. Вполне возможно, что мы приняли несколько заниженную величину c_p, тогда удельная энергия E будет больше, что понижает энергетический порог начала подъема плюма. Т.к. скорость $V_J = c_o \exp(-E/kT)$, волна испарения возникает при выполнении условия: $E/U \geq 0$. Скорость V_J при этом может составлять $0.01\ c_o$. По-видимому, это верхняя граница скорости подъёма плюма ($V_J \approx 100$ м/с). Нижнюю границу скорости подъёма плюма оценим по величине температуропроводности: $\zeta = 10^{-2}$см^2/с и учитывая то, что толщина мантии $l \approx (\zeta t)^{1/2}$, t – время процесса $t = l^2/\zeta$, средняя скорость подъема плюма $V = l/t \approx (\zeta/l)^{1/2} \approx 10^{-3}$ см/год. Полученная оценка скорости значительно ниже скорости подъема плюма на Гавайских островах: $V \approx 50$ см/год. Надо сказать, что оценить величину скорости подъема плюма V более точно, модель не позволяет. Дело в том, что в нашей модели скорость подъема плюма будет определяться скоростью прохождения фазовых переходов. В физике известно, что такая скорость конечна, но подходов к её оценке, особенно в рассмотренном нами случае, - не разработано.

Волна испарения быстро затухает и не может обеспечить распространение тепла и, соответственно, материала газового пузыря (плюма) на большие расстояния. Высота, на которую может всплыть сферический пузырь, также имеет ограничения из-за потери устойчивости движения и расплывания пузыря, в то время как мы отмечали, тороидальный вихрь устойчив и теоретического ограничения на высоту всплывания не имеет. По модели горячей Земли вещество внутреннего ядра представляет собой, в основном, перегретый и сжатый высоким давлением водород, а так же другие компоненты солнечного вещества, такие как, кремний, кислород, железо и пр. Нагретые до высокой температуры водород, другие газы и химические элементы в виде пара взаимодействует с веществом мантии, что приводит к его плавлению и испарению. Вещество вихря при этом охлаждается. Охлажденное вещество вихря может конденсироваться и кристаллизоваться в нижней его части, что приводит к выделению скрытой теплоты фазовых переходов и повторному нагреву вещества вихря (рис. 17-10). В конечном счете, эффекты испарения - конденсации приводят к изменению начального химического состава вещества плюма, приближения его к составу вещества мантии. При этом в принципе, так же возможен и вынос некоторой части исходного вещества плюма от ядра на поверхность Земли.

Оценим верхнее значение величины тепловой энергии плюма Q, положив, что он представляет собой сферу радиусом $R = 100$ км, объёмом $V \approx 4\cdot10^{21}$ см^3, с плотностью вещества (преимущественно водорода) $\rho = 5$ - 10 г/см^3, массой $m \approx 2\cdot10^{22}$ г, перегретой до

температуры $\Delta T \approx$ 2000-4000 К. Учитывая , что теплоёмкость водорода $c_p \approx$ 15 кДж/кг·К, величина $Q \approx 10^{24}$ кДж. Для сравнения, полная тепловая энергия вещества G-ядра равна $6 \cdot 10^{27}$ кДж, а оцененная нами выше минимальная энергия, необходимая плюму: $Q_o \approx 10^{24}$ Дж. Энергии $Q \approx 10^{24}$ кДж вполне достаточно для того, чтобы, например, испарить массу мантии $M = Q/U = 10^{23}$ г и объемом $V = 2 \cdot 10^{22}$ см^3, что определяет, при толщине мантии $3 \cdot 10^8$ см, площадь «среза» мантийной струи $S = 10^{14}$ см^2. Здесь U – теплота фазового перехода испарения $U \approx$ 10 - 15 кДж/г. Оценка оказывает, что тепловая энергия такого «пузыря» достаточна для того, чтобы он мог реально «пройти» сквозь толщу мантии.

По всей видимости, не все пузыри, достигающие мантии, будут слипаться в один большой – прообраз плюма. Некоторые из них могут схлопываться, излучая при этом, в результате гидравлического удара, - акустическую, сейсмическую волну (Лаврентьев, Шабат, 1973). Так, например, газовый пузырь радиусом 10 км способен, при склопывании, излучить энергию $E \approx \rho V c^2$, где ρ- плотность вещества пузыря, V- его объем, c – местная скорость звука. Без учета эффектов, связанных с поверхностным натяжением пузыря, его акустическая энергия может достигать 10^{17}Дж, что соответствует энергии достаточно сильного землетрясения, обычно регистрируемого сейсмическими станциями. Например, известное Нортриджское землетрясение, произошедшее 17 января 1994 г в США, Калифорния, имело магнитуду 6.7 баллов, что соответствует энергии ~ 10^{17} Дж. Характерное время излучения схлопывающегося пузыря, оцененное по формулам (Лаврентьев, Шабат, 1973), составляет несколько секунд, что так же совпадает по времени основного удара сильного землетрясения.

Выход плюма на поверхность Земли. Начальная плотность вещества плюма выше плотности земной коры, поэтому выход плюма на поверхность сопутствует разуплотнению вещества Земли, при этом радиус Земли возрастает на $\triangle R \approx m/\rho S \approx 2 \cdot 10^{22}/5 \cdot 5 \cdot 10^{18} \approx$ 10 м. Это явление приводит к увеличению высоты геоида. Здесь m – масса плюма, ρ – плотность мантии, S – площадь поверхности Земли. Если учесть, что плюм при выходе занимает далеко не всю поверхность Земли, а ограничивается, например, размером не более 1000-1000 км^2, то $S = 10^{16}$ см^2, а $\triangle R \approx$ 4 км. Впоследствии, превышение высоты геоида будет уменьшаться, например, за счет реализации принципа минимизации гравитационного потенциала Земли стремясь к нулю. Реализация этого Принципа приводит к возникновению поверхностных сил Лапласа, которые являются причиной течения поверхностного слоя литосферы (Кузнецов, 2008). При этом происходит и общее увеличение радиуса Земли. Отметим, что основной этап расширения Земли, по данным, полученным по скорости образования океанов, происходил в течение последних 80 млн. лет, в период частых инверсий геомагнитного поля (рис.5) и раскрытия срединно-океанических хребтов (СОХ).

Представим себе, что плюм «вышел» на материковую поверхность Земли в районе береговой линии (рис. 17-11-1). В момент выхода плюма растягивающие силы направлены вверх (рис. 17-11-2). Уровень океана (точка) при этом понижается (квадрат), - это явление получило название регрессия. Следующим этапом по окончанию цикла расширения, связанного с плюмом, происходит цикл сжатия Земли гравитационными силами (рис. 17-11-3). При этом уровень океана возрастает и становится выше изначального, - это трансгрессия.

В правой части рис. 17-11 схематично показано изменение параметров Земли в течение времени прохождения плюма (затемненная полоса). Действие плюма начинается, как следует из рисунка, с вязкоупругого течения вещества мантии. Характерное время вязкоупругой релаксации вещества мантии на воздействие плюма: $t = \mu/G$, где μ – «вязкость» среды, а G – модуль упругости, по разным оценкам, может составлять от нескольких тысяч до 1 млн. лет.

Как известно, напряжения и деформации при вязкоупругом течении материала зависят от истории протекания процесса нагружения (деформации) во времени и характеризуются поглощением энергии в цикле деформации с постепенным её исчезновением при снятии нагрузки. При быстром возрастании давления на границе мантии, её удлинение меньше, - чем при более медленном возрастании. И, наоборот, одно и то же удлинение может возникнуть при разных значениях силы. Естественно, всё это вносит свои коррективы в величину *t.*

Итак, временные этапы последовательного развития плюма включают (рис. 17-11):
1. «Вскипание» внешнего ядра и транспортировка «пузыря» к поверхности мантии.
2. Рост давления на границе мантии (в принципе, до мегабарных величин).
3. По достижении критического давления (порядка 10 кбар) начинается вязкоупругое течение мантии. Происходит локальный подъем части литосферы – Земля расширяется. При этом уровень моря понижается, наблюдается регрессия (см. рис. 17-11).
4. Плюм «всплывает» аналогично тороидальному вихрю, перенося к поверхности Земли из ядра тепло, водород, базальт и воду.
5. После подъема плюма, Земля релаксирует: начинается цикл гравитационного сжатия, выравнивается высота геоида, происходит «растекание» литосферы в области ранее поднявшегося региона, уровень океана локально повышается – наступает трансгрессия.
6. Изменение соотношения высоты гор и уровня океана изменяет характер разрушения гор, что ведет к изменению режима седиментации и изменению характера осадков: например, смена песка на глину и т.п. Этот момент может оказаться принципиальным при разработке модели, основанной на использовании идеи важной роли плюма в образовании месторождений углеводородов. Другой принципиальный момент этой проблемы состоит, в контексте нашей модели, в том, что выход вещества плюма состоит в мощнейшей «прокачке» литосферы потоком горячего водорода. Наличие водорода, как будет показано ниже, приводит к приобретению веществом Земли ряда принципиально новых качеств.

Суперхроны и суперплюмы. Принято считать, что современные океаны сформировались на Земле лишь в течение “последних” 160 млн. лет. Начиная именно с этого времени, на дне океанов фиксируется череда инверсий геомагнитного поля, получивших название мезозойских. Этому периоду предшествовал период спокойного магнитного поля, когда инверсий не происходило, получивший название юрский суперхрон. В течение периода, продолжавшегося с 120 млн. назад до 80 млн. лет, на Земле так же не было инверсий, - это время так называемого мелового суперхрона (рис. 17-12). В периоды суперхронов Земля изменяла характер эволюции и вместо спрединга океанической коры, наращиваемой посредством “работы” СОХ, она увеличивала объем мантии путем генерации плюмов (Fuller, Weeks, 1992; Larson, 1991; Larson, Olson. 1991). Авторы этих и большого количества подобных публикаций, сопоставляют период спокойного магнитного поля с периодом интенсификации образования плюмов.

В работах (Fuller, Weeks, 1992; Larson, 1991; Larson, Olson. 1991) показано, что характер эволюции Земли в периоды суперхронов - суперплюмов резко отличался как от периодов предыдущих, так и последующих. В частности считается, что именно в эти периоды на Земле были образованы основные запасы нефти и других углеводородных полезных ископаемых. Эту ситуацию комментирует Печерский (2003). Он задает вопрос, «почему именно во время наиболее стабильного спокойного состояния геомагнитного поля, а не во время вспышек высокой активности в ядре, приводящей к частым сменам полярности геомагнитного поля, происходят столь бурные процессы на поверхности Земли». Общепринятая модель Земли не дает ответа на этот вопрос.

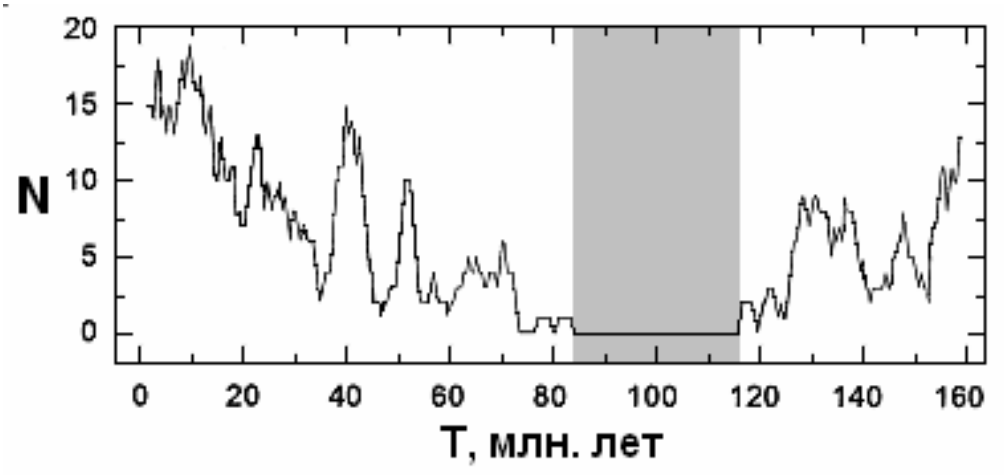


Рис. 17-12. Распределение количества инверсий *N* произошедших в течение трех млн. лет, за *T* = 160 млн. лет эволюции геомагнитного поля (Харланд и др. 1985).

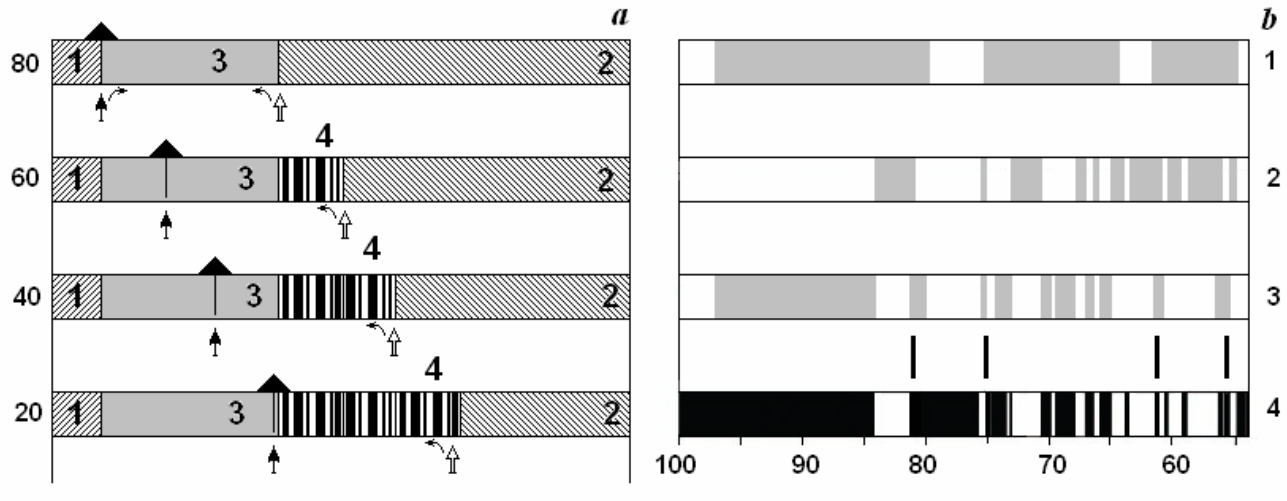


Рис. 17-13. Плюмы и суперплюмы. Перемещение «горячей точки» - *a*. 1 – Азия, 2 – Америка, 3 – меловой суперплюм, 4 – зона инверсий. Цифры слева – время в млн. лет, черная стрелка и треугольник – «горячая точка», белая стрелка – СОХ. Модель «дробления» суперплюма - *b*: 1 – суперплюмы, 2 – периоды «работы» СОХ, 3 – плюмы и суперплюм, 4 – шкала инверсий.

Рассмотрим эту проблему в контексте модели горячей Земли, для чего обратимся к широко обсуждаемой проблеме т.н. гавайских «горячих точек» и их перемещению по поверхности океана во времени (Tarduno et al., 2003). Рост океанов в процессе эволюции Земли связывается с последовательным прохождением 4-х этапов: 1) Юрский суперхрон-суперплюм, 2) период Мезозойских инверсий, 3) Меловой суперплюм-суперхрон и, наконец, 4) начавшийся 80 млн. лет тому назад, период современных инверсий геомагнитного поля. В Тихом океане встречаются регионы, в которых можно выделить все четыре этапа, но это не везде. В районе траверса: Камчатка – Гавайи (1 и 2 на рис. 17-13-*a*) можно выделить два из них. Это образовавшийся в период 120-80 млн. лет назад Меловой суперплюм – зона спокойного геомагнитного поля (3 - на рис. 17-13). Источник этого суперплюма отмечен черной стрелкой и треугольником. Здесь же показано направление спрединга суперплюма. Граница между 3 и 2 имеет возраст 120 млн. лет. Здесь примерно 80 млн. лет тому назад начался спрединг (белая стрелка и направление спрединга), сопровождавшийся возникновением срединно-океанического хребта (СОХ).

Зона спрединга СОХ отмечена полосовыми магнитными аномалиями прямой и обратной полярности геомагнитного поля. Каждой из стрелок соответствует область пространства на границе внешнего ядра, где, собственно, и зарождается и тот и другой спрединг. Угловые расстояния между стрелками в процессе эволюции Земли - остаются неизменными. Поэтому, по мере наращивания океанической коры региона современных инверсий, черная стрелка перемещается по области «постоянного поля», т.е. по области Мелового суперхрона, генерируя при этом Гавайскую вулканическую гряду.

Таким образом, наша модель находит непротиворечивое объяснение, почему и как происходит дрейф «горячей точки» по океаническому дну «зоны спокойного поля». Остается выяснить причину, почему магматизм горячей точки в этой области пространства имеет прерывистый характер. Обратимся к рис. 17-13-b, здесь на первой полосе (1) показаны временные интервалы спрединга трех суперплюмов. На второй полосе (2) показаны временные области спрединга, соответствующие работе СОХ. Полоса 2 является обратным отражением полосы 4, где показана шкала инверсий геомагнитного поля, на которой черные полосы обозначают современную полярность поля, а белые = противоположную полярность. Согласно модели горячей Земли, во время современной полярности поля на Земле происходит цикл её сжатия, в период обратного поля – расширения. Именно в эти периоды происходит интенсивный спрединг в зонах СОХ, отраженный на полосе 2. Предположим, что спрединг горячей точки менее интенсивен, чем спрединг СОХ. При выполнении этого, вполне очевидного условия, третья полоса показывает спрединг горячей точки. Таким образом, происходит «дробление» второго и третьего суперплюмов (1) на более короткие периоды активизации. Черные полоски между полосами 3 и 4 показывают время измерений параметров гавайских горячих точек по данным, опубликованным в (Tarduno et al., 2003).

Изложенный в этой главе материал показывает, что задачи геодинамики могут быть достаточно просто и достоверно объяснены в рамках модели горячей Земли.

Литература

Алексеев А.С., Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н. и др. Схема астеносферных зон Советского Союза. ДАН СССР. Т. 234. № 4. 1977. С. 790-793.

Беннет Ф. Волна испарения. В кн. Физика высоких плотностей энергии. М.: Мир. 1974. С. 241-257.

Карта осей палеомагнитных аномалий мирового океана. Составители: Карасик А.М. и Сочеванова Н.А. ЛО ИЗМИРАН. Л.: 1981

Ковалев О.Б., Оришич А.М., Петров А.П., Фомин В.М., Юдин П.В. Образование двухфазной вихревой структуры при воздействии струи воздуха на расплав парафина в узком канале // ДАН, 2007. Т. 414. № 6. С. 756-760.

Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на P- и S-волнвх. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.

Кузнецов В.В. Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности. Новосибирск: ИГиГ. 1985. 71 с.

Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990.

Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли. УФН. 1997. Т.167. № 9. С. 1001-1012.

Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. С. 166-172.

Кузнецов В.В. Земля как термодинамическая система // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 7. С.987-1007.

Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КГУ. 2008. 368 с.
Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир. 1991. 447 с.
Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука. 1973. 417с.
Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 733 с.
Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с
Маслов Л.А. Изучение динамики крупномасштабных движений литосферы по значениям высот геоида. В кн. Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии. Киев: Наукова думка. 1988. С. 193-197.
Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. М.: Мир. 1984. 811 с
Печерский Д.М. Инверсии геомагнитного поля, плюмы и изменения органического мира в фанерозое: удивительные совпадения // Физика Земли. 2003. № 1. С. 53-56.
Т. 331. N.3. С. 302-305
Писниченко И.А. Роль фазовых переходов влаги в процессе образования смерчей // Известия АН. ФАО. 1993. Т. 29. № 6. С. 793-798.
Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах. М.: ИЛ. 1952. 264 с.
Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 345 с.
Харланд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г, Пиктон К.А.Г., Смит А.Г., Уолтерс Р. Шкала геологического времени. М.: Мир. 1985. 188 с
Чудинов Ю.В. Расширение Земли и тектонические явления: о направлении движений в окраинно-океанических зонах. Геотектоника. № 1. 1981. С. 19-37.
Шен Э.Л. Расширение Земли в связи с формированием её глобальной структуры. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. С.180-185.
Шен Э.Л. Типы внутренней структуры Земли и возможные схемы эволюции Земли и планет. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 2. С. 18-25.
Юсупалиев У., Маслов А.К., Шутеев С.А. Тепловыделение как механизм самоподдержания закрученного потока в газе // Прикладная физика. 2000. №. 1. С. 5-10.

Adjaout A., Sarrailh M. A new gravity map, a new marine geoid around Japan and the detection of the Kuroshio current. J. Geodesy. 1997. V. 71. P. 725-735.
Carey S.W. The expanding Earth. Amsterdam. Elsevier. 1976. 486 p.
Harabaglia P., Doglioni C. Topography and gravity across subduction zones. Geoph. Res. Lett. 1998. V. 25. № 5. P. 703-706.
Foulger G. Mantle plumes: heat-flow near Iceland; In response…; D. Anderson. Look again; N. Sleep. Mantle plumes? // Astronomy & Geophysics. February 2003. V. 44. P. 1.9 – 1.13
Fuller M., Weeks R. Superplumes and superchrons. Nature. 1992. V. 356. P. 16.
Imakire T. Crustal deformation observed by GEONET, 2000. Geography and Crustal Dynamics Research Center. http://mekira.gsi.go.jp/ENGLISH/index.html
Karato S-i The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. Nature. 1990. V. 347. P. 272-273.
Kato T., Kotake Y., Nakao S. et al., Initial results from WING, the continuous GPS network in western Pacific area. Geoph. Res. Lett. 1998. V. 25. NO. 3. P. 369-372.
Kerr R.A. Rising plumes in Earth's mantle: phantom or real? // Science 2006. V. 313. P. 1726.
Kuznetsov V.V. Characteristic features of continental drift. Modern Geology. 1990. V. 14. P. 239-243.
Larson R.L. Geological consequences of superplumes. Geology. 1991. V. 19. P. 963-966.
Larson R.L., Olson P. Mantle plumes control magnetic reversal frequency // Earth Planet. Sci. Lett. 1991. V. 107. № 3/4. P. 437.

Lewis Ch., Smith A.D. The geoid, plate configuration and Antarctica. Геофизический журнал. 1998. Т. 20. № 4. С. 3-8.
Ni S., Tan E., Gurnis M., Helmberger D. Sharp sides to the African superplume. Science. 2002. V. 296. P. 1850-1852.
Nolet G., Karato S.-I., Montelli R. Plume fluxes from seismic tomography // Earth Planet. Sci. Lett. 2006. V. 248. P. 685-699.
Plate-tectonic map of the Circum-Pacific region. Pacific basin sheet. 1985. Chairman M.T.Halbouty. Tulsa. Oklahoma. USA.
Shu-Chuan Lin, P.E. van-Keken. Dynamics of thermochemical plumes: 1. Plume formation and entrainment of a dense layer. 2. Complexity of plume structures and its implications for mapping mantle plumes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2006. V. 7. doi:10.1029/2005GL001072.
Tarduno J. A., Duncan R. A., Scholl D.W., Cottrell R.D., Steinberg B., Thordarson T., Kerr B. C., Neal C.R., Frey F. A., Torri M., Carvallo C. The emperor seamounts motion of the Hawaiian hotspot plume in Earth's mantle // Science. 2003. V. 301. P. 1064-1069.
Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. J. Stat. Phys. 1988. V. 52. P. 479-487.

Глава 18. Тепло Земли.

В 18-ой главе обсуждается: распределение температуры по Земле; геотермические измерения на континентах и в океане; определение теплового потока и геотермического градиента; уравнение теплопроводности; магматическая деятельность Земли как показатель температуры земных глубин; температура в ядре Земли; источники тепловой энергии Земли; методы измерений, аппаратура и результаты, источники тепла, температура в недрах Земли, тепловой режим Земли.

18. 1. Температура Земли (Магницкий, 2006; Викулин, 2009).

Средняя температура земной поверхности около 15 °С, со средними колебаниями около 2° в течение года. Температура данной точки на земной поверхности зависит главным образом от солнечной радиации, достигающей этой точки, и угла, под которым солнечные лучи падают на поверхность. Следует учитывать также излучение, отдаваемое Землей обратно в пространство, и теплообмен посредством воздушных течений. Средний поток солнечного тепла, достигающий поверхности Земли на континентах, составляет по порядку величины 10^{-2}кал/см^{2}сек. Поэтому поток тепла из недр Земли, составляющий около 10^{-6} кал/см^{2}сек, по сравнению с ним пренебрежимо мал. Температура дна океанов определяется локальной температурой воды, которая в глубоких океанах близка к 0° С.

Изучение тепловых процессов, протекающих в Земле, - один из самых умозрительных разделов геофизики. Объясняется это тем, что данные о наблюдаемом на поверхности тепловом потоке и температуре в недрах Земли можно интерпретировать многими различными способами. Для областей Земли глубже 100 км наши знания о распределении температуры весьма ненадежны, а расположение источников тепла и механизм его переноса неизвестны. Однако изучение теплового режима весьма важно, поскольку потеря тепловой энергии Землей может быть, прямо или косвенно, причиной большей части тектонических и магматических процессов.

Рассмотрим основные энергетические процессы, в которых участвует Земля. Самое большое количество энергии Земля получает от Солнца (10^{32} эрг/год), но значительная ее часть излучается обратно в пространство. Лишь малая доля солнечной энергии проникает в глубину, измеряемую метрами. Действительно, в слоях, расположенных близко к поверхности континентов, все периодические изменения температуры убывают с глубиной по экспоненциальному закону. На глубине порядка 1 м от поверхности суточные изменения температуры становятся настолько малыми, что ими можно пренебречь. Так при среднем для поверхностных пород коэффициенте теплопроводности интервал изменения температуры в 20° С на поверхности сократится до 1,4° на глубине 30 см и менее чем до 0°,004 на глубине 1 м. На глубине 30 см вычисленное запаздывание по времени составляет около 10 часов. Все эти расчетные значения, в основном, согласуются с наблюдениями. Поэтому солнечное излучение является основным источником энергии лишь для процессов, совершающихся на поверхности твердой Земли и над ней. Солнечное излучение управляет также температурой на поверхности Земли, защищаемой от резких перемен покровом атмосферы. В то же время тепловое влияние солнечной энергии на процессы в недрах Земли пренебрежимо малы по сравнению с той энергией, которая выделяется внутренними источниками тепла. Энергия, высвобождающаяся при землетрясениях (10^{25} эрг/год), как и энергия приливного трения ($3\cdot10^{26}$ эрг/год), замедляющего вращение Земли, также невелика по сравнению с геотермической потерей тепла (10^{28} эрг/год).

В настоящее время принято считать, что *основным источником* современной *тепловой энергии* в недрах Земли *является радиоактивный распад* долгоживущих изотопов. На ранних этапах истории Земли существенную роль в тепловых процессах могла играть освобождающаяся гравитационная энергия. По мере рассеяния тепла малая

доля потока Земли переходит в другие формы энергии, которые вызывают тектонические и магматические процессы, метаморфизм и создают магнитное поле Земли.

18. 2. Геотермические измерения на континентах и в океане. Определение теплового потока и геотермического градиента. (Гутенберг, 1963; Магницкий, 2006; Ботт, 1974; Шейдеггер, 1987; Стейси, 1971) .

Из первых принципов - очевидно, что Земля представляет собой тепловую машину. Это означает, что энергия, вызывающая геодинамические явления, генерацию геомагнитного поля, сейсмичность и вулканизм - является результатом тепловых процессов, показателем которых можно считать величину теплового потока. Очевидно также, что при такой постановке, - на Земле не может быть ни одного процесса с энергией, большей тепловой. К сожалению, термальная история Земли известна недостаточно, так как она непосредственно связана с вопросами происхождения Земли и химическим составом ее недр.

Температура внутренних частей Земли в настоящее время известна с очень малой точностью. Температура ее верхних частей до глубин 50 км известна несколько лучше. Мы располагаем следующими источниками сведений о температуре верхних частей Земли: данными геотермических измерений, данными о генерации тепла главными типами горных пород, данными о температурах изливающихся лав и данными об электропроводности.

Тот факт, что тепло повсеместно истекает из недр Земли в пространство, с очевидностью доказывается повышением температуры с глубиной в любой скважине или шахте (рис. 18-1); температурные градиенты, измеренные на разных объектах, изменяются от 25 °С до 40 °С на 1 км. Следовательно, тепловой баланс может осуществляться только в том случае, если тепло поступает во внешнее пространство из недр Земли.

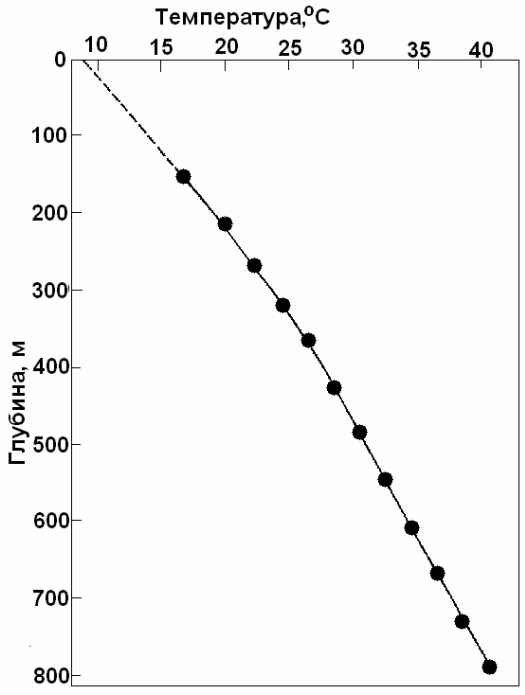


Рис. 18-1. Результаты определения теплового потока в скважине «Рукхоуп» (Станоп, Северная Англия). Измерения проводились через три года после завершения бурения.

Измерения теплопроводности 13 гранитных образцов, взятых с равноотстоящих горизонтов между глубинами 427 и 792 м, представлены гистограммой внизу (Ботт, 1974; с.215). Общие результаты таковы:

Термический градиент (427 – 792 м) = 32.45±0.01° С/км,
Поправка за топографию = -1.55± 0.50° С/км,
Исправленный термический градиент dT/dn = 30.90±0.51° С/км,
Измеренная теплопроводность χ = 0.0070±0.0002кал/(см сек ° С),
Тепловой поток исправленный за топографию = 2.16±0.07 мккал/(см^2 сек).

Геотермические измерения выполнялись как на континентах, так и на дне океанов. Тепловой поток определяется как произведение:

$$Q = -\chi \frac{\partial T}{\partial n}, \qquad (18.1)$$

где χ - коэффициент теплопроводности, $\partial T/\partial n$ – температурный градиент по нормали к поверхности Земли.

На континентах температурные градиенты определялись путем измерения температуры и коэффициента теплопроводности пород на различных глубинах в буровых скважинах (рис. 18-1). Обычно для этого применяются максимальные термометры, которые находятся нередко в воде, но часто в неподвижном воздухе. По возможности измерения проводятся в течение нескольких часов с помощью нескольких термометров одновременно. Измерения должны выполняться глубже 200 м (чтобы избежать остаточного влияния плейстоценового оледенения). Перед измерениями необходимо выждать некоторое время, чтобы в скважине (или шахте) установилось тепловое равновесие. Это время должно быть в несколько раз больше времени, затраченного на бурение скважины. Затем значения, полученные в течение нескольких периодов измерений, осредняются.

Теплопроводность образцов горных пород из скважины измеряется или в лаборатории, или же непосредственно на месте.

Пример измерения теплового потока в скважине «Рукхоуп» (Станоп, северная Англия) показан на рис. 18-1. Тепловой поток здесь оценивается значением 2,16±0,07 мккал/(см^{2}сек).

По-видимому, впервые метод измерения термического градиента океанического дна опробовал Петтерсон. В последующие годы (1950 г.) Буллард и его коллеги применили этот метод в Тихом и Атлантическом океанах. Данный метод основан на измерении разности температур в отложениях океанического дна вдоль вертикального зонда, который имел длину около 0,5 м и диаметр около 3 см. В этих экспериментах зонд находился примерно в течение 15 мин на расстоянии около 100 м над дном океана. После этого он со скоростью 2-3 м/сек заталкивался в дно и оставался там в течение 30-40 мин. Поведение зонда детально изучалось и экспериментально и теоретически. По оценкам Булларда и др., при благоприятных условиях ошибки в определении температурного градиента не превышают 3%.

Температурные градиенты отдельных областей сильно различаются, а также изменяются с глубиной, причем зависят, главным образом, от теплопроводности. При этом значения температурных градиентов варьируют в пределах 0,1 - 0,01 град/м. Часто в качестве репрезентативного значения принимается значение 1/30 град/м ≈ 30 град/км.

Коэффициент теплопроводности χ определялся многими исследователями. Как правило, теплопроводность данного образца для большинства пород уменьшается с увеличением температуры. Для образцов, отобранных из дна океана, существенно водосодержание, так что необходимо обеспечить такое положение, при котором водосодержание таких образцов не изменялось бы. Из опубликованных данных следует, что χ = 0,005 кал/см·град·сек для многих пород коры, он близок к значению 0,01 для ультраосновных пород. Для оливина и пироксена определено значение χ = 0,012 при 0 °С и χ = 0,008 кал/см·град·сек при 200 °С. Для кровли осадочных отложений дна Атлантического океана для коэффициента теплопроводности получено значение между

0,0023 и 0,0027, а для верхнего слоя осадков в Тихом океане он лежит между 0,0016 и 0,0025.

Средние значения теплового потока для разных регионов Земли приведены в табл. 1. (сомнительные результаты исключены) и представлены на рис. 18-2 а, б, в, г.

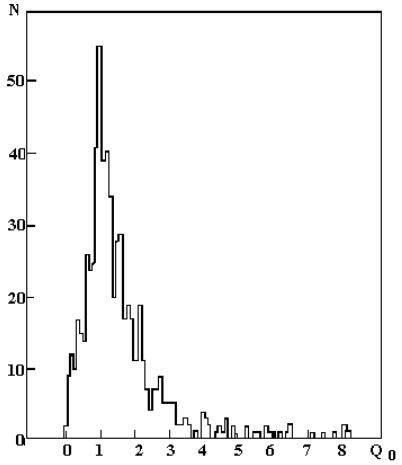


Рис. 18-2 а. Гистограмма распределения значений тепловых потоков для Земли в целом (Магницкий, 1965).

В представленных данных возможность появления систематических ошибок за счет климатических влияний исключается. Для измерений на материках этот вопрос разобран Берчем. Он не обнаружил существенного влияния климата на градиент температуры и показал, что необходимая поправка, во всяком случае, не превышает 3°С/км, т. е. составляет не более 15% среднего значения градиента. Важнее иметь уверенность в том, что климат не влияет на измерения в океане. Действительно, датчики температуры углубляются в дно лишь на несколько метров, и можно ожидать, что колебания температуры воды окажут на измерения заметное влияние. К счастью, холодная вода, образующаяся при таянии полярных льдов, стекает во все глубокие части океанов и поддерживает там почти постоянно низкую температуру. Кроме того, нет пока воды, фильтрующейся сквозь морские осадки.

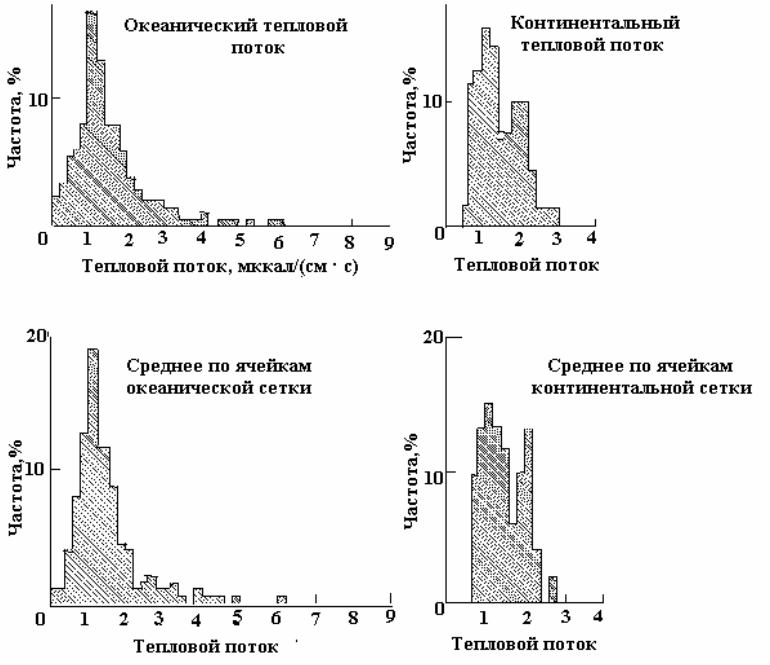


Рис. 18-2 б. Сравнение распределений океанического и континентального тепловых потоков. Вверху – гистограммы значений теплового потока, внизу – гистограммы средних

значений по сетке с ячейкой 90 тыс.кв. морских миль. 1 морская миля = 1.8 км (Ботт, 1974; с. 217).

Все эти факты означают, что на океанах скорее можно получить правильные значения теплового потока, чем на суше. Фон Герцен и Максвелл установили, что градиент температуры в скважине, пробуренной в дне океана (предварительная скважина проекта «Мохол»), совпал с результатами стандартных измерений в близлежащих точках. Поэтому вряд ли значительная доля теплового потока через дно океана обусловлена запасенным теплом, оставшимся после жаркого периода, когда на Земле не было ледяных полярных шапок.

Значения Q на поверхности Земли, как видно из данных табл. 18.1 и рис. 18-2, колеблются довольно сильно. Наибольшая частота таких значений, как видно из данных рис. 18-2, приходится на значение $Q_0 = 1{,}1 \cdot 10^{-6}$ кал/см^2·сек. Однако кривая распределения несимметрична. Это приводит к тому, что среднее значение теплового потока приходится на величину $Q_{0,ср} = 1{,}50(\pm 0{,}15) \cdot 10^{-6}$ кал/см^2·сек. При таком среднем значении потеря тепла путем теплопроводности с достоверностью 10% составляет $2{,}4 \cdot 10^{20}$ кал/год или 10^{28} эрг/год. Распределение значений теплового потока по поверхности Земли не совсем случайно (рис. 18-2 б, в). Для щитов и платформ Q обычно составляет $0{,}9 \cdot 10^{-6}$ кал/см^2·сек. В противоположность этому тепловой поток в ряде районов, особенно в горах последнего цикла складчатости (Альпы, горы Японии), оказывается повышенным до $2 \cdot 10^{-6}$ кал/см^2·сек и даже выше. Это же относится и к дну океанов. Хотя средний тепловой поток через дно океанов приблизительно равен потоку на континентах и отличается постоянством на обширных океанических равнинах, но на дне океанов имеются области – подводные валы, где тепловой поток резко повышен и доходит до $6{,}7 \cdot 10^{-6}$ кал/см^2·сек (рис. 18- 2).

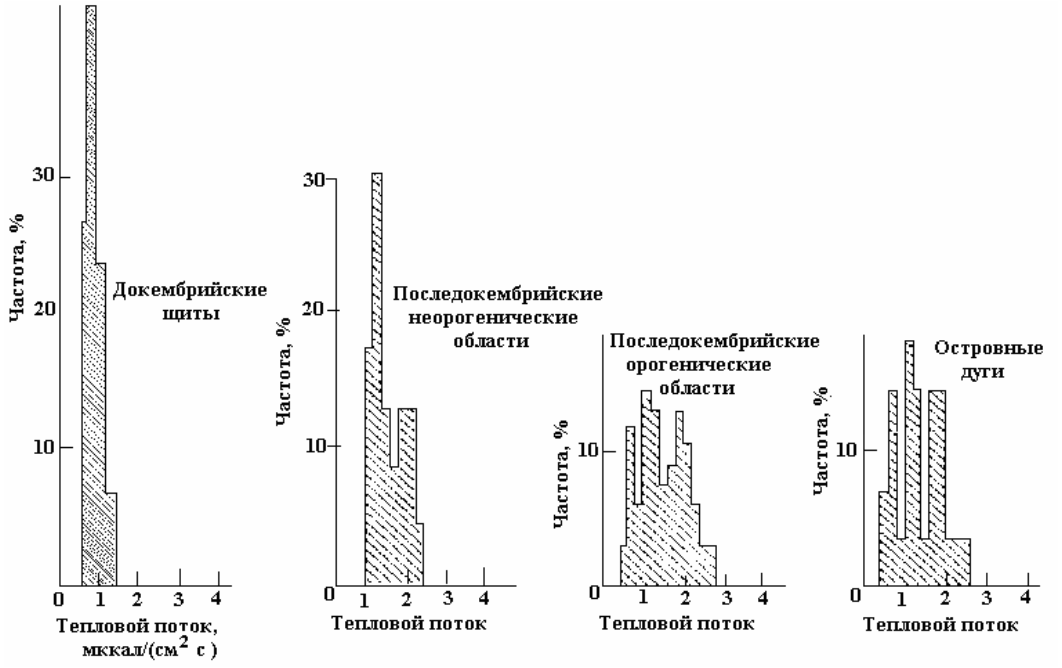


Рис. 18-2 в. Гистограммы значений теплового потока для разных континентальных регионов (Ботт, 1974; с. 219).

Регионы с более высокими (положительными) аномалиями теплового потока называются «горячими точками». В настоящее время все еще ведутся споры относительно того, движутся ли эти горячие точки вместе с тектоническими плитами во время их дрейфа или же они имеют более глубокое происхождение (в мантии). Суть проблемы заключается в том, что из равенства тепловых потоков на материках и океанах следует

равенство на единице площади количества радиоактивных элементов, генерирующих тепло. Это особенно удивительно, если вспомнить, что литосфера под континентами и океанами имеет разное строение. Действительно, известно, что континентальные породы содержат вблизи поверхности намного больше радиоактивных веществ, чем океанические. Это различие должно каким-то образом уравновешиваться на глубине.

Общая связь теплового потока с геологией видна также из данных табл. 18.1 и рис. 18-2. Из сравнения регионов разного типа следует, что чем раньше закончились магматические процессы, связанные с формированием региона (орогез), тем меньше величина современного теплового потока. Этот общий вывод, по-видимому, верен, но не нужно забывать, что существуют значительные изменения теплового потока местного характера. В частности, они наблюдаются над такими структурами, как Срединно-Атлантический хребет, где, вероятно, имеются локализованный источники тепла, находящиеся на глубинах до нескольких десятков километров. Вероятно, такие источники аналогичны вулканическим областям на суше; их вклад в глобальное распределение потока мал.

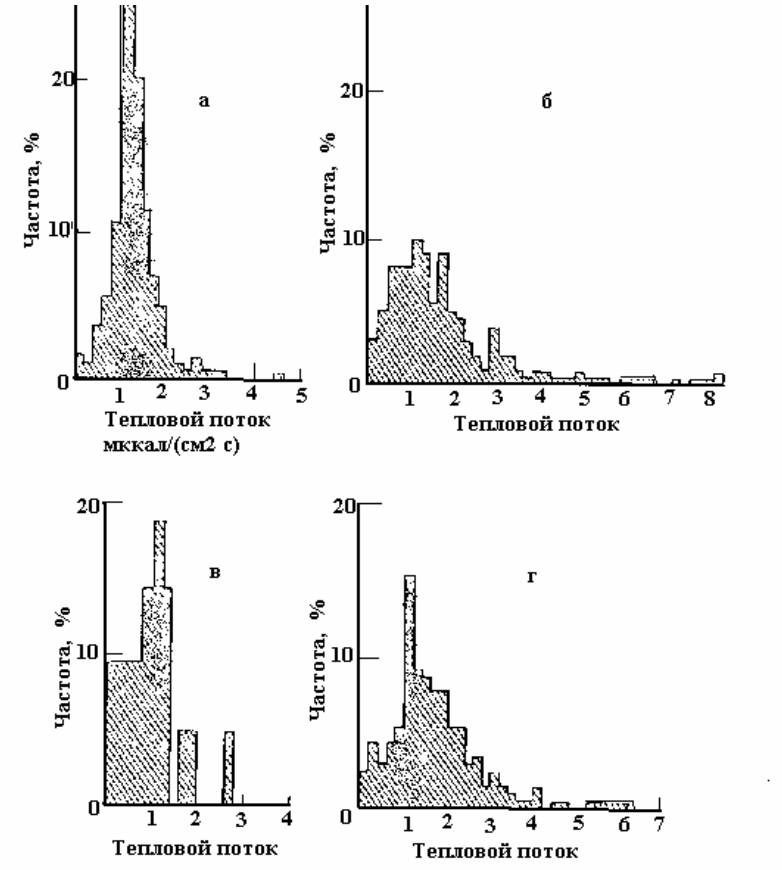


Рис. 18-2 г. Гистограммы значений теплового потока для четырех основных типов океанических регионов (Ботт, 1974; с. 220). а – океанические котловины, б – океанические хребты, в – океанические желоба, г – другие океанические регионы.

К приведенной потере тепла Землей через теплопроводность следует добавить потери тепла другими путями.

Магматическая деятельность Земли приводит к поднятию и излиянию на поверхность раскаленных лав и других продуктов. Считая, что с начала кембрия ($5 \cdot 10^8$ лет назад) было около 30 излияний платобазальтов объемом каждое в 10^6 км^3, что каждый грамм поднятого на поверхность базальта дал за счет охлаждения 300 кал и за счет теплоты кристаллизации 100 кал, получаем потерю тепла в $0{,}8 \cdot 10^{17}$ кал/год. Если учесть вулканизм дна океанов, другие виды вулканизма, о можно эту потерю увеличить на порядок, т. е. считать $Q = 10^{18}$ кал/год. Таким образом, этот путь теплопотерь, который

может быть доминирующим для некоторых ограниченных районов, пренебрежимо мал в масштабе всей Земли.

Наконец, следует учесть вынос тепла термальными водами. Такие области, как гейзерные поля, например, долина Гейзеров на Камчатке, области выходов термальных источников по разломам, как, например, термальная линия Копет-Даг, дают вынос тепла в размерах 10^{16}-10^{17} кал/год, т. е. их вклад весьма невелик. Гораздо существеннее вынос тепла водами, циркулирующими в осадочной толще Земли. Произвести точную оценку теплопотерь таким путем не удается, но вполне возможно, что она достигает величины того же порядка, что и через теплопроводность. Таким образом, следует иметь в виду, что приведенной выше значение потери тепла в $2{,}4 \cdot 10^{20}$ кал/год может быть увеличено примерно вдвое.

Таблица 1. Средние значения теплового потока в мккал/(см^2 сек) в регионах с различными типами геологического строения коры (Стейси, 1972; с. 270).

Материки		
Докембрийские щиты	0.92 ± 0.17	(26)
Последокембрийские неорогенические области	1.54 ± 0.38	(23)
Последокембрийские орогенические области (кроме зон Кайнозойского вулканизма)	1.48 ± 0.56	(68)
Зоны Кайнозойского вулканизма	2.16 ± 0.46	(11)
Среднее для материков (кроме геотермальных областей)	1.43 ± 0.56	(128)
«Среднесеточное» для материков *)	1.41 ± 0.52	(51)
Океаны		
Основная часть бассейнов	1.28 ± 0.53	(273)
Океанические хребты	1.82 ± 1.56	(338)
Желоба	0.99 ± 0.61	(21)
Прочие (шельфы и др.)	1.71 ± 1.05	(281)
Среднее для дна океана	1.60 ± 1.18	(915)
«Среднесеточное» для океанов *)	1.42 ± 0.78	(338)
Среднее для Земли (по всем значениям)	1.58 ± 1.14	(1043)
«Среднесеточное» для Земли *)	1.43 ± 0.75	(389)

*) Каждое значение, использованное для получения «среднесеточного», представляет собой среднее из всех измерений, попадающих на квадрат 5 х 5° (300 х 300 морских миль). Таким способом уменьшается влияние мест, густо покрытых измерениями. Одновременно вклад отдельных изолированных измерений может оказаться преувеличенным. При вычислении «среднесеточного» для всей Земли были использованы дополнительные данные, что объясняет некоторое различие в значениях этих трех среднесеточных.

Карта теплового потока представлена на рис. 18-3. Сравнение её с картой геоида, построенной по спутниковым данным, позволяет сделать вывод, что связь между распределением теплового потока и силы тяжести возможна.

18. 3. Уравнение теплопроводности, **ее виды в Земле.**

Оценка температуры в верхней части литосферы (до глубин около 100 км) по данным геотермических измерений (теплового потока), магматической деятельности (по температуре лав) и электропроводности (Магницкий, 1965; с. 6 – 12).

В настоящее время единственной более или менее достоверно определенной величиной, характеризующей теплопотери Земли, является тепловой поток Q_0, обусловленный теплопроводностью. Поэтому в дальнейшем при оценке температуры верхних частей Земли будем исходить из приведенного выше значения теплового потока $Q_{0,ср}$, считая, что весь перенос тепла осуществляется только через теплопроводность.

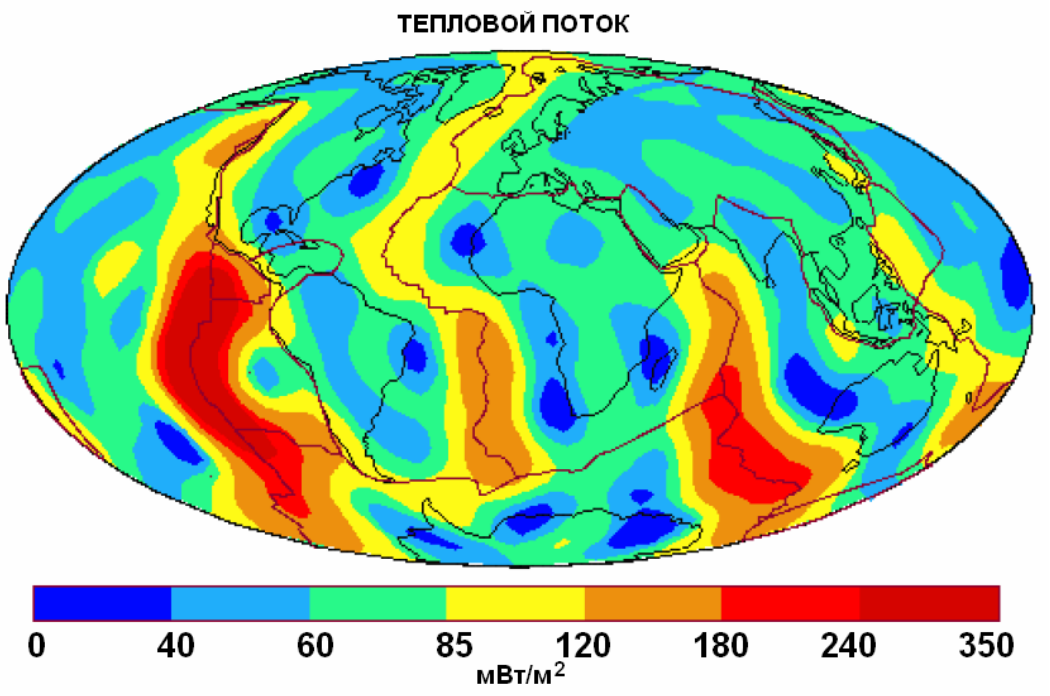


Рис. 18-3. Карта теплового потока Земли.

Исходным в этом случае будет уравнение теплопроводности

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\chi\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\chi\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\chi\frac{\partial T}{\partial z})+P(x,y,z,t)\,, \qquad (18.2)$$

где ρ - плотность, c – теплоемкость, T – температура, χ - теплопроводность, P – генерация тепла в единице объема, t – время.

Направляя ось z вертикально вниз и считая в первом приближении, что T и P не зависят от x и y, приходим к случае одномерной задачи:

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}(\chi\frac{\partial T}{\partial z})+P(z,t)\,. \qquad (18.3)$$

Поскольку в дальнейшем расчеты будут вестись для глубин не более 100 км, то кривизной Земли можно пренебречь.

В качестве граничных условий при решении (18.3) можно взять температуру T_0 и тепловой поток $Q_{0,ср}$ на поверхности Земли. Осложнения возникают с начальными условиями. Если температуру U считать от $T_0 = const$: $U = T – T_0$, т. о. решение уравнения

$$\rho c\frac{\partial U}{\partial t}=\chi\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}+P(z,t)$$

при постоянных ρ, c и χ, при начальном: $U(z, 0) = 0$ и граничных: $U(0, t) = 0$, $U(\infty, t) \neq \infty$ условиях дается формулой

$$U(z,t)=\frac{1}{2\sqrt{\pi}}\int_0^t d\tau\int_0^\infty\frac{h}{\sqrt{t-\tau}}[e^{-\frac{(\zeta-z)^2}{4h^2(t-\tau)}}-e^{-\frac{(\zeta+z)^2}{4h^2(t-\tau)}}]P(\zeta,\tau)d\zeta\,, \qquad (18.4)$$

где $h^2 = \chi/\rho c$ – тепловая функция.

Как показали исследования, для глубин менее 100 км в случае Земли температурный режим можно считать стационарным, полагая P не зависящей от времени, что связано с медленным изменением P со временем при большом возрасте Земли. Ошибки при этом будут составлять единицы процента.

Таким образом, при оценке современной температуры на глубинах до 100 км уравнение (18.3) принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial z}(\chi \frac{\partial T}{\partial z}) = -P(z). \qquad (18.5)$$

Решение этого уравнения не зависит от начального условия.

Для решения уравнения (18.5) необходимо знать вид функций $P(z)$ и $\chi(z)$. Наибольшие затруднения связаны с определением генерации тепла P. Основным источником тепла в верхних частях Земли являются радиоактивные элементы, рассеянные в горных породах.

Чтобы получить вид функции $P(z)$, необходимо рассматривать два случая: случай континентальной коры и случай океанической коры. Континентальная кора имеет мощность в среднем около 40 км и состоит из «гранитного» и «базальтового» слоев мощностью примерно по 20 км каждый.

«Гранитный» слой состоит не из одного гранита; генерация тепла в гранитах падает с увеличением их возраста. С учетом этих данных, примем генерацию тепла P в «гранитном» слое равной $4{,}2 \cdot 10^{-13}$ кал/см^{3}сек, что соответствует составу слоя на 2/3 из гранита и 1/3 из базальта.

В случае океанической коры будем считать, что кора мощностью 6 км имеет генерацию тепла такую же, как у габбро. Генерацию тепла в подкоровом слое можно определить следующим образом. Равенство теплового потока на континентах и океанах (табл. 18.2) показывает, что на единицу поверхности приходится одинаковая генерация тепла в обоих случаях; но на континентах эта генерация, в основном, сосредоточена в коре, куда были увлечены радиоактивные элементы в процессе образования земной коры при дифференциации вещества мантии Земли. Под океанами же генерация тепла рассредоточена на большую глубину, так как мантия здесь почти дифференцирована (кора очень тонкая). Таким образом, генерация тепла в недифференцированной мантии получится путем рассредоточения источников тепла континентальной коры на всю глубину дифференциации, которая составляет около 400 км. Таким образом, рассредоточивая источники равномерно до глубин 400 км, получим генерацию тепла в оболочке под океанами в $0{,}25 \cdot 10^{-13}$ кал/см^{3}сек.

Таблица 2. Данные о генерации тепла на 1 см^3 для различных пород (Магницкий, 2006).

Порода…..	Гранит	Габбро	Эклогит	Дунит	Хондриты	Железные метеориты
$P \cdot 10^{13}$ кал/см^3 сек	5.7	1.2	0.1	0.02	0.04	0.00003

Определим зависимость $\chi(z)$. Как уже отмечалось выше, теплопроводность зависит от состава пород, давления и температуры. Для глубин до 50 км основную роль играет решеточная часть теплопроводности, причем влияние давления на этом интервале глубин пренебрежимо мало по сравнению с влиянием температуры. Из теории твердого тела можно показать, что если известен коэффициент теплопроводности χ_0 при температуре T_0, то коэффициент теплопроводности χ при температуре T будет определяться из соотношения:

$$\chi = \chi_0 T_0 / T. \qquad (18.6)$$

Подставляя (18.6) в (18.5) и учитывая приведенные выше количества генерации тепла под океанами и материками можно рассчитать значения температур в пределах земной коры (табл. 8.3).

Таблица 18.3. Распределение температуры в коре (Магницкий, 2006).

Параметры	Континент			Океан		
Глубина, км…….	20	40	50	11	40	50
Температура, °С…..	380	650	700	130	850	1100

18. 4. Магматическая деятельность Земли как показатель температуры земных глубин (Магницкий, 2006).

Различают два основных типа магматической деятельности Земли: эффузивный, при котором лавы извергаются на поверхность, и интрузивный, при котором расплав застывает внутри земной коры, образуя интрузивные горные породы. Оба эти типа могут быть использованы для оценки температуры Земли. Наиболее прямые данные можно получить по измерениям температур вулканических лав.

То обстоятельство, что вулканы существуют не повсеместно, вызывает сомнение в том, насколько репрезентативны данные о температуре земных глубин, определенные таким путем.

В настоящее время известно около 500 действующих вулканов, большинство которых приурочено к Тихоокеанскому орогеническому поясу. Значительное число вулканов приурочено к молодым орогеническим зонам, к зонам современных разломов (например, в Восточной Африке), к океаническим валам. Однако, если учесть проявление вулканизма, например, с начала кембрия, то картина размещения вулканов окажется более равномерной. К этому следует добавить весьма широко распространенную вулканическую деятельность океанического дна, что было установлено исследованиями последних десятилетий.

Таким образом, можно утверждать следующее. Во-первых, температуры, получаемые по данным вулканических извержений, достаточно репрезентативны, хотя, вероятно, они и несколько выше средней температуры соответствующих глубин, поскольку по данным сейсмологии вещество оболочки Земли везде твердое и расплавы встречаются лишь в виде отдельных локальных очагов. И, во-вторых, все проявления вулканизма, начиная с кембрия, могут приниматься во внимание при оценках современных температур внутри Земли.

При оценке температур земных глубин по вулканической деятельности возникают две основные задачи: определение глубины первичного источника питания вулканов и определение температуры в очаге.

- Работами камчатских ученых П.И. Токарева, А.А. Гусева, Л.С. Шумилиной и С.А. Федотова показано, что у берегов Камчатки и Курильских островов на глубинах около 60 - 100 км существует слабый минимум сейсмической активности. Этот минимум некоторыми исследователями связывается с тем, что на этих глубинах существуют очаги вулканов, в которых происходит образование расправленной магмы. Однако существует точка зрения, согласно которой таких очагов как таковых не существует и магматический расплав в виде больших капель поступает из верхней мантии.
- Прямые измерения дают значения изливающихся лав в интервале 800-1200 °С. Анализ условий, при которых в пределах земных недр на глубинах около 100 км может образоваться расплав, показывает, что значения температур могут быть несколько выше и составлять 1300 °С.

Таким образом, анализ магматической деятельности Земли показывает, что на глубинах около 100 км значения температуры могут достигать 800-1300 °С. Полученные значения не противоречат приведенным выше оценкам.

Температура верхних частей Земли по данным об электропроводимости (Магницкий, 1965; с. 21 – 22). Электропроводимость вещества Земли на разных глубинах может быть использована для определения температуры, так как она очень сильно зависит от температуры. Электропроводность вещества Земли для глубин 20-100 км составляет 10^{-4} ом$^{-1}$см$^{-1}$. Используя экспериментальные данные о параметрах, определяющих значение электропроводимости вещества верхней части мантии, можно показать, что температура на глубинах 20-100 км имеет значение около 1200-1400 °С.

Таким образом, все способы определения дают для глубин около 100 км значение температуры от 1000 до 1400 °С.

Понятие о нижнем температурном пределе в мантии и его оценка с помощью адиабатического температурного градиента. Обоснование верхнего температурного предела в мантии как температуры плавления (Магницкий, 1965; с. 22 – 28). При оценке температуры в оболочке Земли на глубинах от 50 км до 2900 км (до границы земного ядра) возникают еще большие затруднения. При этом ненадежность получаемых результатов значительно увеличивается. Для этих глубин нельзя применить метод, основанный на использовании тепловых потоков, ввиду полного отсутствия данных. Неприменим и метод, исходящий из определения температур лав. Со значительными трудностями мы сталкиваемся и в методе, основанном на определениях электропроводности.

Рассмотрение вопроса о температуре больших глубин лучше всего начать с попыток установить возможные верхний и нижний пределы температуры на соответствующих глубинах. В качестве нижней границы обычно принимается кривая адиабатической температуры, так как нагрев за счет сжатия должен обязательно быть, а отток тепла, могущий понизить эту границу, был для больших глубин, видимо, невелик.

Адиабатический градиент определяется термодинамической формулой:

$$dT/dp = \alpha T/c_p\rho, \qquad (18.7)$$

где p – давление; α - коэффициент объемного расширения; ρ - плотность пород, c_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Распределение плотности ρ с глубиной (r) в настоящее время достаточно хорошо известно. Наибольшие затруднения связаны с определением α и c_p. Если для горных пород взять средние значения $\alpha \approx 4\cdot10^{-5}$ град$^{-1}$, $c_p \approx 0{,}3$ кал/г·град, определяемые экспериментально, то, учитывая, что

$$dp = -\rho g dr, \qquad (18.8)$$

и, следовательно, из (18.7)

$$dT/dr = g\alpha T/c_p, \qquad (18{,}9)$$

получим адиабатический градиент:

$$dT/dr \approx 0{,}5\ °\text{С/км},$$

при этом принималось T = 1300 °С. Однако такая оценка слишком груба, так как α и c_p меняются с глубиной.

Для более строгой оценки величины отношения α/c_p воспользуемся известными из термодинамики и физики твердого тела соотношениями. В результате, если знаем температуру T_1 на глубине H_1, можно получить следующее соотношение:

$$\ln\frac{T}{T_1} = \int_{H_1}^{H} g\frac{\alpha}{c_p}dH\,. \qquad (18.10)$$

В табл. 4 приведены значения α/c_p и T/T_{100}, вычисленные теоретически, а также несколько иным способом, основанным на теории Дебая, а также адиабатические температуры, считая, что T_{100} = 1250 °С.

Расчеты и имеющиеся экспериментальные данные показывают, что в мантии Земли кривая температуры плавления всегда идет круче, чем кривая равновесной температуры.

***Экспериментальное определение температуры плавления в мантии**; результаты и трудности. О термодинамической формуле Клаузиуса-Клайпейрона. Определение температуры плавления в мантии по гипотезам плавления Линдемана и Жаркова. О реальных температурах в мантии* (Магницкий, 1965; с. 27 – 33).

Сейсмические данные позволяют установить, что поперечные волны проходят через мантию Земли. Исключение, возможно, составляют отдельные камеры под активными вулканами (магматические очаги). Таким образом, оболочка Земли от границы Мохоровичича ($H \approx 33$ км) до границы ядра ($H \approx 2900$ км) находится в эффективно твердом состоянии. Если учесть, что интервал разжижения силикатных стекол обычно начинается при температурах около $1{,}1T_\text{m}$, где T_m – температура плавления, то для всех глубин в мантии Земли за возможный верхний предел температуры можно принять температуру плавления.

К сожалению, определение температуры плавления для больших глубин связано со значительными трудностями. Имеющиеся экспериментальные данные относятся к некоторым простейшим случаям и не позволяют отыскать T_m для глубин, больших 50-100 км. Для «сухого» диопсида получено, например:

$$p = 23{,}3[(T/1665)^{4{,}46} - 1],$$

где T – в абсолютной шкале, p – в кбар. Это дает градиент кривой плавления 15,4 К/кбар. Для пород обычно градиенты ниже; так, для базальта всего 6 К/кбар. Присутствие воды делает ситуацию еще более неопределенной.

Экстраполяция опытных данных на большие глубины по формуле Клаузиуса-Клайперона $dT_m/dp = \Delta V/\Delta S$ практически невозможна из-за незнания изменения ΔS с увеличением давления, где ΔV и ΔS – изменение объема и энтропии при плавлении.

В силу этого в настоящее время пользуются формулами, построенными по той или иной гипотезе о процессе плавления.

Определение температуры плавления по Линдеману основано на предположении, что плавление наступает тогда, когда амплитуда тепловых колебаний атомов достигает определенной доли от параметра решетки.

Расчеты показывают, что температура плавления T_m на глубине H связаны с температурой плавления T_{m1} на глубине H_1 следующим образом:

$$T_m = T_{m1}\frac{(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2)_H}{(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2)_{H_1}}, \qquad (18.11)$$

где V_P и V_S – скорости продольных и поперечных волн на соответствующих глубинах.. Выражение (18.11) называется формулой Линдемана.

Другое определение T_m основано на гипотезе, которая заключается в том, что плавление наступает при некоторой определенной концентрации дефектов в решетке (гипотеза В.Н. Жаркова (Жарков, Трубицын, Самсонов, 1971)). Расчеты показывают, что

$$T_m = T_{m0}\frac{w_0}{w}(\frac{\rho}{\rho_0})^{\nu/3}, \qquad (18.12)$$

где w, ρ, T_m и w_0, ρ_0, T_{m0} – энергии образования дефекта, плотности среды и температуры при давлениях p и p_0 соответственно.

Из опытов с перидотитом $\nu/3 = 2{,}55$.

На рис. 18-4 приведены кривые плавления в оболочке Земли от глубины 100 км до границы ядра. Значение температуры T_{m0} на глубине 100 км принято равным 1800 К. Кривая 1 получена методом Линдемана при условии, что молекулярный вес вещества оболочки – величина постоянная. Кривая 2 получена методом критической концентрации тепловых дефектов в случае $w = w_0$. Формула (8-12) справедлива в слое однородного состава, поэтому она применяется для слоев от 100 км до 400 км и от 1000 км до 2900 км, которые могут считаться однородными. Значение для T_m в интервале от 400 км до 1000 км можно получить интерполяцией. Плотность ρ_0 на глубине 100 км для нижнего слоя находится экстраполяцией кривой плотности (по Буллену, модель «А»), значение плотности – наиболее близкое к действительности. Вертикальные линии на кривых рис. 18-4 показывают границы неопределенности, если для $\nu/3$ взять вместо 2,55 значения 2,3 или 2,8. Маловероятно, что энергии образования дефектов для разных компонент мантии равны, скорее следует ожидать, что такая энергия больше в более плотном нижнем слое. Следовательно, можно предполагать, что на глубинах больше 400 км кривая 2 должна подойти ближе к кривой 1, чем показано на рис. 18-4. Для совпадения обеих кривых достаточно, чтобы энергия образования дефектов в более плотном нижнем слое была больше на 40%, что представляется умеренным требованием.

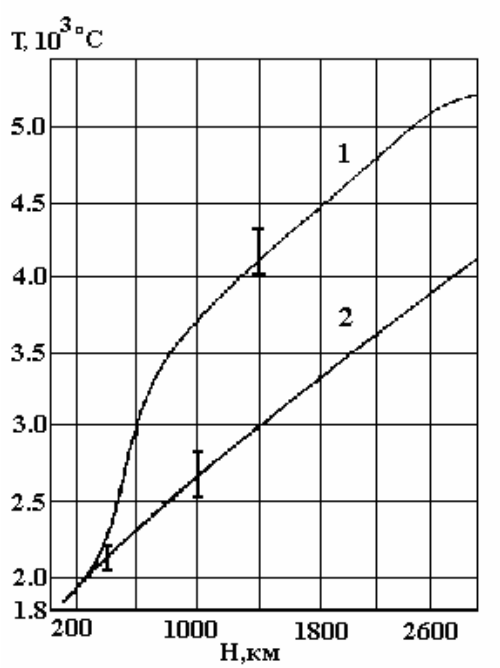


Рис. 18-4. Кривые плавления в оболочке Земли в диапазоне глубин от 100 км до границы ядра, в предположении, что $T_{м0}$ (H = 100км) = 1800 °С. Вертикальные линии на кривых показывают границы неопределенности. Видно, что температура на границе ядра, по-видимому, не может превышать 5000 °С (Магницкий, 1965; с. 33).

В заключение отметим, что температура на границе ядра, как следует из данных, представленных на рис. 18-4, не может превышать 5000 °С.

18. 5. Температура в ядре Земли, ее оценка с помощью уравнений для состояния железа при давлении и плотности в ядре; температура плавления железа; адиабатическая температура и др. (Магницкий, 1965; с. 37 – 39).

Земное ядро начинается на глубине 2900 км и находится в жидком состоянии. На глубине 5100 км отмечается граница внутреннего ядра, которое можно считать эффективно твердым.

О температуре ядра имеется еще меньше сведений, чем о температуре в мантии Земли.

Поскольку земное ядро металлическое по своим свойствам, то здесь может быть применена теория металлов. Кроме того, жидкое состояние ядра позволяет утверждать, что в нем температурный градиент не превосходит адиабатический.

Хотя вопрос о составе ядра остается дискуссионным, тем не менее, в последние годы появляется все больше материалов, подтверждающих большую роль железа в его составе.

Уравнение состояния железа сейчас хорошо известно до давлений, включающих и соответствующие давления в области ядра. Поэтому предположение о железном ядре позволяет определить температуру ядра по давлению и плотности. Однако получаемые при этом температуры неоправданно высоки: от 6000 К на границе ядра до 11000 К в центре Земли. По-видимому, ядро не может быть чисто железным, хотя железо и играет большую роль в составе ядра. Предположение о том, что ядро состоит из сплава железа (например, с кремнием), сразу делает вопрос о температуре весьма неопределенным.

Обычно температура в ядре оценивается по температуре плавления железа, при этом применяют формулу Симона:

$$p/a = (T_m/T_{m0})^c - 1, \qquad (18.13)$$

которая была сначала получена эмпирически, а затем выведена из формулы Линдемана (18.11). Здесь a и c – постоянные. Пользуясь экспериментальными данными, для величины c получено значение c = 1,9. На рис. 18-5 приведена кривая плавления *Fe* для условий в ядре, если для железа T_{m0} = 1805 К.

На рис. 18-5 пунктиром дана кривая плавления для железа, полученная по методу критических концентраций дефектов и уравнению состояния для железа. Эта кривая соответствует значению c = 2,15 в формуле Симона (18.13). Если считать, что переход к твердому внутреннему ядру вызван кристаллизацией, то по кривым на рис. 18.5 можно подсчитать температуру, которая на глубине 5000 км равна 6000 К. Конечно, наличие примесей к железу может довольно заметно изменить эту температуру. При оценке адиабатической температуры независимо от гипотезы о железном составе ядра используется формула для адиабатической температуры, которая для случая жидкого слоя примет вид:

$$T^3/\rho V_P^3 = const. \qquad (18.14)$$

Приняв T на глубине 5000 км за единицу, получим температуры в ядре (табл. 18.4).

При T_{5000} = 6000 К находим T_{2900} = 4300 К, что лежит внутри пределов температуры на границе ядра. Интересно отметить, что полученный адиабатический градиент практически совпадает с градиентом температуры плавления для железного ядра (см. рис. 18.5). Адиабатический градиент для железного ядра, вычисленный по уравнению состояния железа, вдвое меньше (табл. 6) и дает на границе ядра T_{2900} = 5200 К, что совпадает с предельной температурой плавления оболочки. Конечно, принятое значение T_{5000} = 6000 К может быть заметно завышенным, так как добавление к железу, например, примесей кремния в количестве *20%* снижает температуру плавления на 300 К. Если же ядро состоит в основном не из железа, а из металлизированных силикатов, то сказать что-либо о температуре ядра еще труднее. Однако, применяя формулу Линдемана, можно все еще оценить и температуру плавления металлизированных силикатов. На рис. 18.5 кривая «силикаты» показывает предполагаемый ход плавления.

Обобщенная температурная кривая по радиусу Земли. Источники тепла Земли и их относительный вклад в общий тепловой баланс планеты. Гипотезы и варианты тепловой истории Земли (Магницкий, 1965; с. 38 – 45). Подводя итог имеющихся сведений о температуре земных недр, можно отметить следующие основные температуры: T_{100} = 1100-1300 °С, T_{400} = 1400-1700 °С, T_{2900} = 2200-4700 °С. Если провести плавную

кривую через середины этих интервалов (точки *A, B, C*), то получим наиболее вероятное распределение температур внутри Земли по имеющимся у нас данным (рис. 8-6).

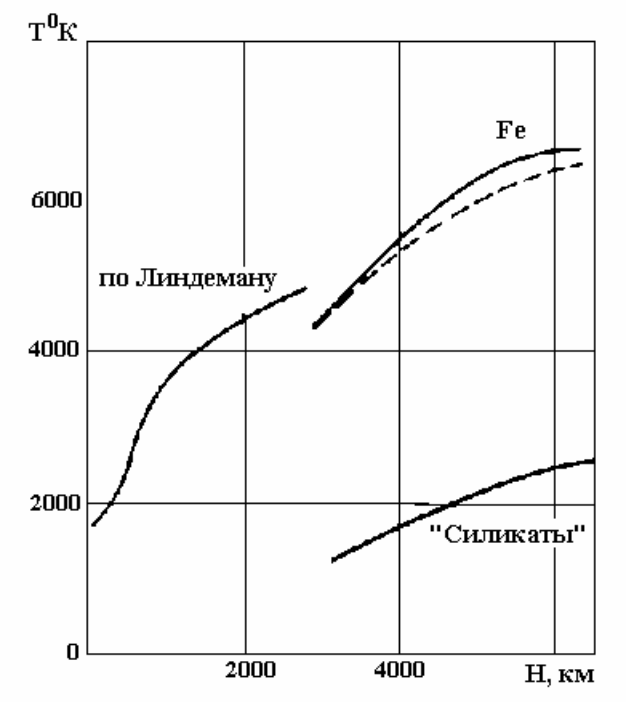


Рис. 18-5. Кривая плавления Fe для условий в ядре при $T_{м0}$ = 1805 К. Пунктиром для железа проведена кривая плавления, рассчитанная с помощью метода критических концентраций дефектов в соответствии с уравнением состояния железа (Магницкий, 1965; с. 37).

Таблица 4. Распределение температура в ядре в долях T (H=5000км) = 1. При T_{5000} = 6000 К находим T_{2900} = 4300 К (Магницкий, 1965; с. 38).

H, км	T_H / T_{5000}	
	Жарков, 1962	Valle, 1954
2900	0.86	0.72
3500	0.92	0.81
4000	0.95	0.89
5000	1.00	1.00

Для ядра на глубинах больше 2900 км кривая температур проведена до точки *C* по адиабате. Пользуясь формулой (8.14), получим для глубины 5000 км температуру 5000 °С, что по существу не отличается от простой экстраполяции температурной кривой из оболочки в ядро. Пунктиром показан ход кривой температуры от точки *C* по адиабате в жидком ядре железного состава.

18. 6. Источники тепловой энергии Земли.

Прежде чем рассматривать проблему термической истории Земли, необходимо упомянуть об источниках тепловой энергии. К сожалению, вопрос этот еще очень плохо изучен и сколько-нибудь полная оценка источников энергии в настоящее время невозможна. Остановимся на основных.

1. Энергия солнечного излучения. Температура нагрева за счет излучения Солнца определяется из равенства получаемой и излучаемой энергий. С учетом наличия в

атмосфере Земли паров воды и других поглотителей длинных волн температура земной поверхности сейчас составляет 10-15 °С.

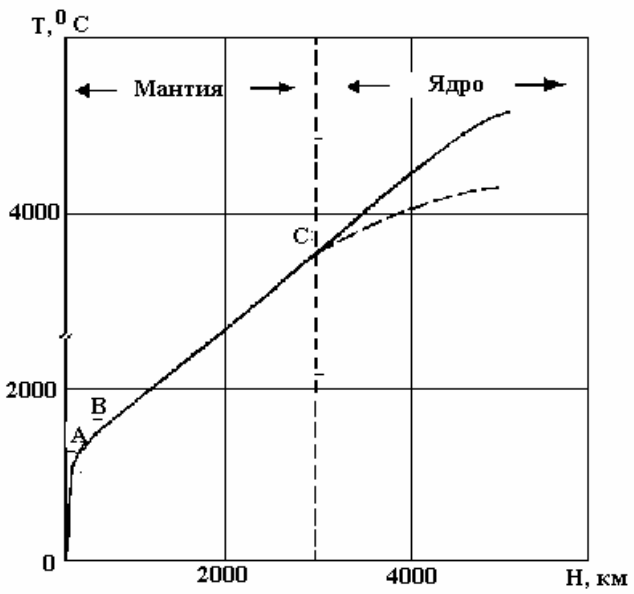


Рис. 18-6. Вероятное распределение температур внутри Земли (Магницкий, 2006).

2. Энергия радиоактивных превращений имеет в термике Земли, видимо, доминирующее значение. К сожалению, сведения о содержании источников радиогенного тепла внутри Земли отсутствуют. Все заключения по этому поводу делаются по аналогии с метеоритами. При этом оболочке приписывается выделение тепла, определенное для хондритов, а ядру – для железных метеоритов. При этом энергия радиогенных источников вполне покрывает всю теплопотерю Земли. Однако это лишь очень грубая и мало оправданная оценка. По существу, не достаточно оснований считать, что состав современных метеоритов, прошедших долгий, сложный и своеобразный путь своего развития, является аналогом оболочек Земли. Особенно это касается такого вопроса, как содержание радиоактивных элементов. На своеобразие метеоритов указывает хотя бы тот факт, что каменные метеориты содержат около *10%* металлического железа, чего нет в горных породах. Далее, если считать, что большинство метеоритов – это обломки планет из пояса между Марсом и Юпитеров, то в данном случае трудно говорить об аналогиях с Землей.

3. Гравитационная энергия Земли как потенциальная энергия притягивающихся друг к другу точек. Так как Земля по современным представлениям возникла из протопланетного облака, то приблизительная оценка гравитационной энергии для земли составляет $U = -2{,}25 \cdot 10^{39}$ эрг. Около 20% этой огромной энергии уходит на простое упругое сжатие Земли в поле тяжести. Но оставшаяся энергия огромна. При массе Земли $(1\text{-}10)10^{27}$ г и ее теплоемкости 0,3 кал/г·град **такая энергия способна нагреть Землю до 28000 °С**.

Однако такая оценка (по мнению Магницкого) *бессмысленна,* так как разогрев Земли целиком определяется принятой схемой образования планеты из протопланетного облака, поскольку при этом возникают огромные потери тепла на излучение. Наиболее детально этот вопрос рассмотрен применительно к гипотезе О.Ю. Шмитда. Разогрев поверхности растущей планеты за счет падения на нее тел дается условием равновесия энергии излучения с поверхности и поступающей энергии. Анализ показывает, что разогрев в результате такого процесса весьма невелик.

4. Еще одним источником тепловой энергии Земли может быть процесс гравитационной дифференциации вещества, в результате которой образовалось плотное ядро и менее

плотная оболочка. Считая Землю сначала однородной, а затем расслоенной, получаем разогрев на 2000 °С.

К сожалению, эта оценка сильно зависит от других предположений. Если Земля прошла через расплавленное состояние, то расслоение в этот период не могло привести к существенному температурному эффекту в силу быстрого выноса тепла конвекцией. Если ядро Земли образовалось в результате перехода силикатов в металлическую фазу под действием давления, то почти вся энергия была израсходована на образование этой фазы, а не на разогрев. Таким образом, роль этого фактора весьма неопределенна.

- Энергия химических реакций сейчас почти не поддается учету; возможны процессы выделения и поглощения тепла.
- Энергия вращения Земли определяется как $E = C\Omega^2/2$, где C – момент инерции Земли, Ω - угловая скорость. Учитывая численные значения этих параметров, получаем $E = 2{,}16 \cdot 10^{36}$ эрг. Эта величина незначительна даже по сравнению с энергией гравитационной дифференциации.
- В настоящее время наблюдается вековое замедление скорости вращения Земли $d\Omega/dt = -5 \cdot 10^{-22}$сек$^{-2}$. Если это замедление связано с изменением момента инерции, то тепловой поток через поверхность Земли будет пренебрежимо мал по сравнению с полным потоком.
- В настоящее время считается, что замедление вращения вызвано, в основном, не изменением момента инерции, а приливным трением, вызванным Луной. В этом случае тепловой поток через поверхность планеты составит около 18% от всего теплового потока Земли.
- Упомянем еще некоторые источники тепла: фазовые превращения, самопроизвольное деление ядер, космическое излучение, радиоактивные превращения элементов с малым периодом жизни. Вклад всех этих источников, кроме фазовых превращений, пренебрежимо мал. Что касается энергии фазовых превращений, то ее роль оценить пока невозможно, в некоторых случаях она может быть весьма существенной.
- Наконец, следует отметить энергию тектонических процессов и, в частности, энергию землетрясений. Эта энергия не является первичной. Для объяснения самой тектонической активности требуется найти источник энергии. Однако перенос энергии сейсмическими волнами, возникающими при землетрясениях, может привести к некоторому перераспределению энергии в Земле. С одной стороны, энергия, переносимая сейсмическими волнами, распределяется более равномерно во всем объеме оболочки и коры благодаря поглощению средой, в которой волны распространяются. С другой стороны, сейсмическая энергия может стать существенным источником нагревания земного ядра. Если считать генерацию радиоактивного тепла в ядре такой же, как и в железных метеоритах, и сейсмическую энергию Земли в 10^{25} эрг/год, то при условии, что ядро поглощает только 1% энергии сейсмических волн, эта энергия будет равна радиогенной. Жидкое ядро с достаточной вязкостью должно поглощать значительно больше 1% энергии сейсмических волн, которая, таким образом, может быть основным источником тепла для земного ядра.

Источники тепла. Тепловой поток, поднимающийся из недр Земли, является важным физическим полем, которое позволяет судить не только о строении, но, как мы увидим позже, и о возрасте Земли. Тепловой поток мы можем наблюдать только на поверхности планеты. Он зависит от температурного градиента в измеряемой точке и определяется формулой $q = -\lambda \, grad \, T$, где λ - теплопроводность горных пород, $gradT$ - геотермический градиент. Понятно, что для положительного теплового потока температура горных пород должна убывать отсюда знак минус в формуле.

Как уже говорили, температурный градиент можно измерить близко к поверхности, хотя очень важно знать и глубинные распределения температуры. От этого зависят наши представления об источниках тепловой энергии планеты. Приведем данные об энергетике

Земли, которую можно оценить следующим способом. Полная тепловая энергия, выделенная с площади S за время t очевидно равна $E = qtS$.

Таблица 5. Энерговыделение на Земле

Источник энергии	F, (эрг/год)
Солнечная энергия	10^{32}
Геотермическая энергия	10^{28}
Упругая энергия землетрясений	10^{25}
Энергия, теряемая при замедлении вращения Земли	$3 \cdot 10^{26}$
Тепло, выносимое при извержении вулканов	$2.5 \cdot 10^{25}$

Хотя самое большое количество энергии Земля получает от Солнца, но лишь очень малая его часть проникает вглубь планеты. Остальная часть излучается обратно в пространство. Тепловое излучение планет - один из источников информации о состоянии поверхности планет и ее атмосферы. Методы инфракрасной астрономии дали очень много сведений, например, о Венере, особенно в доспутниковый период исследований. На глубинах 40-50 м под поверхностью Земли температура остается практически постоянной, как в метро, где "летом прохладно, зимой тепло". Именно на этих глубинах измеряют тепловой поток от внутренних источников.

Специалисты полагают, что геотермальная энергия 10^{28} эрг/год слишком велика, чтобы считать ее естественным оттоком тепла от первоначально разогретой Земли. В 1899 году лорд Кельвин посчитал, за какой отрезок времени земная кора могла бы остыть до современного состояния, если изначально она была расплавленной. Оказалось, что этот уровень будет достигнут за 25 миллионов лет. Геологи с этим числом решительно не согласились, так как по их оценкам для накопления необходимого количества осадочных пород, слагающих кору, понадобятся, по крайней мере, сотни миллионов лет. Тем не менее, следует считать, что оценка Кельвина - это первая попытка определить возраст планеты.

Время остывания планеты зависит как от теплопроводности пород, так и толщин слоев, из которых сложена планета. Вещество земных недр обладает малой теплопроводностью, а расстояния - огромны. Для количественной оценки времени выравнивая тепла Δt на расстоянии Δl можно применить формулу $\Delta t \approx \Delta l c_p \rho / \lambda$, где c_p - теплоемкость при постоянном давлении. Если принять, что расстояние равно радиусу Земли, то окажется, что Земля остынет за 10^{12} лет, что много больше, чем возраст Земли. Отсюда следует вывод, что в глубинных недрах нашей планеты только за счет теплопроводности температура пока остается постоянной.

Концентрацию тяжелых элементов в верхних слоях Земли объясняют тем, что они формировались позже остальных и имели большие объемы. Вследствие этого они были вытеснены из плотно упакованных кристаллических решеток силикатов и вместе с легкой фракцией всплыли наверх.

Термическая история Земли. ***Гипотеза «горячего» происхождения*** (Магницкий, 2006). В настоящее время большинство исследователей считают наиболее вероятной гипотезу происхождения Земли из газо-пылевого, протопланетарного облака с относительно

низкой начальной температурой планеты. Однако не исключены и другие варианты. Даже при «холодном» варианте, если допустить существование для Земли достаточно большого возраста, то приведение ее в расплавленное состояние возможно на ранней стадии развития в силу большого выделения на этом этапе радиогенного тепла. При этом дальнейшая история Земли будет соответствовать гипотезе горячего происхождения. Наконец, этот вариант термической истории Земли имеет определенное историческое значение, мантию и железное ядро. В каждой из этих оболочек благодаря выносу тепла конвекцией установилось адиабатическое распределение температуры, которое схематически показано верхней пунктирной линией на рис. 18.7. Сплошной кривой на этом рисунке изображено изменение температуры плавления по данным, изложенным в предыдущих параграфах этого раздела.

Быстрое остывание при наличии конвекции ведет к опусканию адиабатической кривой, последовательные положения которой показаны пунктиром на рис. 18-7. Так как адиабатический градиент меньше градиента температуры плавления, то адиабата встретится с кривой плавления впервые в точке А (в центре Земли), откуда и начнется процесс затвердения.

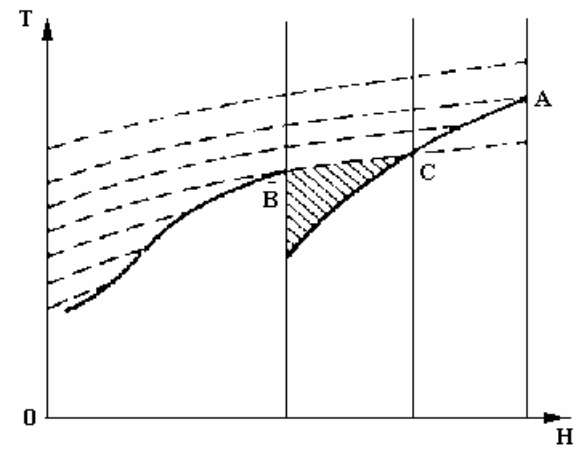


Рис. 18-7. Быстрое остывание при наличии конвекции ведет к «опусканию» адиабатической кривой, последовательные положения которой показаны пунктиром. Так как адиабатический градиент меньше градиента температуры плавления, то адиабата «встретится» с кривой плавления впервые в точке А (центр Земли), откуда и начнется процесс затвердения (Магницкий, 1965; с. 46).

Когда адиабата встретит кривую плавления в точке *B* (граница ядра) и одновременно в С (граница внутреннего ядра), то начнется затвердение оболочки, что сразу приведет к резкому снижению оттока тепла из областей ниже точки В. Таким образом, между *B* и *C* остается область расплавленного ядра Земли (штриховка на рис. 18-7). Что касается температуры в оболочке, то, как видно из схемы, она к моменту окончательного затвердения будет везде равна температуре плавления и только в самой верхней части быстро упадет так, чтобы не поверхности установилась температура около 0° С, обусловливаемая солнечным излучением.

Дальнейшая история Земли определяется уже только переносом тепла через теплопроводность и генерацией тепла (формула 18.2). При этом в качестве граничных условий берутся температура на поверхности, равная 0° С, и температура, нигде не обращающаяся в бесконечность. В качестве начального условия принимается температура плавления T_m. Решая соответствующую краевую задачу, получаем, что остыванием на глубинах больше 800 км за все время существования Земли можно за всю геологическую историю Земли, не превосходит сотни градусов.

Гипотеза «холодного» происхождения. Термическая история Земли с учетом переменной теплопроводности и перераспределения источников по глубине исследовалась рядом авторов. Основные результаты этих исследований показывают исключительно большую зависимость получаемых выводов от принятой интенсивности источников тепла, от закона их распределения по глубине, от принятой теплоемкости, от коэффициента поглощения и от возраста Земли. Различия в некоторых случаях имеют качественный характер. Так, в зависимости от принятой схемы распределения источников тепла по глубине можно установить, что земная кора в настоящее время или остывает, или разогревается.

В результате исследований можно получить вывод о твердой оболочке и о наличии в ней расплавленного слоя. При этом современный тепловой поток через земную поверхность будет в пределах точности равен наблюдаемому тепловому потоку.

Для иллюстрации на рис. 18-8 приведены некоторые результаты таких исследований: пунктирная кривая – кривая плавления, кривая 1 – кривая температуры или интенсивности источников тепла, соответствующей среднему содержанию радиоактивных элементов в метеоритах, теплоемкости 0,2 кал/г·град, коэффициенте поглощения 200 $см^{-1}$. Возраст Земли принят $5 \cdot 10^9$ лет; считают, что через $2 \cdot 10^9$ лет после образования Земли началось перераспределение источников тепла так, что они стали перемещаться из верхних 1000 км мантии в кору Земли толщиной 30 км. Закон перераспределения таков, что число источников тепла в коре со временем увеличивается линейно от начальной концентрации до современной, дающей генерацию тепла в коре $2{,}9 \cdot 10^{-13}$ кал/$см^3$·сек, что отвечает составу коры из одной части гранита и двух частей базальта. Кривая 2 на рис. 8-8 получена при тех же условиях, только теплоемкость принята равной 0,3 кал/г·град. Как видно из данных на рис. 8-8, это приводит к резко иным результатам.

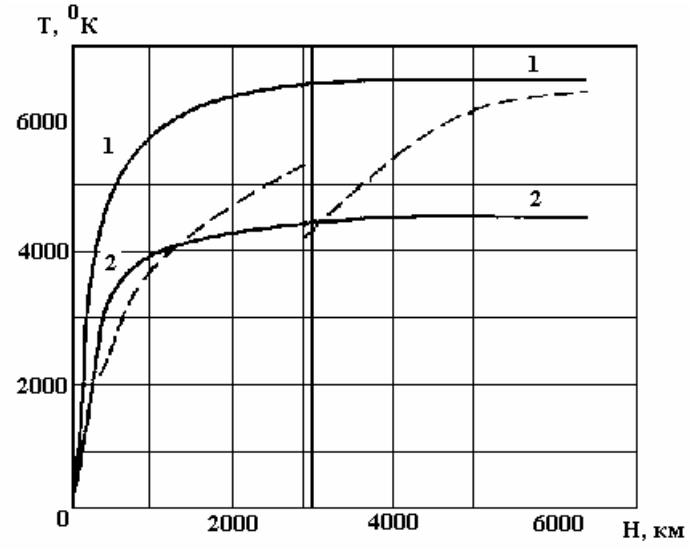


Рис. 18-8. Изменение температуры внутри Земли при разных предположениях. Пунктиром проведена кривая плавления. Пояснения в тексте (Магницкий, 1965; с. 52).

Таким образом, для суждения о действительной термической истории Земли у нас еще явно не хватает данных и в настоящее время приходится ограничиваться лишь качественной по существу оценкой различных схем развития Земли.

18. 7. Методы измерений и результаты.

Распределение температуры по Земле. Определение pT-параметров на поверхности Земли в прошлом по составу пузырьков в минералах и изотопному методу.

Термометры. Изобретателем термометра надо считать Галилея: в его собственных сочинениях нет описания этого прибора, но ученики Галилея, Нелли и Вивиани, свидетельствуют, что уже в 1597 г. он устроил нечто вроде термобароскопа. Галилей изучал в это время Герона Александрийского, у которого уже описано подобное приспособление, но не для измерения степеней тепла, а для поднятия воды при помощи нагревания. Все другие лица, которым приписывают изобретение термометра: лорд Бакон, Роберт Флудд, Санкториу и др. писали позднее, что получали информацию о термометре от Галилея. Все эти термометры были воздушные и состояли из сосуда с трубкою, содержащего воздух, отделенный от атмосферы столбиком воды; они изменяли свои показания и от изменения температуры, и от изменения атмосферного давления.
Сначала термометры наполняли водою, и они лопались, когда она замерзала; употреблять для этого винный спирт начали по мысли великого герцога тосканского Фердинанда II. Флорентинские термометры сохранились в нескольких экземплярах до нашего времени в Галилеевском музее, во Флоренции.
Скважинный термометр ЭТС-10У **-** предназначен для измерения температуры в скважинах различного назначения:
- небольшие габаритные размеры;
- стабильность показаний в диапазоне температур от 10 ^{o}C до 70 ^{o}C;
- высокая эксплуатационная надежность.

Результаты измерений зависимости температуры от глубины приведены на рис. 18-9.

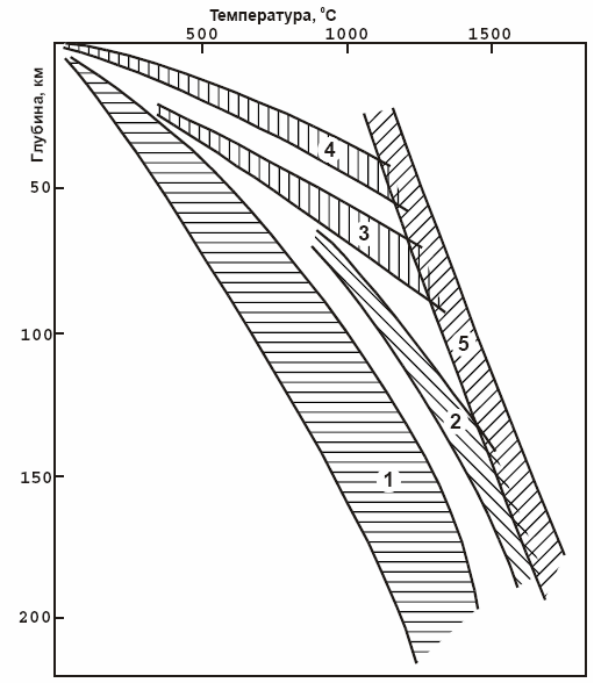


Рис. 18-9. Геотермы для континентов и океанов: 1- докембрийские щиты и платформы, 2 – герцениды, 3 – океанские плиты, 4 – альпиды, 5 – солидус сухих пород верхней мантии.

Технические характеристики:

Диапазон измерения температуры, ^{o}C	0-70
Чувствительность датчика, ^{o}C	0,01
Тип датчика	резистивный
Максимальное гидростатическое давление в зоне исследований, МПа	22

Максимальная рабочая температура в зоне исследований, ^{o}C	70
Габаритные размеры скважинного прибора, мм:	
диаметр	36; 48; 76
длина	500-800
Вес скважинного прибора, кг	5

18. 8. Тепловая история Луны.

Современная температура лунных недр зависит от ее начальной температуры и тепла, выделившегося и сохранившегося с момента ее образования. Начальная высокая температура внешних слоев Луны в основном обязана кинетической энергии вещества, падавшего на Луну на заключительной стадии ее формирования. Определенный вклад мог внести и короткоживущий изотоп алюминий-26. Вместе эти явления могли породить «океан» расплавленной магмы глубиной в сотни километров и дефицит летучих элементов.

Выделение тепла в глубоких слоях Луны зависит от концентрации радиоактивных изотопов уран-235, уран-238, торий-232 и, в меньшей степени, калий-40. Сохранение этого тепла зависит от теплопроводности внешних слоев Луны. Тепловой поток из лунных недр был измерен экспедициями «Аполлон-15 и -16» и показал относительно высокое содержание урана и тория на фоне дефицита других тугоплавких элементов. Современный температурный профиль Луны, т.е. ход температуры с глубиной, был изучен в экспериментах по электропроводности. Оказалось, что температура плавления достигается лишь на глубине 1000 км; это согласуется с сейсмическими данными о небольшом расплавленном ядре и глубине очагов лунотрясений около 800 км.

18. 9. Тепловая эволюция Земли.

Вопрос ранней эволюции Земли тесно связан с теорией её происхождения. Сегодня известно, что наша планета образовалась около 4.6 млрд лет назад. В процессе формирования Земли из частиц протопланетного облака постепенно увеличивалась её масса. Росли силы тяготения, а следовательно, и скорости частиц, падавших на планету. Кинетическая энергия частиц превращалась в тепло, и Земля всё сильнее разогревалась. При ударах на ней возникали кратеры, причём выбрасываемое из них вещество уже не могло преодолеть земного тяготения и падало обратно.

Чем крупнее были падавшие тела, тем сильнее они нагревали Землю. Энергия удара освобождалась не на поверхности, а на глубине, равной примерно двум поперечникам внедрившегося тела. А так как основная масса на этом этапе поставлялась планете телами размером в несколько сот километров, то энергия выделялась в слое толщиной порядка 1000 км. Она не успевала излучится в пространство, оставаясь в недрах Земли. В результате температура на глубинах 100 – 1000 км могла приблизиться к точке плавления. Дополнительное повышение температуры, вероятно, вызывал распад короткоживущих радиоактивных изотопов.

По-видимому, первые возникшие расплавы представляли собой смесь жидких железа, никеля и серы. Расплав накапливался, а затем вследствие более высокой плотности просачивался вниз, постепенно формируя земное ядро. Таким образом, дифференциация (расслоение) вещества Земли могла начаться ещё на стадии её формирования. Ударная переработка поверхности и начавшаяся конвекция, несомненно, препятствовали этому процессу. Но определённая часть более тяжёлого вещества всё же успевала опуститься под перемешиваемый слой. В свою очередь дифференциация по плотности приостанавливала конвекцию и сопровождалась дополнительным выделением тепла, ускоряя процесс формирования различных зон в Земле.

Предположительно ядро сформировалось за несколько со миллионов лет. При постепенном остывании планеты богатый никелем железоникелевый сплав, имеющий высокую температуру плавления, начал кристаллизоваться – так зародилось твёрдое внутреннее ядро. К настоящему времени оно составляет 1.7% массы Земли. В расплавленном внешнем ядре сосредоточено около 30% земной массы. Развитие других оболочек продолжалось гораздо дольше и в некотором отношении не закончилось до сих пор.

Литосфера сразу после своего образования имела небольшую толщину и была очень не устойчивой. Она снова поглощалась мантией, разрушалась в эпоху великой бомбардировки (от 4.2 до 3.9 млрд. лет назад), когда Земля, как и Луна, подвергалась ударам очень крупных и довольно многочисленных метеоритов. На Луне и сегодня можно увидеть свидетельства метеоритной бомбардировки – многочисленные кратеры и моря (области, заполненные излившейся магмой). На нашей планете активные тектонические процессы и воздействие атмосферы и гидросферы практически стёрли следы этого периода.

Около 3.8 млрд. лет назад сложилась первая лёгкая и, следовательно, «непотопляемая» гранитная кора. В то время планета уже имела воздушную оболочку и океаны; необходимые для их образования газы усиленно поставлялись из недр Земли в предшествующий период. Атмосфера тогда состояла в основном из углекислого газа, азота и водяных паров, кислорода в ней было мало, но он вырабатывался в результате, во – первых, фотохимической диссоциации воды и, во – вторых фотосинтезирующей деятельности простых организмов, таких, как сине – зелёные водоросли.

600 млн. лет назад на Земле было несколько подвижных континентальных плит, весьма похожих на современные. Новый сверхматерик Пангея появился значительно позже. Он существовал 300 – 200 млн. лет назад, а затем распался на части, которые и сформировали нынешние материки.

Что ждёт Землю в будущем? На этот вопрос можно ответить лишь с большой степенью неопределённости, абстрагируя как от возможного внешнего, космического влияния, так и от деятельности человечества, преобразующего окружающую среду, причём не всегда в лучшую сторону.

В конце концов, недра Земли остынут до такой степени, что конвекция в мантии и, следовательно, движение материков (а значит, и горообразование, извержение вулканов, землетрясения) постепенно ослабнут и прекратятся. Выветривание со временем сотрёт неровности земной коры, и поверхность планеты скроется под водой. Дальнейшая её судьба будет определятся среднегодовой температурой. Если она значительно понизится, то океан замёрзнет и Земля покроется ледяной коркой. Если же температура повысится (а скорее к этому и приведёт возрастающая светимость Солнца), то вода испарится, обнажив равную поверхность планеты. Очевидно, ни в том, ни в другом случае жизнь человечества на Земле будет уже не возможна, по крайней мере, в нашем современном представлении о ней.

18. 10. Использование глубинного тепла Земли.

Геотермальная энергия *- в дословном переводе значит: тепловая энергия Земли.*

Объём Земли составляет примерно 1085 млрд. куб.км и весь он, за исключением тонкого слоя земной коры, имеет очень высокую температуру.

Если учесть ещё и теплоёмкость пород Земли, то станет ясно, что геотермальная теплота представляет собой, несомненно, самый крупный источник энергии, которым в настоящее время располагает человек. Причём это энергия в чистом виде, так как она уже существует как теплота, и поэтому для её получения не требуется сжигать топливо или создавать реакторы.

В некоторых районах природа доставляет геотермальную энергию к поверхности в виде пара или перегретой воды, вскипающей и переходящей в пар при выходе на

поверхность. Природный пар можно непосредственно использовать для производства электроэнергии. Имеются также районы, где геотермальными водами из источников и скважин можно обогревать жилища и теплицы (островное государство на севере Атлантического океана - Исландия; и наши Камчатка и Курилы).

Однако в целом, особенно с учётом величины глубинного тепла Земли, использование геотермальной энергии в мире крайне ограничено. Для производства электроэнергии с помощью геотермального пара от этого пара отделяют твёрдые частицы, пропуская его через сепаратор и затем направляют его в турбину. "Стоимость топлива" такой электростанции определяется капитальными затратами на продуктивные скважины и систему сбора пара и является относительно невысокой. Стоимость самой электростанции при этом также невелика, так как последняя не имеет топки, котельной установки и дымовой трубы. В таком удобном естественном виде геотермальная энергия является экономически выгодным источником электрической энергии. К сожалению, на Земле редко встречаются поверхностные выходы природного пара или перегретых (то есть, с температурой гораздо выше 100^{o}C) вод, вскипающих с образованием достаточного кол-ва пара.

В настоящее время при финансовой поддержке Всемирного банка развития (геофонда) намечено использование глубинного тепла Земли в четырех регионах Российской Федерации: Омская область (теплоснабжение г. Чистово), Краснодарский край (теплоснабжение городов Усть-Лабинск и Лабинск, а также комплексное использование гидротермальных ресурсов в Мостовском районе), Калининградская область (тепло-энергоснабжение г. Калининград и г. Светлого), Камчатская область (теплоснабжение Елизовского района, создание бинарной электростанции Верхнее-Мутновской ГеоЭС и второй очереди Мутновской ГеоЭС мощностью 100 МВт).

Мутновская ГеоЭС - уникальная электростанция, использующая природное тепло Земли для производства электричества. Расположена на склонах вулкана Мутновский в юго-восточной части полуострова Камчатка на отметке 780 метров от уровня моря в 116 км от Петропавловска-Камчатского.

Мутновская ГеоЭС, 1-я очередь запущена в эксплуатацию 10 апреля 2003 года, установленная мощность на 2007 год — 50 МВт, планируемая мощность станции составляет 80 МВт, выработка в 2007 году — 360,687 млн. кВт·ч. Станция полностью автоматизирована.

На Мутновском месторождении термальных вод 29 декабря 1999 года запущена в эксплуатацию Верхне-Мутновская ГеоЭС, установленная мощность которой на 2004 год составляет 12 МВт.

Геотермальные электростанции обеспечивают до 30 % энергопотребления центрального Камчатского энергоузла. Это позволяет значительно ослабить зависимость полуострова от дорогостоящего привозного мазута. Ведением дел на Мутновской ГеоЭС занимается ОАО «Геотерм».

Литература.

Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир. 1974. 375 с.
Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика. Петропавловск-Камчатский: КГУ. 2009. 463 с
Гуттенберг Б. Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 264 с.
Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Наука. 2006. 390 с.
Стейси Ф. Физика Земли М.: Мир. 1972. 343 с.
Шейдеггер А. Основы геодинамики. М.: Недра. 1987. 384 с.

Глава 19. Геохимические аспекты, химический состав Земли.

В 19-ой главе даются общие представления о химических аспектах Земли (по лекциям А.А. Ярошевского «Проблемы современной геохимии»). Рассмотрены вопросы: Распространенность химических элементов в природе, Космохимические основания геохимии, физико-химические и кристаллохимические основания геохимии, Геохимическая дифференциация Земли. Химическое строение земной коры, принципы поведения химических элементов в магматических процессах. Принципы поведения химических элементов в процессах выветривания и осадкообразования, геохимия процессов метаморфизма, принципы поведения химических элементов в гидротермально-метасоматических процессах, геохимия биосферы.

19. 1. Распространенность химических элементов в природе.

***Основные идеи*:**

1. Все доступное для исследования вещество состоит из одних и тех же химических элементов; их количественные соотношения (распространенность), в пределах порядка величины, практически одинаковы (Вернадский, 1926).
2. Распространенность химических элементов в природе подчиняется следующим основным эмпирическим правилам:
- распространенность уменьшается с ростом заряда ядра;
- зависимость распространенности элементов от заряда ядра имеет две ветви - крутую для легких элементов (до Cu, Zn) и значительно более пологую для более тяжелых;
- четные химические элементы распространены больше, чем их нечетные соседи (правило Оддо-Гаркинса) (исключения - H, He, а также Li, Be, B);
- наблюдаются отчетливые максимумы на кривой распространенности элементов группы Fe (Cr, Mn, Fe, Co, Ni), а также менее выраженные в области Xe-Ba, Pt и Pb;
наблюдается резко пониженная распространенность Li, Be, B.
3. Космическая распространенность химических элементов определяется стабильностью ядер атомов (Вернадский, 1921, Goldschmidt, 1930).
4. Химические элементы образуются в ходе ядерных процессов (процессов нуклео-синтеза), протекающих на разных стадиях эволюции Вселенной (Gamov, 1939, 1946; Alpher, Bethe, Gamov, 1948; Чердынцев, 1956; E.Burbidge, G.Burbidge, Fowler, Hoyle, 1957; Fowler, 1985).
5. Солнце как звезда второго поколения, принадлежащая к Главной последовательности, может служить хорошим представителем основной массы видимого вещества Вселенной.
6. Вещество звезд второго и более поздних поколений, рассеянной материи (газо-пылевых туманностей), планетных систем является, с точки зрения происхождения химических элементов, гетерогенным, представляя собой смесь продуктов ядерных реакций, протекавших на разных стадиях предшествующей истории; последний этап нуклеосинтеза в районе Солнечной системы произошел незадолго (за 200 - 400 млн. лет) до формирования твердой фракции ее вещества (4.55 млрд. лет назад).
7. Процессы смешения продуктов нуклеосинтеза оказываются в высшей степени эффективными и приводят к тому, что в главной своей массе протопланетное вещество Солнечной системы достаточно хорошо перемешено и характеризуется весьма однородным изотопным составом; но при этом некоторая (очень небольшая по массе) фракция метеоритного вещества отличается изотопными <аномалиями>, прямыми <свидетелями> гетерогенности нуклеосинтеза.

Табл. 19. 1. Геохимически значимые естественные радиоактивные элементы.

Радиоактивный изотоп	**Тип превращения**	**Радиогенный изотоп**	**Период полураспада, лет**	**Процент распада за 4.55 млрд. лет**
$_{92}{}^{235}U$	α, (β)	$_{82}{}^{207}Pb$, $_{2}{}^{4}He$	$7.038 \cdot 10^{8}$	98.87
$_{19}{}^{40}K$	K, β	$_{18}{}^{40}Ar$, $_{20}{}^{40}Ca$	$1.251 \cdot 10^{9}$	91.97
$_{92}{}^{238}U$	α, (β)	$_{82}{}^{206}Pb$, $_{2}{}^{4}He$	$4.468 \cdot 10^{9}$	50.63
$_{90}{}^{232}Th$	α, (β)	$_{82}{}^{208}Pb$, $_{2}{}^{4}He$	$1.401 \cdot 10^{10}$	20.16
$_{71}{}^{176}Lu$	K, β	$_{70}{}^{176}Yb$, $_{72}{}^{176}Hf$	$3.57 \cdot 10^{10}$	8.46
$_{75}{}^{187}Re$	β	$_{76}{}^{187}Os$	$4.23 \cdot 10^{10}$	7.19
$_{37}{}^{87}Rb$	β	$_{38}{}^{87}Sr$	$4.88 \cdot 10^{10}$	6.26
$_{57}{}^{138}La$	K, β	$_{56}{}^{138}Ba$, $_{58}{}^{138}Ce$	$9.67 \cdot 10^{10}$	3.21
$_{62}{}^{147}Sm$	α	$_{60}{}^{143}Nd$	$1.06 \cdot 10^{11}$	2.93
$_{78}{}^{190}Pt$	α	$_{76}{}^{186}Os$	$5.4 \cdot 10^{11}$	0.58
$_{52}{}^{123}Te$	K	$_{51}{}^{123}Sb$	$1.24 \cdot 10^{13}$	0.025
$_{73}{}^{180}Ta$	β	$_{74}{}^{180}W$	$2. \cdot 10^{13}$	0.016

Табл. 19.2. Накопление в веществе Солнечной системы радиогенных изотопов.

Радиоактивные и радиогенные изотопы	**Распространенность, число атомов на 10^6 атомов Si**		**Накопление**	
	современная	4.55 млрд. лет назад	число атомов на 10^6 Si	%
$_{92}{}^{235}U$	0.0000648	0.0057243	-0.0056595	-98. 8 7
$_{82}{}^{207}Pb$	0.650	0.6443405	0.0056595	0.878
$_{19}{}^{40}K$	0.440	5.479	-5.039	-91.97
$_{18}{}^{40}Ar$	26	25.472	0.528	2.07
$_{20}{}^{40}Ca$	59200	59195.5	4.511	0.008
$_{92}{}^{238}U$	0.00893	0.0180875	-0.0091575	-50.63
$_{82}{}^{206}Pb$	0.602	0.5928425	0.0091575	1.545
$_{90}{}^{232}Th$	0.0335	0.04196	-0.00846	-20.16
$_{82}{}^{208}Pb$	1.837	1.82854	0.00846	0.463
$_{71}{}^{176}Lu$	0.000951	0.001039	-0.0000878	-8.46
$_{72}{}^{176}Hf$	0.00802	0.007932	0.0000878	1.09
$_{75}{}^{187}Re$	0.0324	0.034908	-0.002508	-7.19
$_{76}{}^{187}Os$	0.0108	0.008292	0.002508	30.25
$_{37}{}^{87}Rb$	1.97	2.1015	-0.1315	-6.26
$_{38}{}^{87}Sr$	1.64	1.5085	0.1315	8.72
$_{57}{}^{138}La$	0.000397	0.000410	-0.0000132	-3.21
$_{56}{}^{138}Ba$	3.22	3.219992	0.0000084	0.00026
$_{58}{}^{138}Ce$	0.00284	0.002835	0.0000048	0.169
$_{62}{}^{147}Sm$	0.0387	0.03987	-0.00117	-2.93
$_{60}{}^{143}Nd$	0.101	0.09983	0.00117	1.17

Табл. 19. 3. Некоторые <вымершие> изотопы в Солнечной системе.

Радиогенный изотоп	**<Вымерший> радиоактивный изотоп**	**Тип превращения**	**Период полураспада, лет**
$_{12}{}^{26}$Mg	$_{13}{}^{26}$Al	β +	$0.7 \cdot 10^6$
$_{19}{}^{41}$K	$_{20}{}^{41}$Ca	K	$0.144 \cdot 10^6$
$_{24}{}^{53}$Cr	$_{25}{}^{53}$Mn	K , β +	$3.7 \cdot 10^6$
$_{40}{}^{92}$Zr	$_{41}{}^{92}$Nb	β +	$33 \cdot 10^6$
$_{47}{}^{107}$Ag	$_{46}{}^{107}$Pd	β	$9.4 \cdot 10^6$
$_{54}{}^{129}$Xe	$_{53}{}^{129}$I	β	$16 \cdot 10^6$
$_{56}{}^{135}$Ba	$_{55}{}^{135}$Cs	β	$3 \cdot 10^6$
$_{60}{}^{142}$Nd	$_{62}{}^{146}$Sm	α	$103 \cdot 10^6$
$_{74}{}^{182}$W	$_{72}{}^{182}$Hf	2 β	$\sim 9. \cdot 10^6$
Изотопы Xe	$_{94}{}^{244}$Pu	Деление	$83. \cdot 10^6$

Табл. 19.4. Количество естественных изотопов с четными и нечетными числами протонов и нейтронов в ядрах атомов и количество изотопов с массовыми числами кратными (q) четырем.

Число протонов Z	**Число нейтронов N**	**Количество изотопов**	**Тип изотопа**	**Количество изотопов**	**Распространенность в хондритах**
четное	четное	167	4q	90	89.6%
четное	нечетное	57	4q + 1	53	2.9%
нечетное	четное	53	4q + 2	86	5.5%
нечетное	нечетное	9	4q + 3	57	2.5%

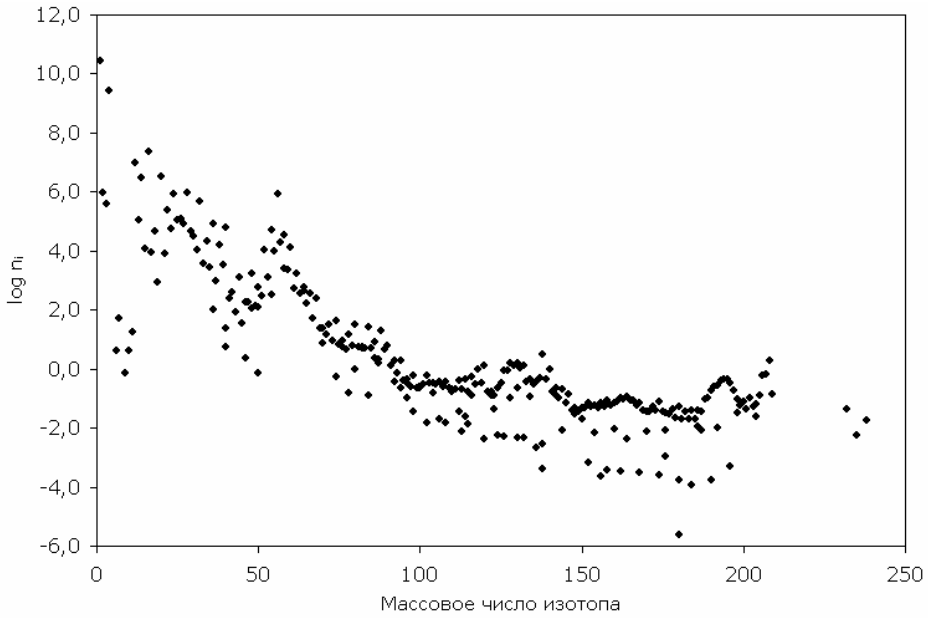


Рис. 19-1. Распространенность нуклидов (изотопов, число атомов ni на 10^6 атомов ^{28}Si) в Солнечной системе в зависимости от массового числа изотопов.

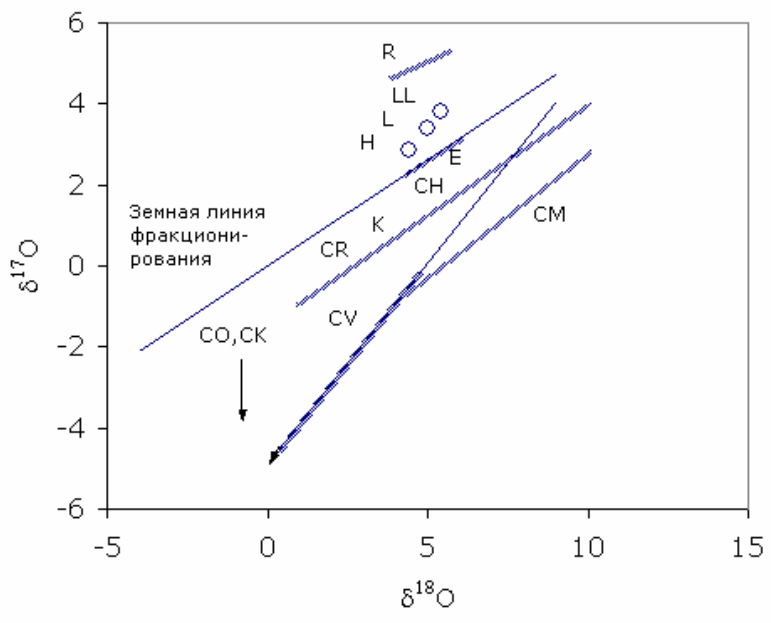


Рис. 19-2. Диаграмма $\delta^{18}O$-$\delta^{17}O$ для различных типов хондритов.

***Проблемы*:**
Научная проблематика ушла в область астрофизики; геохимические данные послужили фактологической базой для постановки и решения этих проблем.
1. Расшифровка природы и состава <скрытой массы> Вселенной.
2. Конкретизация эволюции звезд различного типа и различных поколений в связи с их химическим составом.
3. Возможность существования тяжелых трансурановых элементов и их вклад в наблюдаемый состав вещества Вселенной.
4. Конкретизация процессов формирования Li, Be, B.

19. 2. Космохимические основания геохимии.
Основные идеи:
1. Самым распространенным типом метеоритов являются хондриты, которые отличаются комплексом химических и структурных признаков, заставляющих считать их вещество <примитивным>, не прошедшим стадии планетной дифференциации.
2. Особое место среди хондритов занимают CI-хондриты, атомная распространенность всех, кроме сильно летучих (H, He, Ne, Ar, Kr, Xe), элементов в них практически тождественна солнечной; это позволяет рассматривать вещество CI-хондритов представительным образцом нелетучей фракции протопланетного вещества Солнечной системы.
3. Формирование твердых фаз протопланетного вещества Солнечной системы сопровождалось фракционированием химических элементов в соответствии с относительной термодинамической устойчивостью различных типов их соединений [геохимическая классификация элементов Гольдшмидта]; законы распределения химических элементов по принципиальным типам соединений контролируют форму нахождения химических элементов в протопланетном вещества и предопределяют их поведение в процессах формирования и на начальных стадиях дифференциации планет; распределение химических элементов зависит от строения электронных оболочек атомов.
4. Итогом космохимической эволюции протопланетного вещества является формирование четырех типов фаз - газообразной и трех твердых: кислородных соединений (силикатов и окислов), сульфидов (троилит и некоторые более редкие сульфиды) и металла; их пропорции и химический состав задаются космической распространенностью химических элементов и фундаментальными законами термодинамики, предопредляющими направленность обменных реакций при буферной роли соединений Fe. Варьируя

пропорции этих фаз в составе планет Солнечной системы, можно построить модели их внутреннего строения, согласующиеся с наблюдаемыми физическими свойствами планет.
5. Классические данные по изотопному составу Pb и новые данные по изотопному составу W, Os в металлической фазе и троилите железных метеоритов показывают, что разделение на фазы произошло уже во время формирования твердой фракции протопланетного вещества 4.55 млрд. лет назад и не имеет никакого отношения ни ко времени, ни к механизму образования ядер планет земной группы.
6. Основной процесс, который привел к формированию твердой фракции протопланетного вещества, сопровождался фракционированием химических элементов по летучести; ничтожная распространенность на Земле и других телах земного типа сильно летучих тяжелых (Ne-Xe) благородных газов служит доказательством формирования планет земной группы в результате аккреции твердой компоненты протопланетного облака.
7. Главными продуктами планетной дифференциации рассматриваются базальты кор планет земной группы; все известные базальты Земли, Луны, Марса, родительского тела базальтических метеоритов обогащены относительно примитивного вещества так называемыми "легкоплавкими" элементами, что является доказательством формирования базальтов в результате частичного или зонного плавления первичного вещества планет (Goldschmidt, Виноградов). Однако по ряду геохимических параметров базальты разных тел земной группы отличаются друг от друга и не могут быть получены как продукты выплавления глубинного вещества одного и того же состава; это является основанием предполагать вариации состава протопланетного вещества, оказывающимся несколько различным для разных планет, и лишает возможности использовать конкретно состав того или иного типа хондритов как представителя вещества Земли; различные типы хондритов, а также гипотетическое протопланетное вещество планет земной группы представляют собой некоторые фракции протопланетного вещества Солнечной системы, но средний его состав, т. е. состав того примитивного материала Солнечной системы, продуктами дифференциации которого являются эти фракции, может быть принят тождественным среднему составу CI-хондритов; распространенность химических элементов в CI-хондритах целесообразно принять в качестве начальной точки геохимической эволюции планет земной группы в ходе их формирования и дальнейшей геологической истории.

Табл. 19. 5. Геохимическая классификация химических элементов Гольдшмидта.

Сидерофильные	**Халькофильные**	**Литофильные**	**Атмофильные**	**Биофильные**
Fe Ni, Co Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au (Ga), Ge, Sn (Nb), Ta, Mo, (W) P, C (N), (As), (Sb), Bi (Se), (Te)	Fe S, Se, (Te) Cu, Ag, Zn, Cd, Hg (Ga), In, Tl, (Ge) (P), As, (Sb), (Bi) Mo (Ti), (V), (Cr), (Mn), (Ca)	Fe O, (S), (P), (C), (H) Li, Na, K, Rb, Cs Be, Mg, Ca, Sr, Ba B, Al, (Ga), Sc, Y La, Ce, Pr, Nd, Sm Eu, Gd, Tb, Dy, Ho Er, Tm, Yb, Lu Th, U Si, Ti, Zr, Hf V, Nb, Ta, Cr, W Mn, F, Cl, Br, I (Sn), (Ni), (Co)	H, C, N, O Cl, Br, I He, Ne, Ar, Kr, Xe	C, H, O, N, P S, Cl, I, (B) (Ca, Mg, K, Na) (V, Mn, Fe, Cu)

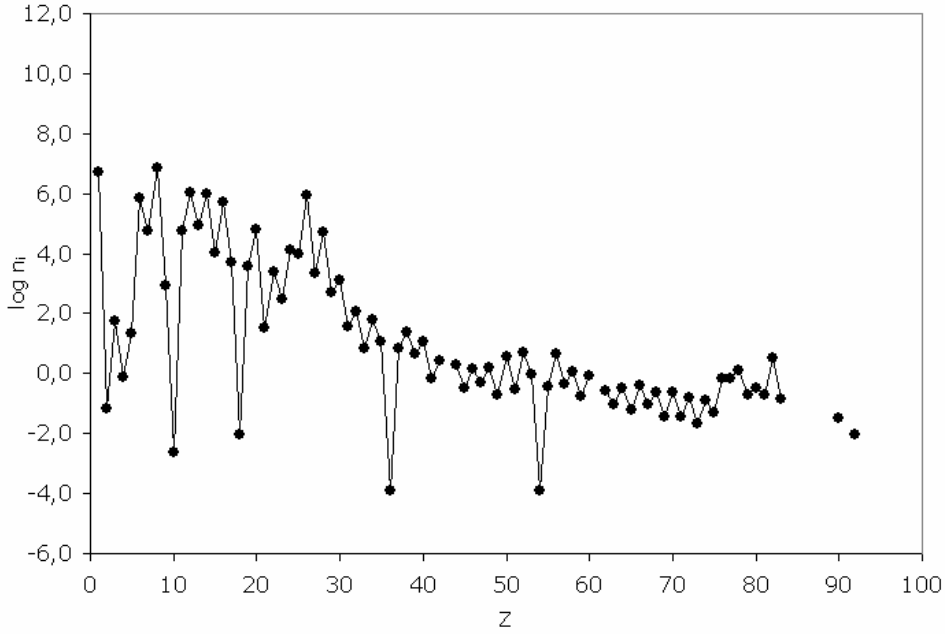


Рис. 19-3. Распространенность химических элементов (число атомов n_i на 10^6 атомов Si) в CI-хондритах.

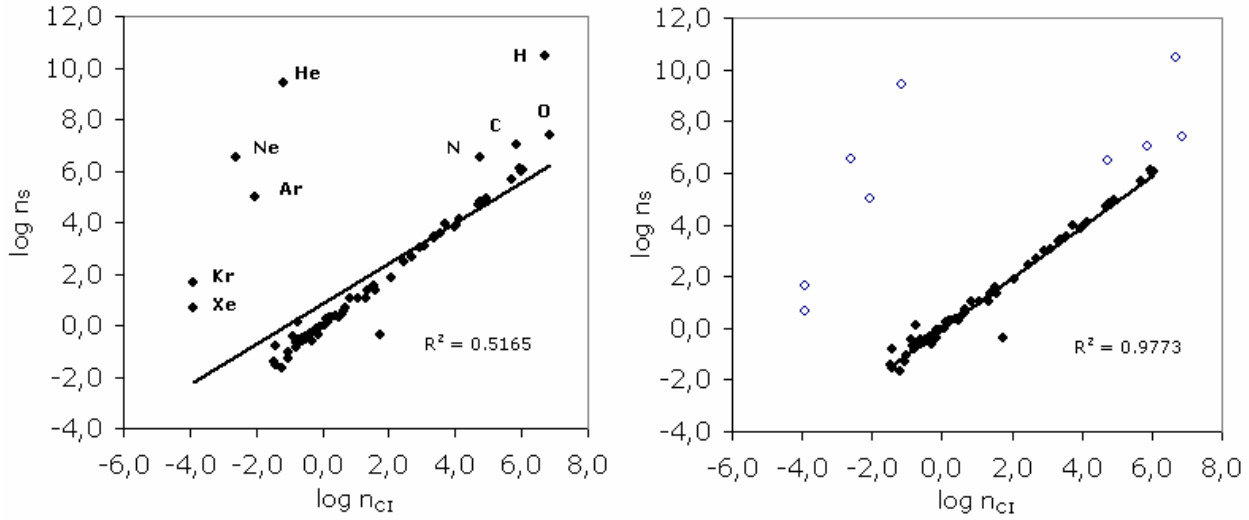


Рис. 19-4. Соотношения распространенности химических элементов (число атомов ni на 10^6 атомов Si) на Солнце (n_s) и в углистых (CI) хондритах (n_{CI}).

Табл. 19. 6. Геохимические особенности базальтов Земли, Луны и родительских тел шерготтитов и эвкритов.

Компонент и отношение элементов	CI-хондриты	Океанические толеиты	Базальты Земли Базальты островных дуг	Траппы	Shergotty (базальты Марса)	Морские базальты Луны	Эвкриты
SiO_2	22.76	50.65	51.01	49.98	50.96	45.65	49.31
Al_2O_3	1.64	15.10	17.58	15.26	7.01	12.07	12.26

FeO	24.48	10.47	9.62	12.37	19.26	19.10	18.88
MgO	16.40	7.60	6.50	6.44	9.21	8.57	7.20
CaO	1.30	11.83	10.17	10.75	9.91	11.26	10.17
Na_2O	0.69	2.43	2.78	2.45	1.29	0.38	0.46
K_2O	0.067	0.19	1.00	0.76	0.16	0.10	0.04
TiO_2	0.073	1.41	0.97	1.57	0.87	2.53	0.76
MnO	0.26	0.18	0.18	0.21	0.53	0.25	0.54
P_2O_5	0.28	0.14	0.19	0.21	0.80	0.09	0.04

***Проблемы*:**
1. Понимание обстановки и условий формирования твердой фракции протопланетного вещества (вещества-предшественника хондр и хондритов) и оценка ее первичной и вторичности химической и изотопной гетерогенности.
2. Понимание генетической связи разных типов хондритов как представителей "примитивного" вещества Солнечной системы и их отношения к веществу CI -хондритов.
3. Понимание природы связи разных типов дифференцированных метеоритов и их изотопной гетерогенности как основа понимания причин и механизмов, которые привели к вариациям среднего состава вещества планет земной группы и родительских тел метеоритов, и как путь к корректной оценке среднего химического состава Земли.
4. Обоснование возможности (или невозможности) систематической дифференциации протопланетного вещества в процессах аккреции как путь к оценке возможной неоднородности (локальной и глобальной) вещества первичной Земли.

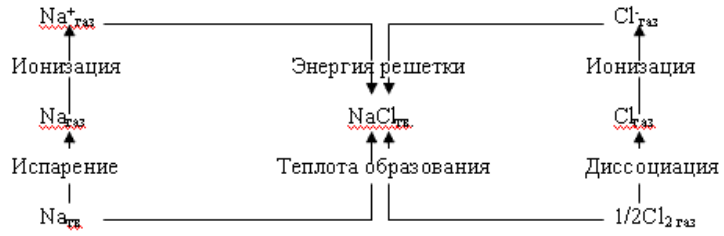
19. 3. Физико-химические и кристаллохимические основания геохимии.
Основные идеи:
1. Формы нахождения химических элементов в природе: кристаллические фазы (минералы), структурные (изоморфные) примеси в минералах, неструктурные примеси в минералах; расплавы; мало плотные (флюидные) растворы, газы; живое вещество.
2. Минеральная форма нахождения химических элементов в природе основная; типы химических соединений в природе и число минералов химических элементов ограничено термодинамическими законами фазовых равновесий и явлениями изоморфизма; способность химических элементов к минералообразованию прежде всего определяется их распространенностью в земной коре и закономерностями фракционирования в геологических процессах.
3. Перераспределение химических элементов в геологических процессах практически всегда сопровождается их разделением (фракционированием).
4. Существует два механизма переноса химических элементов в геологических процессах - молекулярная диффузия и конвективное перераспределение фаз в пространстве геологических систем. Исследование динамики перераспределения химических элементов в геологических процессах возможно только методами ЭВМ-моделирования.
5. Диффузионный перенос химических элементов является механизмом, контролирующим локальные процессы, практически сводящиеся к росту минеральных зерен и узких зон в диффузионных метасоматических колонках; этот механизм переноса может быть ответственным только за перераспределение химических элементов в масштабах миллиметров-сантиметров, максимум первых десятков сантиметров.
6. Основными механизмами геохимической дифференциации в геологически значимых масштабах являются процессы переноса, осуществляемые относительным перераспределением фаз в гетерогенных системах жидкость-твердые фазы, жидкость-жидкость, жидкость-газ, газ-твердые фазы.

7. Основной вклад в перераспределение химических элементов в магматических процессах вносит разделение твердых и жидкой фаз, т. е. механизм кристаллизационной дифференциации; разделение сосуществующих жидких фаз в пространстве магматических камер имеет резко ограниченное значение, поскольку в области реальных составов магматических пород явления ликвации экспериментально не установлены, за исключением силикатно-сульфидной ликвации, которая имеет определяющее значение в магматической геохимии халькофильных и сидерофильных элементов; разделение расплава и газовой фазы не может иметь практического значения для магматической эволюции из-за малого количества, малой плотности и малой растворимости соединений породообразующих элементов в магматических флюидах. Магматизм является основным процессом перераспределения и дифференциации земного вещества в эндогенных условиях.
8. В гидротермально-метасоматических процессах основной вклад в перераспределение химических элементов вносит фильтрация флюидной фазы сквозь пористый каркас твердых пород, сопровождающаяся взаимодействием раствора и пород и глубокой дифференциацией химических элементов, но малая плотность флюидной фазы и ограниченная растворимость породообразующих и рудных минералов в водных растворах ограничивают масштабы перераспределения вещества земной коры в этих процессах - они носят локальный характер, а масса вещества, вовлеченная в эти процессы, весьма мала по сравнению с массой пород земной коры (контролирующим масштабы массопереноса является отношение вода / порода, которое в земной коре в целом сдвинуто в пользу пород).
9. В процессах, протекающих на поверхности Земли в биосфере, основной транспорт вещества, сопровождающийся геохимической дифференциацией, связан с поверхностным гидрологическим циклом; эоловый перенос имеет резко подчиненное значение; главный массоперенос осуществляется в форме взвешенного материала, но, несмотря на малую минерализацию вод, взаимодействующих с породами, геохимический эффект, обусловленный разделением химических элементов по принципу их миграционной способности в водных растворах, может быть значителен из-за многократно повторяющейся циркуляции водной фазы гидросферы (результирующее отношение вода / порода может быть сдвинутым в пользу воды).

Табл. 19.7. Энергия кристаллической решетки.

$Na^+_{газ} + Cl^-_{газ} = NaCl_{тв.} + U$

ЦИКЛ БОРНА – ГАБЕРА



$U = \Delta H - L - ½D - I + F$

Уравнение Борна – Ланде

$U = - NAe_0^2 / R + \varphi(R)$

Приближенное уравнение Капустинского

$U_{AX} = - 332mz_Az_X / (r_A + r_X)$

$U \sim z / r$

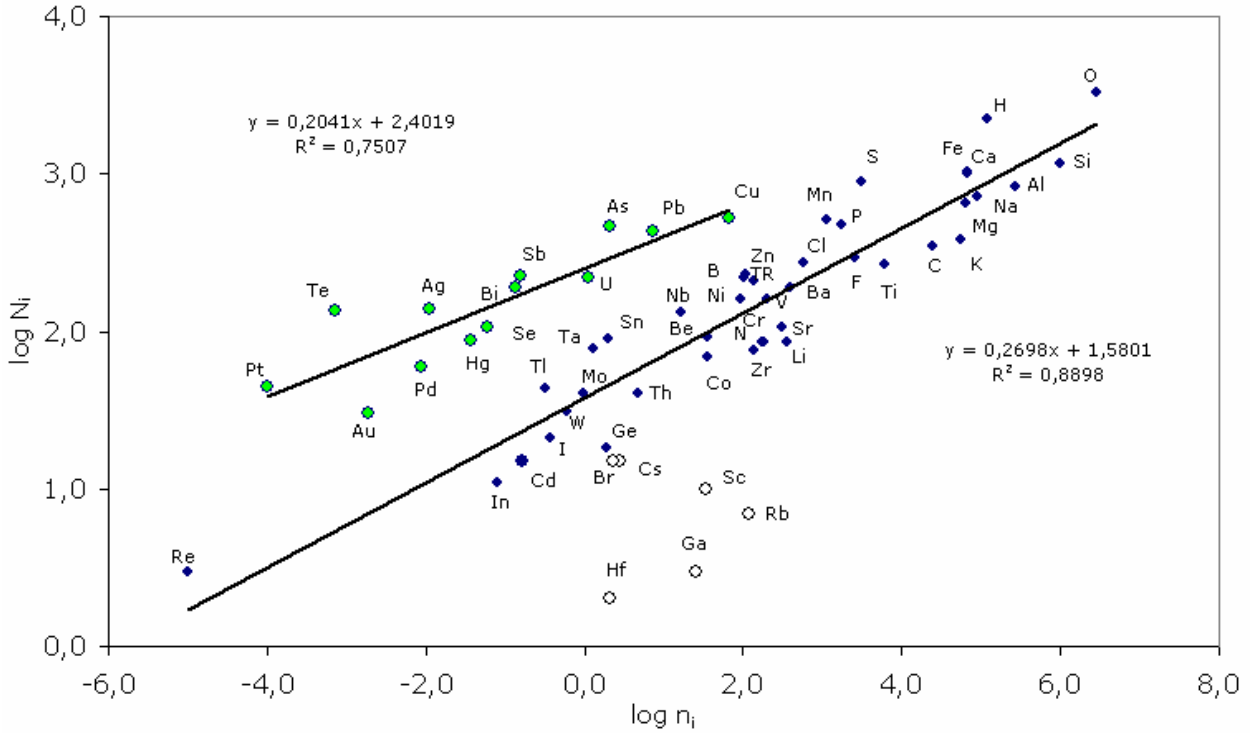


Рис. 19-5. Корреляция числа минералов (N_i) химических элементов и их распространенности в верхней части континентальной коры (n_i).

***Проблемы*:**

1. Расширение экспериментальной базы в области фазовых равновесий в системах и условиях, близких к природным.
2. Разработка проблемы состояния химических элементов в природе - развитие экспериментальных методов определения структурной позиции и эффективного заряда атомов химических элементов в минералах, формы нахождения элементов в подвижных фазах (расплавах, водных и других растворах и т. п.).

3. Расширение экспериментальной базы и разработка теоретических принципов распределения химических элементов между сосуществующими фазами (твердыми, жидкими, газообразными), в том числе с учетом сорбционных явлений.
4. Дальнейшая разработка методологии, методов и программных комплексов для численного моделирования равновесий в многокомпонентных гетерогенных системах в широком диапазоне составов и условий, приближенных к природным.
5. Разработка методологии, методов и программных комплексов для численного моделирования процессов перераспределения химических элементов и энергии в геологических процессах и прямого моделирования геохимической структуры геологических объектов.
6. Разработка методологии, методов и программных комплексов для решения обратной задачи: на основе данных о распределении химических элементов в геологических объектах идентифицировать механизмы и оценить условия процессов, приведших к формированию эмпирически наблюдаемой геохимической структуры геологических объектов.

19. 4. Геохимическая дифференциация Земли.
***Основные идеи*:**
1. Значение средней плотности Земли (5.517 г/см-3) в сопоставлении со средней плотностью вещества земной коры (2.6 - 2.7 г/см-3) и момент инерции (0.334 г•R2) однозначно указывают на расслоение земного вещества по плотности.
2. Рост плотности вещества Земли с глубиной определяется двумя явлениями - сжатием и полиморфизмом под действием давления с переходом к фазам большей плотности и изменением химического состава. Экстраполяция плотности глубинного вещества к нормальному давлению показывает, что она (кроме вещества верхней мантии) не соответствует ни одному известному в составе земной коры типу пород и предполагает либо глубокий полиморфизм вещества <обычных> пород, либо принципиальное изменение их химического состава; геофизические данные не позволяют решить эту альтернативу.
3. Предположение А. Добрэ об аналогии каменной оболочки (мантии) и ядра Земли силикатной и металлической фазам метеоритов (хондритов) можно считать полностью выдержавшей проверку временем; современные данные о составах этих фаз метеоритов могут служить граничными условиями при оценке состава мантии и ядра Земли.
4. Альтернатива - формирование Земли в результате аккреции недифференцированной <примитивной> твердой фракции протопланетного вещества типа углистых хондритов или в результате аккреции уже <готовых> силикатных фаз и металла - решается в пользу последнего; основанием этого предположения является отсутствие химического равновесия между веществом мантии и ядра Земли - существенно более высокие содержания в мантии Земли сидерофильных и халькофильных элементов по сравнению с силикатной фазой обыкновенных хондритов. Таким образом, дифференциация вещества Земли на силикатную фракцию (мантию) и металлическую фракцию (ядро) и распределение по этим типам вещества всех химических элементов предопределено космохимической историей протопланетного вещества и при формировании Земли эти две фазы не переуравновешивались. Такие данные исключают возможность формирования земного ядра в ходе геологической истории Земли в результате отделения металлического железа, рассеянного или образующегося в примитивном веществе Земли с последующей сегрегацией в центре планеты.
5. Экспериментальные данные о плотности Fe, Ni-сплава при давлениях, отвечающих земному ядру, показывают, что для корректного согласия с геофизическими данными необходимо предположить вхождение в состав ядра некоторого количества легких элементов; наиболее вероятными кандидатами являются распространенные в составе

Земли элементы - сера и кислород; данные о растворимости этих элементов в расплаве металла не противоречат такому предположению.

6. Физические свойства мантии Земли непротиворечиво интерпретируются на основании экспериментальных данных о полиморфизме и физических свойствах породообразующих силикатов и не вступают в противоречие с космохимическими данными о составе силикатной фракции хондритов, подтверждая допустимость такой аналогии.

7. Распространенность химических элементов в верхней мантии Земли, оцениваемая на основании данных о их распространенности в примитивном веществе Солнечной системы с поправкой, учитывающей химический и изотопный состав магматических пород мантийного происхождения (базальтов разных формационных типов), свидетельствует о невозможности прямого использования какого-либо известного вещества хондритов в качестве конкретной модели состава Земли. Очевидно, что вещество Земли, родительских тел различных типов метеоритов, других планет земной группы претерпело дифференциацию на протопланетной стадии эволюции Солнечной системы, что привело к разной степени фракционирования. Очевидными механизмами этого фракционирования были процессы разделения химических элементов в зависимости от их летучести (распределение между твердой и газовой фазой) и окислительно-восстановительным свойствам и сродством к сере (распределение между силикатной, сульфидной и металлической фазам). Наблюдаемый состав мантии Земли (пониженная распространенность летучих элементов, существенное обеднение сидерофильными и халькофильным элементами) свидетельствует о том, что главным компонентом ее протовещества является вещество типа силикатной фракции обыкновенных хондритов, к которому должна быть добавлена некоторая доля примитивного вещества типа углистых хондритов, не потерявшего основную массу сидерофильных и халькофильных элементов.

8. Изотопные данные заставляют предполагать, что геохимическая гетерогенность верхней мантии (силикатной фракции) Земли не является наследием протопланетного вещества, а возникла в ходе геологической истории. Единственным допустимым с физико-химической точки зрения механизмом такой дифференциации может быть фракционирование химических элементов в процессах плавления и перераспределения в гравитационном поле Земли остаточных твердых и жидкой фаз.

9. Распределение химических элементов между веществом мантии и земной коры свидетельствует о накоплении в земной коре <легкоплавких> элементов и является обоснованием идеи А.П. Виноградова о выплавлении вещества земной коры из мантии. Очевидный геологический процесс, в котором реализуется принцип выплавления - мантийный магматизм. Геологические данные показывают, что процесс выплавления и формирования земной коры идет в течение всей геологической истории.

10. Малая масса гидросферы и атмосферы Земли, их состав (вода, азот, углекислота, аргон) и ничтожная распространенность тяжелых благородных газов являются геохимическим доказательством формирования этих оболочек в результате выделения на поверхность планеты в ходе дегазации химически связанных или сорбированных летучих элементов, захваченных в небольшом количестве твердой фракцией протопланетного вещества и вовлеченных в аккрецию. Ход дегазации глубинного вещества Земли во времени остается неясным.

11. Таким образом, из рассмотренного материала можно прийти к следующим заключениям:

- в состав Земли при ее формировании в ходе аккреции твердой компоненты протопланетного облака должна была войти силикатная фаза типа силикатной фазы хондритов (с некоторой добавкой примитивного материала) и металлическая фаза типа Fe, Ni-сплава хондритов или железных метеоритов; сильно летучие компоненты, находящиеся в протопланетном облаке в составе газовой фазы и льдов, в состав Земли в существенных количествах вовлечены не были;

- геохимическая направленность дифференциации Земли на силикатную оболочку и металлическое ядро задана разделением химических элементов в ходе формирования минерального (фазового) состава протопланетного вещества - образования металлической фазы, концентрирующей сидерофильные элементы, и силикатной фазы, резко обедненной сидерофильными элементами и концентрирующей в своем составе литофильные элементы; роль сульфидной фазы в составе планетного вещества второстепенна (ее содержание не высоко), но в земной истории халькофильных элементов она оказывается определяющей; в ходе геологической истории Земли силикатная фракция, с одной стороны, и металлическая и сульфидная фазы - с другой, не вовлекались в глубокое взаимодействие и оставались геохимически независимыми;
- единственным механизмом, способным объяснить фракционирование химических элементов в ходе расслоения силикатной оболочки Земли (мантии) на современную мантию, земную кору, гидросферу и атмосферу, является плавление и разделение в пространстве Земли расплавов и остаточных твердых фаз, сопровождающееся отделением газовой фазы; химический состав остаточного вещества мантии, вещества земной коры, гидросферы и атмосферы контролируется законами распределения химических элементов между твердой, жидкой и газовой фазами; следует подчеркнуть, что это распределение химических элементов не имеет никакого отношения к гравитационным свойствам (плотностям) элементов и их соединений.

Табл. 19. 7. Масса Земли, ее ядра и оболочек.

Структурные единицы Земли	**Масса, 10^{25} г**	**Доля общей массы Земли, %**
Атмосфера	0.00052	0.000087
Гидросфера	0.141	0.024
Земная кора	2.85	0.48
Мантия	406.8	68.1
Ядро	187.6	31.4
Земля в целом	597.4	100.0

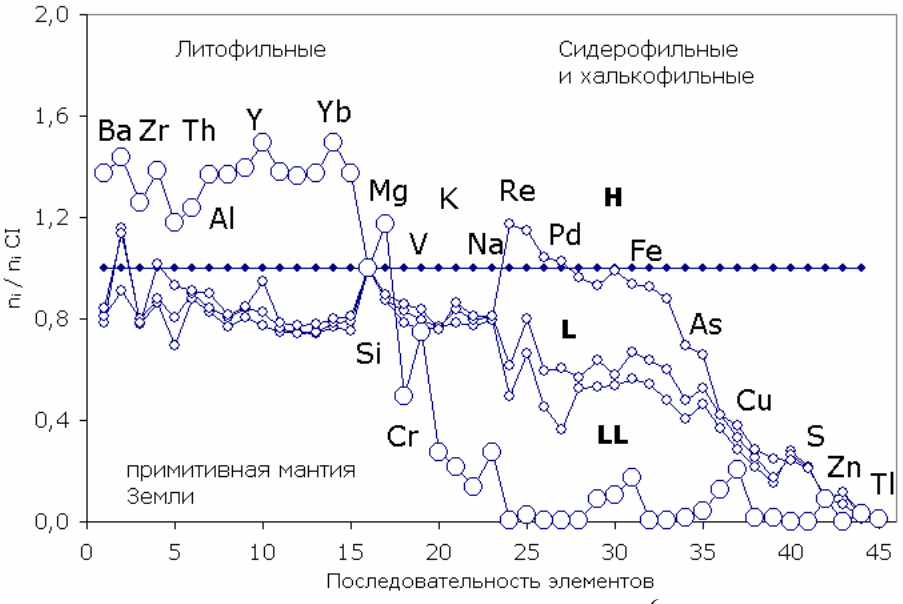


Рис. 19-6. Распространенность химических элементов ($n_i/10^6$ Si) в H-, L-, LL-хондритах (Wasson, Kallemeyn, 1988) и примитивной мантии Земли (McDonough, Sun, 1995), нормированная по CI-хондритам (символами отмечены наиболее характерные элементы).

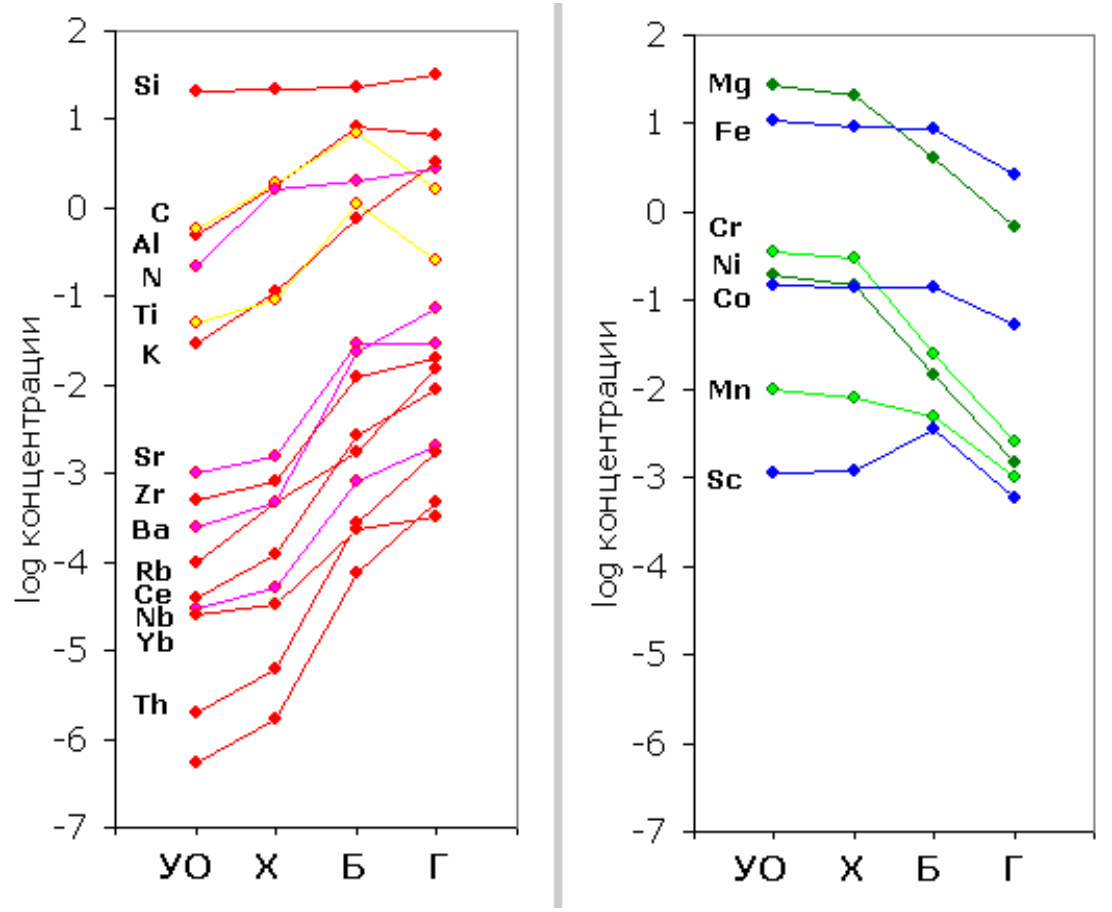


Рис. 19-7. Распределение химических элементов в системе хондриты (Х) - дуниты мантии (УО) - базальты (Б) и граниты (Г) коры (Виноградов, 1959).

***Проблемы*:**

1. Оценка распространенности химических элементов в протовеществе Земли и его космохимическая квалификация.
2. Обоснование такой модели аккреции Земли, которая объяснила бы геохимическую изоляцию ядра и мантии в ходе формирования и дальнейшей истории планеты.
3. Решение вопроса о геохимической расслоенности мантии Земли в рамках центрально-симметричного приближения.
4. Выяснение времени и геодинамической обстановки формирования геохимической гетерогенности мантии Земли.
5. Обоснование закономерностей корреляции геохимической гетерогенности современной мантии с геодинамической обстановкой и геофизическими данными, свидетельствующими о современной структуре мантии и движений в ней.
6. Разработка модели формирования геохимической гетерогенности мантии в результате перераспределения химических элементов в ходе частичного плавления при малой доли расплава.
7. Выяснение геодинамических условий геохимической дихотомии процессов формирования земной коры - океанической и континентальной; обоснование представлений о геохимических особенностях мантийного субстрата и условиях магмообразования, контролирующих состав мантийных магматических расплавов, формирующих континентальную и океаническую кору.

19. 5. Химическое строение земной коры.

***Основные идеи*:**

1. Средний химический состав земной коры отвечает средневзвешенному составу продуктов выплавления и дегазации мантии - среднему химическому составу вулканических пород мантийного происхождения с добавлением избыточных летучих, входящих в состав пород осадочной оболочки.
2. Различия среднего химического состава континентальной и океанической коры предопределено различием среднего состава корообразующих вулканических пород - островодужных вулканитов и океанических базальтов.
3. В верхней части континентальной коры наблюдается геохимический баланс ме-жду составами <первичных> магматических и <вторичных> осадочных пород. Это по-зволило Ф.Кларку в 1924 г. (Clarke, Washington, 1924) и В.Гольдшмидту в 1933 г. (Goldschmidt, 1933) обосновать первые оценки химического состава верхней части континентальной коры (<земной коры>).
4. Статистика составов магматических пород (более 5000 анализов) позволила оценить относительную распространенность различных их типов в верхней части континентальной коры и количественно подтвердить резкое преобладание среди них эффузивных базальтов и интрузивных гранитоидов. Это дало возможность в дальнейшем свести проблему оценки среднего состава магматического вещества земной коры к оценке состава некоторой смеси этих двух самых распространенных типов пород.
5. Полученные многочисленные данные по составу базальтов и гранитов и оценка баланса распределения химических элементов между этими породами и глинистыми сланцами позволили А. П.Виноградову в 1962 г. (Виноградов, 1962) и С. Тэйлору в 1964 г. (Taylor, 1965) обосновать оценки распространенности подавляющего большинства химических элементов в верхней части континентальной коры (<континентальной коре>). Эти цифры надо считать классическими в геохимии.
6. Альтернативные модели химического состава земной коры основаны на данных о реальной распространенности главнейших типов пород земной коры (магматических, метаморфических, осадочных). Первая такая модель была предложена А. Полдерваартом в 1955 г. (Poldervaart, 1955); однако распространенности горных пород, принятые в этой модели, были оценены весьма приблизительно. Современные оценки распространенности пород осадочной и гранитнометаморфической оболочек основаны на результатах измерений их объемов или площадей распространения по данным специально составленных карт, полученных А. Б. Роновым, А. А. Мигдисовым и их сотрудниками. Эти данные явились основной разработки современной модели химического состава земной коры (Ронов, Ярошевский, 1967, 1976; Ронов, Ярошевский, Мигдисов, 1990).
7. Состав гранулитбазитового слоя континентальной коры должен отличаться от состава гранитнометаморфического слоя, по-видимому, более высокой распространенностью пород основного состава, но конкретные данные в настоящее время отсутствуют; оценка среднего состава гранулитбазитового слоя (нижней части континентальной коры) может быть только модельной (см. п. 9).
8. Оценка химического состава континентальной коры в целом остается неопределенной из-за незнания состава гранулитбазитового слоя. В обсуждаемой модели химического строения континентальной коры принято, что ее средний химический состав (за исключением избыточных летучих) равен средневзвешенному составу вулканических пород мантийного происхождения (главная масса - продукты островодужного вулканизма, относительно небольшой вклад дает вулканизм континентальных плит). Существует две модели среднего состава корообразующих вулканических пород - <андезитовая> С. Тэйлора (Taylor, 1967), основанная на предположении о резком преобладании андезитов в качестве типоморфных для островных дуг вулканических пород, и модель <базальт-андезит-(дацит+риолит) = 5.5 : 3.5 : 1>, А. А. Ярошевского (Ярошевский, 1985),

основанная на результатах измерений А.Б.Ронова и принятая в книге А. Б. Ронова с соавторами (Ронов и др., 1990).

9. Средний химический состав гранитно-метаморфического слоя (верхней части континентальной коры) отличается от модельного состава коры в целом. Это предполагает, что наблюдаемая геохимическая расслоенность континентальной коры формируется в ходе ее эволюции. Геологически наиболее вероятным механизмом такого расслоения представляется гранитообразование, сопровождающееся дифференциацией вещества и поднятием гранитоидных масс в верхние горизонты континентальной коры.

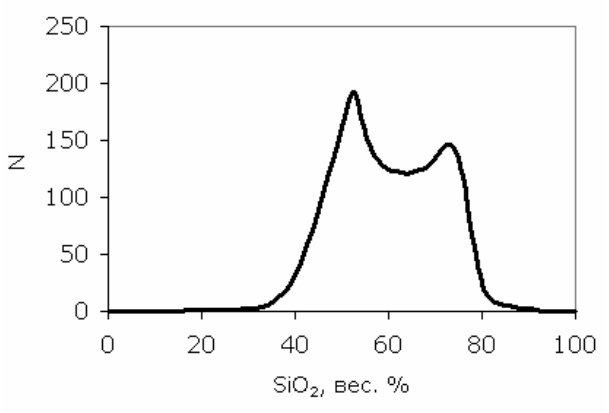


Рис. 19-8. Распределение содержаний SiO_2 в магматических породах (Richardson, Sneesby 1923).

Рис. 19-9. Скорость распространения сейсмических волн в континентальной земной коре и наиболее распространенных горных породах.

Табл. 19. 8. Распространенность горных пород осадочной оболочки континентов и океанов и гранитно-метаморфической оболочки континентов.

Породы осадочной оболочки континентов	**Распростра-ненность., об. %**	**Отложения осадочной оболочки океанов**	**Распростра-ненность., об. %**
Пески и песчаники	23.6	Песчано-глинистые	19.1
Глины и глинистые		Глинистые	32.1
сланцы	43.9	Карбонатно-глинистые	9.6
Карбонаты	15.9	Карбонатные	28.7
Кремнистые	1.6	Кремнистые	6.7
Соли, гипсы, ангидриты	1.1	Соли, гипсы, ангидриты	0.3
Вулканические	13.9	Вулканомиктовые Вулканические породы	1.5 2.0
Всего	100.0	Всего	100.0

Породы гранитно-метаморфической оболочки континентов	**Распространенность % площади**
Гранитоиды и гранито-гнейсы	46.5
Габброиды	1.9
Сиениты	<0.1
Ультраосновные породы	<0.1
Метапесчаники	4.0
Парагнейсы и кристаллические сланцы	39.0
Карбонаты	1.6
Железистые породы	0.4
Амфиболиты и другие метаморфизованные	

Табл. 19. 9. Распространенность химических элементов в верхней части континентальной коры, 10^{-4} вес. %.

Элементы	**Ронов и др. (1990)**	**Wedepohl (1995)**	**Элементы**	**Wedepohl (1995)**	**Элементы**	**Wedepohl (1995)**
1 H	1300		30 Zn	52	59 Pr	6.3
3 Li		22	31 Ga	14	60 Nd	25.9
4 Be		3.1	32 Ge	1.4	62 Sm	4.7
5 B		17	33 As	2.0	63 Eu	0.95
6 C	2960	3240	34 Se	0.083	64 Gd	2.8
7 N		83	35 Br	1.6	65 Tb	0.50
8 O	479600		37 Rb	110	66 Dy	2.9

9 F	530	611	38 Sr	316	67 Ho	0.62
11 Na	22400	25670	39 Y	20.7	68 Er	
12 Mg	17100	13510	40 Zr	237	69 Tm	
13 Al	79000	77440	41 Nb	26	70 Yb	1.5
14 Si	298300	303480	42 Mo	1.4	71 Lu	0.27
15 P	620	665	44 Ru		72 Hf	5.8
16 S	1080	953	45 Rh		73 Ta	1.5
17 Cl	220	640	46 Pd		74 W	1.4
19 K	23600	28650	47 Ag	0.055	75 Re	
20 Ca	29200	29450	48 Cd	0.102	76 Os	
21 Sc		7	49 In	0.061	77 Ir	
22 Ti	3220	3117	50 Sn	2.5	78 Pt	
23 V		53	51 Sb	0.31	79 Au	
24 Cr		35	52 Te		80 Hg	0.056
25 Mn	670	527	53 I	1.4	81 Tl	0.75
26 Fe	40800	30890	55 Cs	5.8	82 Pb	17
27 Co		11.6	56 Ba	668	83 Bi	0.123
28 Ni		18.6	57 La	32.3	90 Th	10.3
29 Cu		14.3	58 Ce	65.7	92 U	2.5

Проблемы:

1. Уточнение оценок распространенности химических элементов в верхней части континентальной коры и в океанических базальтах (для ряда химических элементов до сих пор не существует приемлемых аналитических методов определения кларковых содержаний, а для многих второстепенных элементов данные остаются достаточно фрагментарными).
2. Корректная оценка распространенности химических элементов в осадочных и метаморфических породах, которые в настоящее время базируются на явно недостаточном геохимическом материале.
3. Оценка распространенности и баланса в континентальной и океанической коре изотопов легких элементов (H, He. Li, B, C, N, O, Mg, S) и радиогенных изотопов систем K-Ar, Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf, Th,U-Pb и др. в целях контроля оценок распространенности элементов в земной коре, в том числе в моделях состава гранулит-базитового слоя, и совершенствования моделей формирования и эволюции земной коры.
4. На основании оценок региональной распространенности химических элементов («региональных Кларков») обоснование геохимической неоднородности вещества земной коры и ее возможной связи с геологической историей, в частности рудообразованием.
5. Разработка системы данных, характеризующих распространенность химических элементов в породах земной коры в зависимости от их геологического возраста и геодинамической позиции, которые позволят создать основу для решения проблемы геохимической эволюции земной коры.
6. Поиск путей независимой от модельных разработок оценки химического состава гранулит-базитового слоя континентальной коры.
7. Разработка моделей формирования, геохимического баланса и геохимической эволюции двух типов земной коры (континентальной и океанической), совместимых с геологическими и геофизическими данными

19. 6. Принципы поведения химических элементов в магматических процессах.
***Основные идеи*:**
1. Магматические горные породы являются главным типом эндогенного вещества земной коры; они составляют почти половину вещества верхней части континентальной коры (48.5 %), являются самыми распространенными породами океанической коры, входят как существенный компонент в состав осадочной оболочки континентов (13.9 %).
2. Вся система магматических пород земной коры является геологически гетерогенной: во-первых, в зависимости от условий формирования они подразделяются на эффузивные и интрузивные, причем геологическая связь этих двух фациальных обстановок не является тривиальной; во-вторых, и эффузивные, и интрузивные магматические породы, внедрявшиеся или изливавшиеся на поверхность в различной геодинамической обстановке, систематически различаются по комплексу своих характеристик (конкретным условиям залегания, составом исходных магм и их геохимическими особенностями, набором пород, входящих в состав магматических комплексов или вулканических серий, степени дифференциации, сопутствующим магматическим и магматогенным оруденением). Эта геологическая гетерогенность магматических пород является фундаментальной характеристикой магматического вещества земной коры; она стала основой учения о магматических формациях, разработанного Ю. А. Кузнецовым (1964) и нашедшей наиболее яркое и полное подтверждение всеми современными геохимическими, включая изотопные, данными. В настоящее время геохимическая систематика магматических пород в связи с их геодинамической позицией стала основой петрологии и геодинамики.
3. Геологическая гетерогенность магматических пород делает геологически не интерпретируемой оценку среднего химического состава магматического вещества земной коры в целом, этого классического объекта геохимиков, и требует разработки системы оценок среднего состава магматических пород в зависимости от их геодинамической позиции. В качестве первого приближения можно предложить оценки на основании данных о распространенности главных типов магматических пород в различных геотектонических зонах земной коры, полученных А. Б. Роновым (Ронов, 1985; см. также Ронов и др., 1990; Ярошевский, 1997). Эти количественные оценки, конечно, полностью подтверждают давно ясную всем геологам геологическую дихотомию магматического вещества земной коры - резкое преобладание основных магматических пород в составе эффузивной компоненты и настолько же резкое преобладание гранитоидного вещества в составе интрузивной компоненты континентов (на геологически независимую позицию основного вулканизма и кислого интрузивного магматизма ссылался, например, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг (Левинсон-Лессин, 1934), критикуя идею Дэли-Боуэна о единой первичной базальтовой магме).
4. Распределение химических элементов в дифференцированных интрузивных магматических комплексах и эффузивных сериях: конкретных ассоциациях магматических пород, объединяемых по признакам их единства в геологическом пространстве-времени в состав формаций, подчинено строгим закономерностям. Эти закономерности наиболее отчетливо проявляются в системе корреляций между содержаниями в породах различных химических элементов (параметров вне пространственной геохимической структуры магматических объектов). Такие соотношения, непротиворечиво интерпретируемые на основании экспериментальных данных как результат дифференциации первичных магматических расплавов, позволяют обосновать идею не только о геологической связи пород дифференцированных комплексов и эффузивных серий, но и о генетической их связи, и ввести представления о дифференцированных сериях, эволюция состава которых подчинена законам некоторого механизма фракционирования. Дополнительную информацию о закономерностях

распределения химических элементов в дифференцированных сериях дают параметры пространственной геохимической структуры интрузивных магматических комплексов, геологическая позиция и обнаженность которых позволяет обосновать последовательность формирования пород, входящих в состав таких комплексов.

5. Принципиально важно, что закономерности распределения химических элементов в конкретных дифференцированных сериях (параметры геохимической структуры соответствующих магматических комплексов) не зависят от геодинамической позиции таких комплексов, т. е. являются инвариантными по отношению к геологическим условиям формирования магматических пород. Этот эмпирический факт показывает, что законы поведения химических элементов в магматических процессах, являясь по своему существу законами физико-химическими, более фундаментальны, чем законы геологии; геологическое разнообразие магматических пород отражает лишь варианты реализации действия одних и тех же физико-химических законов, одних и тех же принципов поведения химических элементов. Очевидность этой ситуации и успехи в разработке физико-химических моделей поведения химических элементов в магматических процессах и предопределили глубокое внедрение геохимических принципов и критериев в современную петрологию и геодинамику; появилось широкое и огромное по научной и прикладной значимости поле эксплуатации геохимии в различных областях геологии.

6. Инвариантность закономерностей распределения химических элементов в магматических комплексах различной геологической позиции позволяет в известном смысле вернуться к классической проблеме геохимии - анализу общих закономерностей распределения элементов во всей системе магматических пород (Гольдшмидт, Виноградов и др.), Эти закономерности уже давно явились основанием сгруппировать химические элементы в соответствии с их особенностями распределения в магматических породах. Во-первых, выделяется основная группа элементов, в состав которой входят самые распространенные элементы (Si, Al, Mg, Fe, Ca, Na, K); их количественные соотношения, собственно, лежат в основе петрохимической систематики магматических пород, а взаимные корреляции (обычно положительные для Si с Na и K и отрицательные для Si с Mg и Fe, но положительные для Si с отношением Fe / Mg) определяют закономерности эволюции дифференцированных серий и коррелируют с температурами кристаллизации. Во-вторых, выделяется большая группа преимущественно литофильных элементов, распадающаяся на ряд подгрупп: 1) Li, Rb, Cs, Be, Ba, Y, TR, Th, U, Zr, Hf, Nb, Ta, а также Ga, Tl, Ge, Sn, Pb, Bi, W, F; 2) Sc, Cr, Mn, а также Co, Ni, Zn; 3) Sr, Ti, P, V, распределение содержаний и отношений содержаний которых по-разному, но для всех устойчиво коррелирует с распределением главных элементов; это совершенно определенно указывает на то, что поведение и главных, и этих второстепенных элементов обусловлено проявлением единого механизма. Закономерности распределения содержаний в магматических породах элементов первой и второй групп полностью соответствуют законам их поведения в ходе фракционной кристаллизации систем породообразующих силикатов, что является доказательством определяющей роли кристаллизационной дифференциации как механизма магматической эволюции. В третьих, от этих закономерностей резко отличаются закономерности распределения большинства халькофильных и сидерофильных элементов (Cu, Ag, Au, Cd, Hg, In, As, Sb, S, Se, Te, Mo, Re, элементов группы Pt), содержание которых в магматических породах в общей системе вообще не коррелирует с главными элементами (за исключением элементов группы Pt, повышенным содержанием которых отличаются ультраосновные породы); лишь в отдельных дифференцированных сериях иногда наблюдаются разные варианты локальной корреляции, например Cu и Fe, платиноидов с Cr и т. п. Для этих элементов характерны свои связи - между собой и, что наиболее важно, с S, в особенности в тех объектах, в которых наблюдается сульфидная минерализация. Очевидно, что поведение этих элементов в ходе магматического процесса, подчиняясь общим законам эволюции, локально контролируется поведением сульфидной компоненты магматических

систем. Наконец, такие элементы, как H, B, C, N, Cl, Br, I, а также He, Ne, Ar, Kr, Xe образуют отдельную группу; их распределение в системе магматических пород также обычно не коррелировано с содержаниями главных элементов и, очевидно, отражает проявление дополнительного механизма - их перераспределения в составе газовой фазы, возможность которого обусловлена летучестью их соединений.

7. Эмпирические закономерности распределения химических элементов в сопоставлении с физическими и физико-химическими законами поведения элементов в различного типа возможных (разрешенных законами физики и химии) механизмах перераспределения и дифференциации многокомпонентных систем позволяют в настоящее время сделать определенный выбор в пользу наиболее реалистичного в природной обстановке механизма дифференциации:

- все предполагаемые механизмы дифференциации в гомогенных (расплавных) системах - гравитационная диффузия, термодиффузия, бародиффузия - не могут быть эффективными в геологических масштабах времени и пространства из-за исключительно низкой скорости диффузионного массопереноса; поэтому геологическое значение могут иметь только механизмы дифференциации в гетерогенных системах;
- модели жидкостного расслоения (ликвации) магматических расплавов остаются до сих пор ни экспериментально, ни теоретически не разработанными; не известно ни одной публикации, в которой была бы предпринята попытка конкретно сопоставить закономерности геохимической структуры магматических комплексов с ожидаемым распределением химических элементов в соответствии с (неизвестными пока) законами ликвации; поэтому доказательств геологической реалистичности механизма жидкостного расщепления нет, а практически давно ясное полное согласие этих эмпирических закономерностей с законами поведения химических элементов в ходе кристаллизационной дифференциации делает идею ликвации в приложении к проблемам магматизма бесперспективной; исключением является, конечно, сульфидно-силикатная ликвация, которая хорошо изучена экспериментально и закономерности которой согласуются с природной картиной распределения халькофильных и сидерофильных элементов;
- вклад в дифференциацию магматической системы возможного перераспределения в пределах магматической камеры газовой фазы или обмена газовой фазой магматической камеры и вмещающей рамы a priori можно считать незначительным по трем причинам: ограниченное содержание летучих компонентов, малая плотность газовой фазы и малая растворимость породообразующих компонентов в геохимически допустимых флюидных фазах не может обеспечить плотностей потоков массопереноса, которые могли бы объяснить наблюдаемые масштабы разделения элементов в ходе магматической эволюции; идея о том, что магматические системы могут обмениваться с массами флюидов, многократно превышающими массы самих магматических систем, не имеет ни эмпирических геологических, ни физических доказательств;
- согласующимся со всем комплексом геохимических данных является механизм кристаллизационной дифференциации; это утверждение опирается на разработанные и экспериментально исследованные модели кристаллизационной дифференциации, в рамках которых со времен Боуэна и Гольдшмидта качественно, а в настоящее время количественно удается воспроизвести практически все закономерности распределения химических элементов как в конкретных дифференцированных комплексах (за исключением ритмической расслоенности интрузивных комплексов ультраосновных, основных и щелочных пород), так и в системе магматических пород земной коры в целом.

8. Современные физико-химические модели поведения химических элементов в ходе формирования и эволюции магматических систем и интерпретация на этой основе указанных эмпирических закономерностей базируются на следующих физических и физико-химических принципах:

- зарождение магматической системы (формирование первичных расплавов) в рамках стандартной модели тепловой истории Земли (с первоначально равномерно распределенными источниками тепла) начинается в результате пересечения геотермы с кривой зависимости температуры солидуса (начала плавления) вещества; реализуются два крайних варианта: 1) пересечение геотермы с кривой безводного солидуса базальтов, что возможно на глубинах, соответствующих низам верхней мантии и глубже, 2) пересечение геотермы с кривой водонасыщенного солидуса основных и кислых магматических и соответствующих им метаморфических пород в пределах нижних горизонтов континентальной коры и в верхней мантии; как показывают геологические данные (дискретность магматизма в геологическом пространстве-времени), такое пересечение вероятнее всего реализуется или при подъеме восходящих струй (диапиров) в условиях движения вещества в мантии, или при погружения водонасыщенных блоков пород земной коры; роль локальных источников тепла (трение движущихся относительно друг друга блоков пород, локальное концентрирование специфического теплоносителя, например флюидного потока) количественно не обоснована; если они и действуют, то только как дополнительные, не способные объяснить глобальный характер магматизма на Земле и планетах земной группы;
- развитие плавления, разделение остаточных твердых фаз и расплава и концентрирование последнего в самостоятельные массы, способные к интрузии или излиянию на поверхность, осуществляются за счет нестабильности гетерогенной системы (расплав-твердые фазы) в гравитационном поле и «эффекта зонного плавления», совместное проявление которых в пределах магмогенерирующей системы ведет к подплавлению гетерогенной смеси в потоках, движущихся вверх, и кристаллизации в потоках, движущихся вниз; по-видимому, пространственное разделение остаточных твердых фаз и расплава может начаться при незначительной доли жидкой фазы с момента формирования в области плавления системы связанных пор, заполненных расплавом;
- формирующиеся магмы представляют собой динамическую систему, состав которой непрерывно эволюционирует; эту эволюцию, протекающую по законам частичного плавления, можно считать фиксированной в условный момент физического отделения расплава от остаточных фаз, и соответствующий расплав можно было бы называть первичным для последующей дифференцированной серии, но надо иметь в виду, что перегретых расплавов в природе практически не бывает, внедряющиеся магмы или изливающиеся на поверхность лавы почти всегда содержат интрателлурические фазы, реакция с которыми в ходе адиабатического подъема продолжает изменять состав расплава; эта ситуация, а также вариации содержаний химических элементов в веществе, вовлекаемом в плавление, являются основанием предполагать множественность составов первичных расплавов, но существование ограниченного числа геодинамически различных магматических формаций и корреляция составов первичных магм с геодинамической позицией предполагает существование определенных закономерностей вариаций условий магмогенерации, ограничивающих и, возможно, дискретизирующих допустимое с общих позиций такое разнообразие;
- затвердевание и сопровождающая этот процесс кристаллизационная дифференциация ведут к формированию дифференцированных интрузивных комплексов и вулка-нических серий; основной механизм перераспределения и разделения химических элементов в объеме магматической камеры или питающего вулканического очага - перемещение в гравитационном поле твердых и жидких фаз разной плотности; факторами, количественно определяющими масштабы дифференциации и пространственное строение расслоенных комплексов, являются: содержание интрателлурической твердой фазы, относительные скорости перемещения твердых фаз и сульфидной жидкости в конвектирующем расплаве и фундаментальные физико-химические параметры, индивидуальные для каждого элемента в каждой фазе, коэффициенты распределения между твердыми фазами и расплавом в зависимости от состава расплава и температуры; такой механизм

кристаллизационной дифференциации имеет все свойства фракционной кристаллизации, но количественно при его описание рэлеевское уравнение не применимо из-за невыполнения одного из его ограничений - объем твердой фазы, находящейся в равновесии со всем объемом расплава на каждой стадии затвердевания не является бесконечно малым, а составляет конечную, обычно существенную часть уже выделившихся кристаллов; механизмы направленной кристаллизации с диффузионным контролем перераспределения компонентов между кристаллизующимися фазами и остальным объемом застойного или конвектирующего расплава не способны количественно объяснить наблюдаемые масштабы дифференциации и строение расслоенных магматических комплексов;

- эффективная ассимиляция вмещающих пород и смешение вещества различной предшествующей, в частности изотопной истории, требуют разработки соответствующей модели массопереноса в магматической камере, ведущего к эффективной гомогенизации; в настоящее время не известно ни одной публикации в этой области, а опыт изучения обстановки формирования магматических комплексов в рамках модели затвердевания рождает определенный скепсис относительно возможности реализации так называемых AF-моделей; это означает, что большое число изотопных данных в области магматических пород остается пока не интерпретируемыми на основе физически реалистичных принципов;

- возникновение локальных рудных концентраций ряда элементов в дифференцированных магматических комплексах (Cr и элементы группы Pt в ультраосновных поро-дах, Cu-Ni-сульфидные руды в основных и ультраосновных породах, Fe-Ti-V-руды в дифференцированных комплексах основных пород и анортозитов, месторождение P в Хибинском массиве, редкометальные месторождения в кислых или щелочных магматических породах) подчинено общим закономерностям поведения элементов в ходе магматической эволюции; основным условием формирования таких локальных концентраций является появление на ликвидусе эволюционирующего магматичекого расплава собственных (рудных) фаз элементов (принцип котектической насыщенности, сформулированный Л.Н.Когарко).

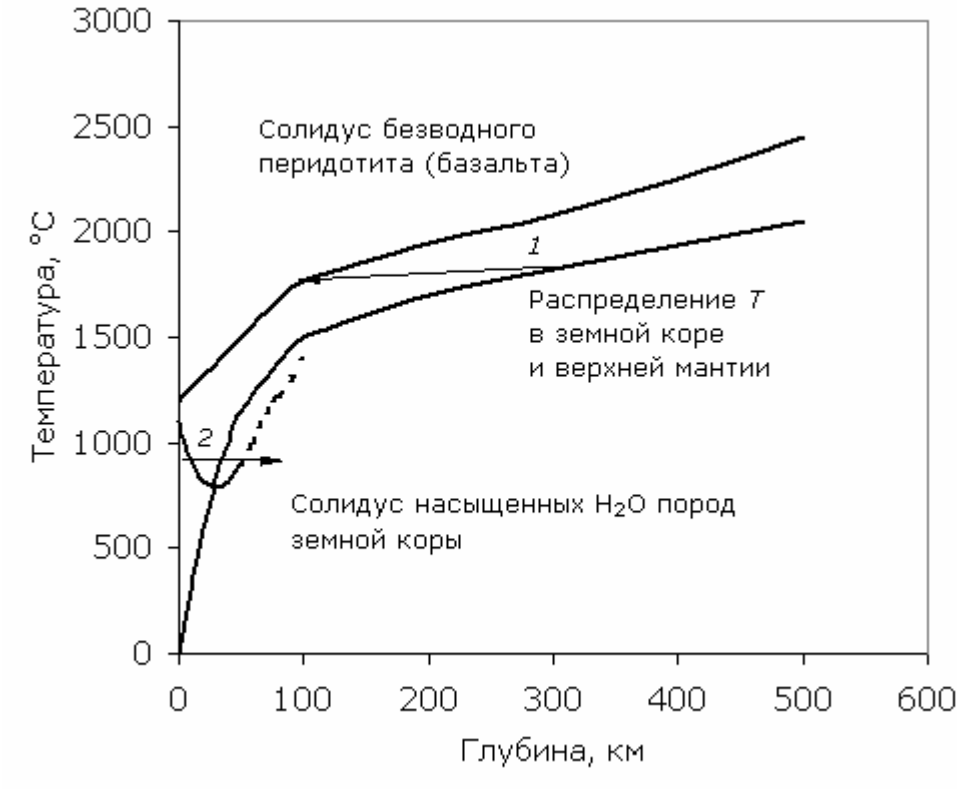


Рис. 19-10. Принципиальные соотношения температур безводного солидуса перидотитов или базальтов, солидуса водонасыщенных пород земной коры и распределения температуры в стандартной модели земной коры и верхней мантии и условия появления расплавов в ходе адиабатического подъема диапира (1) и адиабатического погружения блоков земной коры (2).

***Проблемы*:**

1. Завершение разработки системы кларков всех химических элементов в магматических породах в зависимости от их формационной принадлежности (геодинамической позиции) и геологического возраста.
2. Дальнейшее накопление экспериментальных данных, необходимых для разработки системы термодинамических параметров, определяющихся состояния многокомпонентных системы при составах и условиях, отвечающих природным, и на этой основе создание серии компьютерных моделей термодинамики магматических систем типа и класса COMAGMAT (по-видимому, ставить задачу построения единой общей термодинамической модели магматической системы в настоящее время не реально из-за далекого от решения состояния проблемы термодинамики силикатных и более сложных расплавов).
3. Дальнейшее развитие модели физико-химической динамики магматической эволюции на базе теоретических принципов, реализованных при разработке в ГЕОХИ РАН и на кафедре геохимии МГУ. ЭВМ-модели динамики затвердевания пластовых интрузивов.
4. Необходим поиск идеи, которая могла бы объяснить столь характерную черту строения дифференцированных магматических комплексов, как ритмическая расслоенность, тем более что, по сути дела, центральным моментом в проблеме формирования магматического оруденения является именно механизм формирования такой расслоенноти: рудные прослои всегда являются закономерными членами ритмически расслоенных пачек.
5. Не ясными с физико-химической позиции остаются особенности поведения химических элементов на экстремальных стадиях магматической эволюции - в ходе формировании первичных расплавов при малой доле расплава и на заключительных стадиях затвердевания, когда существенными компонентами расплавов могут стать обычно второстепенные элементы магматических систем (CO_2, S, Cl, F, некоторые редкие элементы) - это может быть причиной весьма сложных фазовых отношений, в том числе, и с появлением жидкостной несмесимости.
6. Необходимы целенаправленные исследования и, главное, разработка моделей термодинамики и физико-химической динамики поведения сложных магматических систем с количественным учетом дополнительных к кристаллизационной дифференциации механизмов - ликвации и газового переноса, на основе которых можно было бы среди эмпирических закономерностей распределения элементов в магматических комплексах найти признаки и оценить реальный вклад этих механизмов в магматическую эволюцию и, в частности, формирование магматического оруденения.
7. Необходимо найти, если это вообще возможно, физически ясные и непротиворечивые условия, которые могли бы способствовать эффективному массопереносу и гомогенизации магматического расплава на всех стадиях его формирования, подъема, взаимодействия с вмещающими породами и затвердевания с учетом того, что выравнивание состава реально осуществляется диффузионным переносом, т. е. действует лишь на малых расстояниях, и гомогенизация всего объема магмы требует мощной турбулентной конвекции - кто же в природе может обеспечить такое перемешивание гетерогенной, со взвешенными кристаллами магматической массы?
8. Проблемой является обоснование систематической геохимической неоднородности вещества-источника магматических систем; для корового магматизма это очевидно и в этой области можно привлекать конкретные геологические наблюдения, но для

мантийного магматизма представления о геохимической гетерогенности источника остаются модельными и для их обоснования необходим комплексный (геологический, геофизический и геохимический, включая изотопный) материал.
9. Особой проблемой является понимание условий и механизма формирования геохимически крайних дифференциатов, многократно обогащенных относительно возможного источника всеми элементами, накапливающимися в ходе магматической эволюции; острота этой проблемы усиливается в связи с тем, что в земной коре известны огромные, буквально гигантские объекты этого типа, что требует допущения вовлечения в процесс дифференциации колоссальных масс гипотетического вещества источника.
10. Несомненно, большое значение имеет продолжение накопления геохимических, в том числе, изотопных данных, характеризующих конкретные магматические комплексы разного возраста и различной геодинамической позиции, но это, скорее, не собственно геохимические проблемы (хотя мы и можем столкнуться с ранее неизвестными, новыми геохимическими закономерностями), а уже проблемы использования геохимической информации и знания законов поведения химических элементов в магматических процессах для решения проблем геологии, геофизики, петрологии - геохимия все-таки геологическая наука.

Разделы: Принципы поведения химических элементов в процессах выветривания и осадкообразования, Геохимия процессов метаморфизма**,** Принципы поведения элементов в гидротермально-метасоматических процессах и список литературы - опущены. Желающие познакомиться с ними, а так же более подробно с изложенными в этой главе, могут обратиться на сайт: http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1177057&uri=lecture6.htm

19. 7. Геохимия биосферы.
***Основные идеи*:**
1. В состав биосферы в соответствии с пониманием В.И. Вернадского входит гидросфера, атмосфера, живое вещество и верхняя часть земной коры с весьма неопределенным положением нижней границы; здесь в состав биосферы включены только почвы континентов и илы океанов.
2. При таком понимании объема биосферы ее средний химический состав близок к составу резко преобладающей по массе гидросферы и предопределен геохимическими законами дегазации земных недр и взаимодействия избыточных летучих с породами земной коры.
3. Наблюдаются значимые корреляции содержаний большинства химических элементов (за исключением избыточных летучих) во всех резервуарах биосферы с их распространенностью в верхней части континентальной коры; таким образом, главным фактором, определяющим распространенность большинства элементов в резервуарах биосферы и биосфере в целом, является состав земной коры, который, в свою очередь, предопределен законами выплавления вещества земной коры из мантии и космической распространенностью химических элементов.
4. Основная прямая геохимическая функция живого вещества в биосфере заключается в создании новых, вне влияния жизни не образующихся в существенных количествах форм соединений химических элементов, прежде всего, огромной гаммы органических соединений и свободного молекулярного кислорода, биогеохимические потоки которых строго количественно связаны стехиометрией реакции фотосинтеза ($CO_2 + H_2O > CH_2O + O_2$), а также некоторых соединений S, N, молекулярного водорода и др.; такие вещества и соединения надо считать биогенными в прямом смысле этого слова.
5. Косвенное влияние живого вещества заключается в создании в биосфере ее основной геохимической структуры - расщепления на аэробную (O_2) и анаэробную ($C_{орг}$) обстановки; разнонаправленные термодинамически обусловленные геохимические реакции в этих обстановках, идущие нередко при участии микроорганизмов,

предопределяют многообразие несовместимых форм нахождения химических элементов в биосфере, а циклический характер биогеохимических процессов обеспечивает постоянное воспроизводство этих обстановок в течение всей геологической истории биосферы.
6. Важным фактором влияния деятельности живого вещества на геохимические процессы в биосфере является огромная скорость биохимических реакций, обусловленная специфическим ферментативным катализом, что ведет к легкости достижения термодинамического равновесия продуктов биогеохимических реакций в среде жизни и в значительной степени определяет равновесный характер аутигенного минералообразования.
7. Биосферу можно представить как динамическую систему, в которой резервуары связаны между собой потоками вещества (и энергии), а система в целом является открытой по отношению к земной коре и поступлению мантийного материала. Модель такой системы относится к классу динамических систем с обратными отрицательными связями. Это означает, что при постоянных граничных условиях такая система, представленная самой себе, подчиненная действию собственных законов, приходит к стационарному, неизменному во времени состоянию; временной масштаб достижения стационарного состояния по порядку величины соответствует среднему времени пребывания вещества в резервуаре живого вещества, которое очень мало по сравнению с геологической длительностью существования биосферы. Таким образом, основной геохимический закон биосферы - стационарность, постоянство биогеохимических процессов в течение всей геологической истории; этот вывод является теоретическим основанием одного из важнейших положений концепции биосферы Вернадского - постоянства геохимических функций живого вещества.
8. В стационарном состоянии составы взаимодействующих резервуаров биосферы определяются балансом потоков, питающих и покидающих резервуары. Малая масса живого вещества и небольшой временной масштаб (первые годы) биогеохимического круговорота ведут к тому, что собственно биогеохимические процессы (потоки вещества) контролируют лишь локальные обстановки (например, в почвах или в формирующихся осадках на ранних стадиях диагенеза); в глобальном масштабе состав подвижных резервуаров - гидросферы и атмосферы - контролируется балансом геохимических потоков - взаимодействием с твердыми породами земной коры в процессах выветривания и осадкообразования.
9. Законы биогеохимического и геохимического круговоротов и временные масштабы достижения стационарного состояния (первые миллионы - первые сотни миллионов лет) позволяют предполагать, что состояние биосферы, близкое к современному, должно было сформироваться в течение первых сотен миллионов лет геологической истории и не подвергалось в дальнейшем никакой существенной геохимической перестройке.

Табл. 19. 10. Массы резервуаров биосферы.

Резервуары	**Масса**	
	10^{21} г	**%**
Гидросфера	1410	99.62
Атмосфера	5.2	0.367
Илы океанов	0.1	0.00707
Почвы континентов	0.05	0.00353
Живое вещество	0.0041	0.00029
Биосфера в целом	1415.3541	100.00
Земная кора	28 460	

Табл. 19. 11. Распространенность химических элементов в биосфере, 10^{-4} вес. %.

Элемент	Распространенность	Элемент	Распространенность
1 H	107200	22 Ti	0.36
2 He	0.0027	23 V	0.012
3 Li	0.18	24 Cr	0.0066
4 Be	0.00016	25 Mn	0.214
5 B	4.4	26 Fe	3.92
6 C	30.5	27 Co	0.0049
7 N	2770	28 Ni	0.008
8 O	853900	29 Cu	0.018

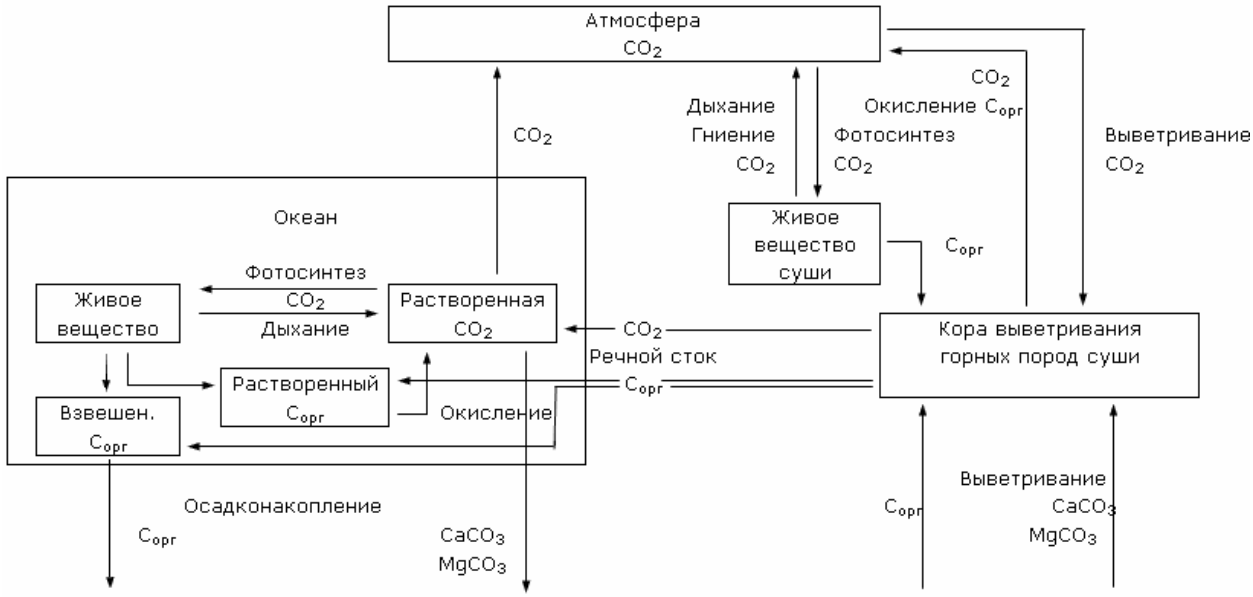


Рис. 19-11. Замкнутая часть круговорота углерода в биосфере

***Проблемы*:**

1. Для создания глобальной резервуарной модели биосферы требуется:

- обоснование схемы резервуарной модели, адекватно отражающей крупномасштабную структуру биосферы;
- уточнение оценок распространенности химических элементов в резервуарах биосферы и разработка соответствующих оценок с учетом крупномасштабной ее неоднородности;
- количественная оценка потоков химических элементов между резервуарами биосферы с учетом крупномасштабной ее неоднородности.

2. Создание геохимической карты биосферы и разработка методологии ее биогеохимического районирования (например, на основе принципов геохимии ландшафтов) и количественной характеристики крупномасштабной неоднородности, что позволит начать построение пространственно распределенных моделей геохимической структуры и динамики биосферы.

3. Систематика геохимических функций живого вещества, конкретизация биогеохимических реакций, протекающих при прямом участии живого вещества и ведущих к геохимически значимым следствиям, оценки соответствующих потоков химических элементов, их соединений и связи этих функций с определенными носителями в ходе геологической истории биосферы.

4. Оценка на основе резервуарной модели биосферы системы факторов, определяющих устойчивость биосферы как системы и ее чувствительности к внешним воздействиям.

19. 8. Кратко о минералогии.

Эволюция магматических пород в верхней мантии Земли

Л.Л. Перчук (http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1153699&uri=page3.htm)

Табл. 19. 12. Содержание кремнезема - SiO_2 в магматических горных породах - основа их классификации:

Группа пород		Содержание SiO_2 мас. %
кислые	граниты, гранодиориты, дациты и др.	~ 62
средние	диориты, андезиты	~ 58
основные	габбро, долериты, базальты и др.	~ 52
ультраосновные	дуниты, лерцолиты, коматииты и др.	~ 42

Имеются сведения о реологии различных магматических расплавов, из которых эти породы образовались. Продуктами кристаллизации силикатных расплавов сложена почти вся земная кора под океанами и значительная часть континентальной коры. Широкая распространенность магматических пород на поверхности Земли позволяет собрать практически любое количество образцов горных пород, которое необходимо для достаточно точной диагностики условий их кристаллизации. В этом разделе, однако, мы рассмотрим эволюцию пород, раскристаллизованных в верхней мантии Земли. Этот объект исследования наиболее полно раскрывает возможности минералогической термобарометрии для познания истории формирования глубинных магматических пород. Напомним лишь, что большинство расплавов основного и ультраосновного состава зарождается в верхней мантии Земли.

В отличие от коровых, интрузивные породы верхней мантии менее доступны для непосредственного изучения. Кроме того они содержат слабо зональные минералы, затрудняющие анализ изменения PT-параметров в каждом конкретном образце. Однако сами минеральные ассоциации весьма точно отражают термодинамическую обстановку, характерную для того участка верхней мантии, из которого образец этой породы был "отобран". Это слово заключено в кавычки, поскольку не существует возможности отбирать образцы непосредственно из верхней мантии. Но они попадают на дневную поверхность благодаря излияниям мантийных магм. В таких магмах могут содержаться ксенолиты - твердые мантийные породы, захваченные и вынесенные на земную поверхность более поздними и более глубинными мантийными расплавами . С другой стороны, в самих мантийных магмах кристаллизация минералов могла начаться в условиях верхней мантии, а завершиться уже в земной коре (для таких магм применяется термин "интрателлурическая кристаллизация") или же на ее поверхности. В обоих случаях эволюция PT-параметров "записывается" равновесиями минералов, слагающих эти горные породы.

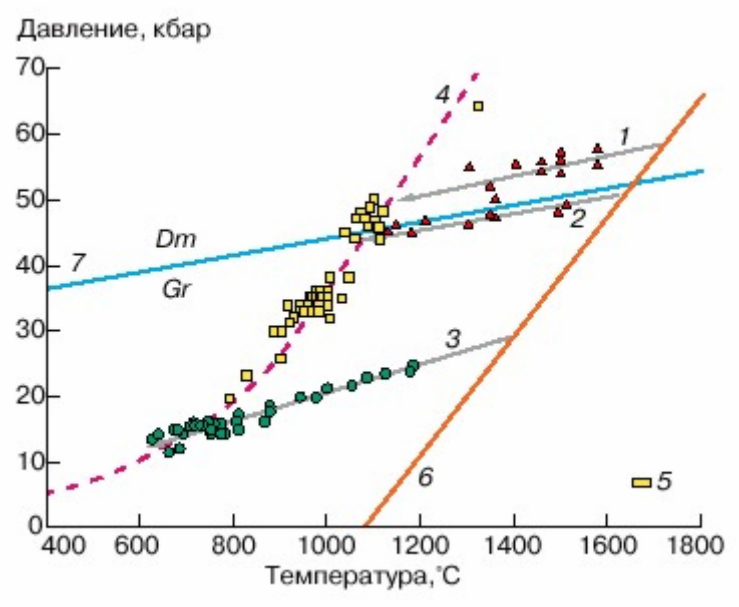


Рис. 19-12. PT - тренды остывания глубинных магматических расплавов и твердых горных пород в верхней мантии Земли и земной коре. 1 и 2 - катаклазированные (деформированные) гранатовые лерцолиты из ксенолитов в кимберлитовых трубках Южной Африки; 3 - условия метаморфизма магматических пород ультраосновного и основного состава в верхней мантии, на границе с нижней частью земной коры (северный Казахстан и восточный Китай). Усредненный геотермический градиент под континентами: 4 - по геофизическим расчетам и 5 - по результатам, полученным с помощью минеральных термометров и барометров; 6 - граница затвердевания (солидус) ультраосновной мантийной магмы по экспериментальным данным; 7 - линия фазового перехода графита в алмаз.

Эволюция метаморфических комплексов в земной коре. На основе принципа фазового соответствия можно решать задачи об эволюции термодинамических параметров кристаллических пород. Здесь мы рассмотрим реализацию этой возможности на примере метаморфических комплексов. Чтобы корректно решить задачу о PT-трендах метаморфической эволюции такого комплекса, необходимо произвести его детальную геологическую съемку и отобрать систематическую коллекцию образцов горных пород. Среди них необходимо выбрать наиболее информативные минеральные ассоциации с зональными минералами, т.е. образцы, пригодные для определения температуры и давления. Это очень важный момент: нужно быть уверенным в точности отбора необходимого для геотермобарометрии материала. Поэтому обычно я рекомендую изготавливать прозрачные шлифы (их толщина составляет около 20-30 микрон) горных пород прямо в поле и внимательно изучить их на предмет равновесности минералов, наличия реакционных кайм, достаточности фаз для протекания барометрических реакций. После обнаружения информативных минеральных ассоциаций, эти шлифы можно отполировать в лаборатории для последующего изучения с помощью электронного микроанализатора (микрозонда). Наконец, когда определен PT-тренд метаморфической эволюции того или иного комплекса, можно приступить к созданию модели его погружения на установленные термобарометрически глубины и последующего его подъема к поверхности.

В начальный момент времени, т.е. в самом начале PT-тренда, составы ядер сосуществующих минералов в метаморфической породе находились в равновесии, тогда как их края достигают равновесия на конечной стадии процесса. Приведя в фазовое соответствие составы контактирующих краев кристаллов и их центров в любом из отобранных образцов, с помощью геотермометров можно определить температуру

начального и конечного этапов метаморфизма. Более того, используя зональность сосуществующих минералов и принцип фазового соответствия можно рассчитать промежуточные значения температуры.

Несколько сложнее обстоит дело с оценкой давления. Из предыдущего обзора ясно, что двух контактирующих минералов для его расчета не достаточно. В петрографических шлифах нужно найти следы реакций между минералами - реакционные структуры, возникшие в результате спада или возрастания давления и содержащие зональные минералы - участники этих реакций.

Зональные минералы распространены во всех метаморфических породах. Более того, каждой зоне крупного минерала в том же прослое породы соответствует несколько очень мелких гомогенных зернышек данного минерала. Это значит: что практически каждый образец несет информацию о закономерном изменении P и T. Для многих глубокометаморфизованных комплексов корреляция между PT-параметрами оказалась линейной: P, кбар = $0.02(3.7\cdot10^{-3})T\ ^0C + 6.8$. Это доказывает сопряженность их изменения за теологически короткий промежуток времени. К этому мы еще вернемся. Заметим лишь, что с помощью геологических термометров и барометров удалось вывести PT -тренды для большого числа метаморфических комплексов нашей планеты. По условиям геологического залегания и метаморфической эволюции они четко подразделяются на три большие группы.

1. Относительно низкотемпературные комплексы повышенного давления из складчатых зон древних островных дуг. На рис. 19-13 им соответствуют PT-тренды с индексом 1. Восходящая в область высоких значений P и T ветвь этих трендов соответствует прогрессивному этапу метаморфизма (PT-параметры возрастают), а нисходящая - регрессивному (PT-параметры снижаются). Обе ветви прекрасно выражены в так называемой инверсионной химической зональности минералов. Например, гранаты из глаукофановых сланцев и развитых по ним амфиболитов имеют типичную инверсионную зональность: в одном и том же зерне граната X_{Mg} сначала возрастает, а затем снижается. Эта зональность отражает погружение и последующее всплывание породы в пределах земной коры в виде PT-петли (группа 1 на рис. 19-13), вдоль которой максимум давления достигается при 12 кбар, т.е. на глубине около 35 км. Сохранность инверсионной зональности обусловлена относительно низкотемпературными условиями метаморфизма, при которых скорости диффузионного выравнивания концентраций в силикатных минералах ничтожны.

2. Под номером 2 на диаграмме рис. 19-13 приведена группа PT-трендов для метаморфических комплексов складчатых областей, окаймляющих на континентах древние кристаллические щиты. Как правило, это горные системы разного геологического возраста. Как и для пород первой группы, для них характерны обе ветви регионального метаморфизма - прогрессивная и регрессивная. В них также широко распространена инверсионная зональность минералов, сохрананеие которой обусловлено относительно низкими значениями температуры.

3. Группа трендов 3 на рис. 13-13 относится к комплексам гранулитовой фации - наиболее глубоко метаморфизовынным породам. Запись прогрессивного этапа никогда не сохраняется в их минеральных ассоциациях. Вместе с тем среди пород этой фации встречаются такие, которые изначально образовались на поверхности Земли в виде известняков, песчаников, глин, вулканических пород. Накопление мощных вулканогенно-осадочных толщ приводило к постепенному погружению их на глубины порядка 30 км. Они претерпевали прогрессивный метаморфизм в заданном PT-режиме. Однако запись этого этапа метаморфизма в виде зональности минералов в породах не сохраняется из-за высоких значений температуры, способствующей достаточно быстрому диффузионному выравниванию составов минералов. Достигнув пика PT-параметров, эти породы вновь поднимались к поверхности Земли.

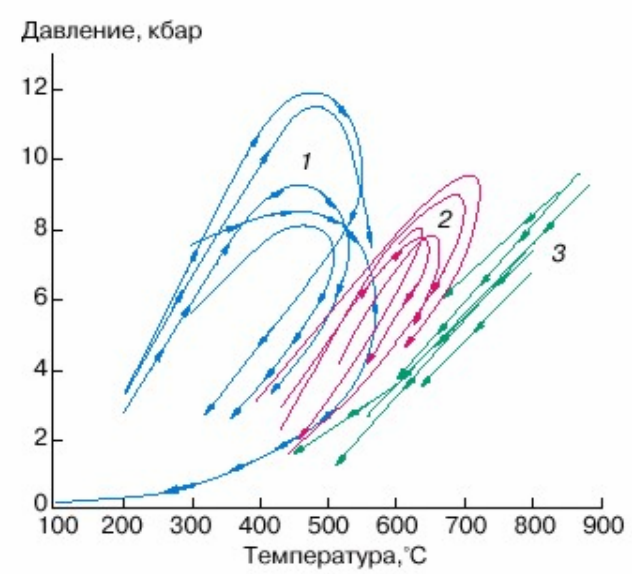


Рис. 19-13. Изменение температуры и давления при метаморфизме некоторых вулканогенно-осадочных комплексов (PT- тренды эволюции метаморфизма), сформированных на континентальных окраинах и островных дугах (1 - пунктирные петли), в складчатых областях (2 - петли, нарисованные сплошными линиями) и в континентальных плитах (3 - сплошные прямые). Стрелки показывают направление изменения PT-параметров. Видно, что в гранулитовых комплексах (3), развитых преимущественно на континентах, отсутствуют прогрессивные ветви, т.е. в минеральных ассоциациях не сохранились сведения о возрастании PT-параметров метаморфизма. Это значит, что при высокой температуре скорости диффузии компонентов в минералах настолько велики, что следы более ранних процессов бесследно исчезают.

Некоторые проблемы

Известны комплексы, сформированные при аномально высоких значениях давления. Например, в последние годы открыты алмазоносные метаморфические комплексы. Причем сложены они обычными регионально метаморфизованными породами с реликтовыми минералами, которые могли возникнуть лишь при очень высоких значениях давления, соответствующих глубинам более 120 км. Среди таких минералов - мелкий алмаз, часто встречающийся в сростках с цирконом (Zr_2SiO_4) и Ca-Mg карбонатами, коэсит (высокобарная форма кремнезема), глиноземистые сфен (твердый раствор систем Al_2O_3-$CaTiO_3$) и рутил (TiO_2-Al_2O_3), а также калийсодержащий клинопироксен (твердый раствор $Ca(Mg, Fe)Si_2O_6$-$KAlSi_2O_6$). Такие аномальные явления пока не нашли физического объяснения: нам неизвестен механизм, который позволил бы погрузить крупные массы континентальной коры в верхнюю мантию на глубину более 120 км и вернуть их на дневную поверхность. Петрологи настойчиво работают сейчас над этой и подобными проблемами, стараясь разгадать загадки, задаваемые природ

Обозначения

Dm - алмаз (diamond);Gr - графит; Grt - твердый раствор граната $(Fe, Mg, Ca)_3Al_2Si_3O_{12}$; Cpx - клинопироксен = $Ca(Mg, Fe)Si_2O_6$: $[KAl]Si_2O_6$ = жадеит; Ol - оливин = $(Fe, Mg)_2SiO_4$; Spl - шпинель, $(Fe, Mg)(Cr, Al)_2O_4$; XMg = Mg /(Mg + Fe); T - температура, °C; P - давление, кбар; h = 3*P (кбар) - глубина протекания процесса в земной коре, км.

19. 9. Модели образования месторождений.

Металлы - при охлаждении горячей Земли за счет гигантских флуктуаций плотности при достижении критических температур. Как известно, «... любое месторождение полезных ископаемых представляет собой исключительное природное явление, и задача геолога сводится к определению геологических и физико-химических условий, приведших к локальной концентрации минерального сырья на фоне его регионального рассеяния» (Смирнов, 1969, стр. 10). Содержание ценных компонентов в рудных месторождениях всегда больше среднего содержания их в горных породах земной коры (их кларка). Например, для свинца оно выше кларка в 600 раз (A = 600), для молибдена и урана в 200-250 раз, для меди и золота в 100 раз, для никеля, ванадия и цинка в 50 раз, для олова в 25 раз, для железа в 8-10 раз (A = 10) и т.д. Следовательно, месторождения полезных ископаемых представляют собой местное повышение концентрации тех или иных элементов и их природных химических соединений, на общем фоне их рассеяния в земной коре. Заметим, что общий объем полезных элементов собранных в месторождениях ничтожен по сравнению с их массами, содержащимися в земной коре.

Известно, что флуктуации объема, плотности и концентрации становятся очень большими при приближении к критической точке данного вещества (или его компонента), так как при этом $\partial p/\partial v$ стремится к нулю. Это явление носит название фазового перехода второго рода (ФП-2) «критическая точка равновесия жидкость-пар» (Паташинский, Покровский, 1982). В частности, наличие в системе ФП-2 объясняет очень сильное рассеяние света веществом, находящимся в состоянии, близком к критическому. Это, так называемая, «критическая опалесценция». Для нашей модели это означает, что если образование месторождений имеет флуктуационный характер, то они могли бы возникнуть только при температуре вещества земной коры, приближающейся к критической. По порядку величины, это тысячи градусов, например, критические температуры $T_{кр}$ и давления $P_{кр}$ (бар) для некоторых элементов: Pb = 5395 K, 1065 бар; Al = 5445 K, 1920 бар; Cu = 7010 K, 3545 бар и т.д. (рис. 19-14-b) (Кузнецов, 1985; Басин, 2002). В этих работах приведены критические давления, объемы и энтропии ряда химических элементов. Можно считать, что $T_{кр}$ интересующих нас химических элементов, по порядку величины, около 10 000 K.

Согласно теории флуктуаций, относительные отклонения концентрации уменьшаются с увеличением объема V_n и концентрации частиц N. Положим, что V_n это объем земной коры, V_n = const, тогда зависимость $K^2 \sim 1/N$ показывает, что в системе имеют (или имели раньше) место флуктуации. Выше мы отмечали, что концентрация полезных элементов в породах рудных месторождений тем выше, чем ниже его кларковое содержание. Рисунок 19-14 показывает отношение концентрации некоторых химических элементов N солнечного вещества к относительной концентрации их K в земной коре (в log-log координатах). Видно, что для некоторых элементов, таких как, например, Pb, Mo, Cu, Ni, можно записать: $K^2 \sim N^D$, где $D < 1$ ($D \approx 2/5$). Железо и олово не попадают в эту зависимость, однако, если учесть, что мы использовали данные по N солнечного вещества, а в земных гранитах относительная концентрация железа примерно в 3-4 раза меньше, чем на Солнце, хондритах и базальтах, то и железо «оказывается на этой прямой». Вероятно, можно найти причину, по которой и Sn окажется в общей зависимости с другими элементами. Эти факты служат иллюстрацией того, что распределение полезных элементов в земной коре имеет флуктуационный характер.

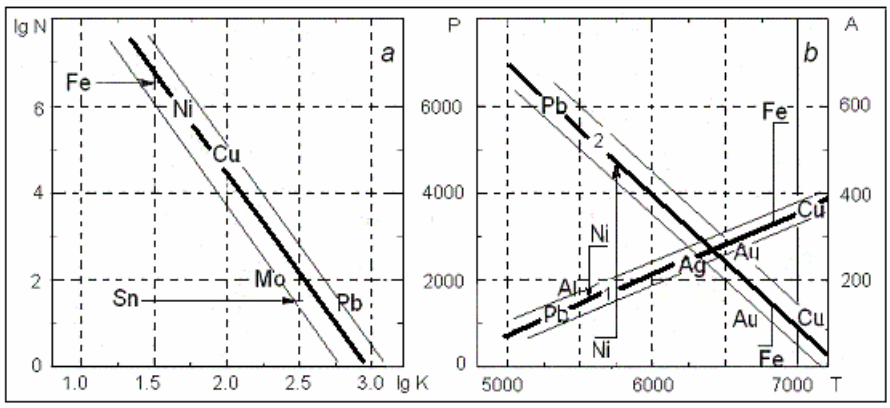


Рис. 19-14. Связь концентрации химических элементов в земной коре *K* с концентрацией *N* их на Солнце (Смирнов, 1969) –***a***. Критические параметры элементов $T_{кр}$ и $P_{кр}$ (1) и А (2) для тех же элементов – ***b***.

Связь между флуктуациями в объеме жидкости при критической температуре обуславливается силами межмолекулярного взаимодействия, однако, она может действовать на расстояниях, значительно превышающих радиус взаимодействия. Это может происходить потому, что сжимаемость вещества вблизи критической точки очень велика и уже малые силы могут вызывать значительные изменения, как плотности вещества, так и концентрации входящих в него элементов.
Ниже представлены три группы рудных элементов, которые встречаются внутри групп.
Первая группа: рудные элементы месторождения – Au, Ag, Zn, Cu, Pb, Cd, Sb, Bi, As.
Вторая группа: Ba, Sn, Mo. Третья группа: Co, Ni, Mn, V.

При остывании протоземли, представляющей собой нагретый до температуры 30 000 К газовый шар, температура вещества верхнего слоя, охлаждаемого излучением, последовательно проходит критические температуры металлов. При достижении критической температуры вещество резко изменяет свои термодинамические свойства, в частности, резко падаем величина поверхностного натяжения и за счет термофлуктуаций вещество, находящееся при критической температуре, способно собираться в огромные образования – прообразы будущих месторождений. Если у химических элементов критические температуры близки по величине, то эти образования могут включать эти элементы (схема и таблица 19.13).

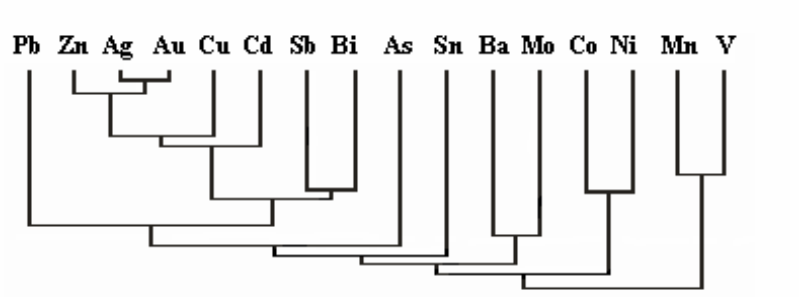


Схема. Группы химических элементов-«соседей» по месторождениям.

Таблица 19.13.

Ag	Al	Au	Cu	Ni	Pb	Pd	Fe	Sm	Sr	Li	Na	K
6300	5445	6625	7010	5640	5395	5820	6686	5036	5034	3210	2480	2230

Нефть и газ. Проблема образования нефти и газа обсуждается среди специалистов до сих пор и, несмотря на всю свою значимость для человечества, все еще не имеет однозначного решения. Высказываются разные мнения по поводу органической и неорганической природы месторождений нефти и газа, выдвигаются и обсуждаются те или иные способы синтеза углеводородов в земных недрах, определяется роль водорода и тепла в этом процессе.

Рассмотрим модельную задачу, которая возможно имеет отношение к проблеме образования углеводородов. В любом случае, по своей постановке, эта задача находится в контексте нашей модели. Представим себе, что имеется некая газопроницаемая осадочная толща, в которой произвольным образом распределен углерод. Это может быть, например, графит, или остатки органики. Не будем делать различий, важно, что углерод, либо его соединения, - не летучи. “Продуем” эту среду водородом с одновременным её нагревом тепловым фронтом. Как следует из книг и статей по происхождению нефти и газа и формированию их месторождений, в таком случае могут образовываться углеводороды. Они, в отличие от первичного углерода, в достаточной степени летучи и способны диффундировать вдоль направления продувки и направления теплового фронта. Если на их пути встречается преграда, непроницаемая для углеводородов, то здесь может возникнуть и сформироваться месторождение (такая модель тривиальна и в достаточной степени очевидна). Легко убедиться, что в этой модели присутствуют два взаимозависимых процесса: диффузия (перколяция) и дрейф (массоперенос). Свойство диффундировать углеводороды приобретают при водородной “продувке”, т.е. при массопереносе – дрейфе. В свою очередь, заметная прибавка подвижных частиц углеводородов к массе «продуваемого» водорода, меняют параметры массопереноса. Таким образом, образование углеводородных кластеров-фракталов приводит к прекращению процесса переноса.

Как следует из модели горячей Земли, водород является неотъемлемой частью вещества Земли и чем глубже, тем водорода больше. Водород выбрасывается из Земли при извержении вулканов, в зонах разломов, в зонах подготовки тектонических землетрясений и т.п. Наличие водорода изменяет термодинамические характеристики среды, что способствует более эффективному тепломассопереносу вещества. Поэтому, есть основания считать, что водород принимает участие в образовании углеводородов, например, по хорошо известной схеме Фишера и Тропша - синтеза жидких углеводородов из CO и H_2 в присутствии катализатора.

Как известно, структура, включающая два взаимосвязанных механизма: дрейф и перколяцию, обладает способностью к самоорганизации (Хакен, 1980). Как известно, подобные процессы самоорганизации описываются известным уравнением Фоккера-Планка (ФП). Физический смысл решения уравнения ФП можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (энергия, площадь поверхности и т.п.), тем меньше вероятность появления этого решения ($1/f$ фликкер-шум). В нашей задаче это означает, что должна наблюдаться линейная зависимость (в логарифмических координатах) между энергетическим параметром, характеризующим нефтяное или газовое месторождение и частотой встречаемости месторождений подобного типа. В принципе, если формирование месторождений углеводородов (УВ) происходит как процесс самоорганизации (а именно так реализуется превалирующее большинство процессов в Природе), то должна наблюдаться аналогичная зависимость. Показатель угла наклона такой прямой характеризует величину фрактальной размерности (Федер, 1991). Рядом авторов, в том числе и в этой книге, было показано, что по мере того, как система

самоорганизуется все в большей и большей степени, величина фрактальной размерности убывает.

Проиллюстрируем сказанное на таком примере. В начале процесса мы имели некий объем, занятый углеродом. Топологическая размерность объема - тройка. По мере того, как происходила “прокачка” водородом, образование УВ и их диффузия в направлении “продувки”, топологическая размерность области УВ убывала, стремясь к двойке и меньше. В этом случае толщина обогащенного УВ слоя стремится к минимуму, структура становится двумерной и меньше, напоминая известный «ковер Серпинского». Таким образом, оценивая степень фрактальности ряда месторождений, можно сказать, насколько успешной была самоорганизация в процессе их образования.

Рассмотрим решение уравнения ФП, связанное с пространственным распределением зон повышенной концентрации УВ, т.е. с пространственным распределением месторождений. Примем, что месторождения УВ возникли в процессе самоорганизации некой геологической структуры, тогда они фрактальны. Воспользуемся параметром фрактальности, аналогичным тому, что используется для облаков, т.е. отношению площади поверхности месторождений S к их периметру P: $P = S^{D/2}$. (Для месторождений УВ это может быть совсем другой параметр, его ещё необходимо найти, но, в любом случае, будет выполняться общее для таких структур правило: больших месторождений - мало, меньших, - больше, ещё меньших, - ещё больше и т.д.). Показатель наклона прямой в координатах log-log определяет величину фрактальной размерности, величина которой, в свою очередь, показывает степень самоорганизации. По-видимому, для геологов-нефтяников особый интерес приобретает проблема cutoff, т.е. проблема ограничения величины и числа крупных месторождений. В последнее время эти проблемы оказались в сфере интересов новой области физики, занимающейся проблемой самоорганизованной критичности.

Воспользуемся картой месторождений УВ расположенных на севере Тюменской области (см. рис. 19-15-А). В поле нашего зрения попали 150 месторождений, в основном небольших, однако, здесь представлены и такие гиганты как Уренгой. Подсчет периметров и площадей месторождений УВ показал, что в масштабе log P - log S все данные располагаются около общей прямой (рис. 19-15-Б). Число месторождений от их величины в log-log масштабе представлено на средней панели рис. 19-15-Б (tg угла наклона прямой = -1.15), а на нижней панели рисунка изображена зависимость фрактальной размерности D = 2lg P/lg S от площади S (D = 1.85). Этот рисунок показывает, что чем меньше размер залежи, тем больше размерность D. Главной причиной этого, по-видимому, является то, что используемая нами карта недостаточно подробна для выявления более мелких деталей залежей.

Анализируя рис. 19-15-Б, можно отметить, что полученный результат по выявлению фрактальности структур залежей углеводородов идентичен результатам численного моделирования с алгоритмом Бака и др. по самоорганизованной критичности на двумерных решетках. По-видимому, идею аналогии между месторождениями УВ и облаками можно признать удачной. Для того чтобы оценить область «обрезания» (cutoff) по всей видимости, мала статистика, это может означать, что-либо в этой области не выявлены более мелкие месторождения, либо крупные представляют собой не самостоятельные образования, а сумму более мелких. Получившаяся у нас фрактальная размерность D для залежей УВ больше, чем для облаков. Это может означать, что самоорганизация облаков происходит более эффективно, чем УВ. Однако это может означать и то, что на карте не нанесены более подробные детали строения УВ структур.

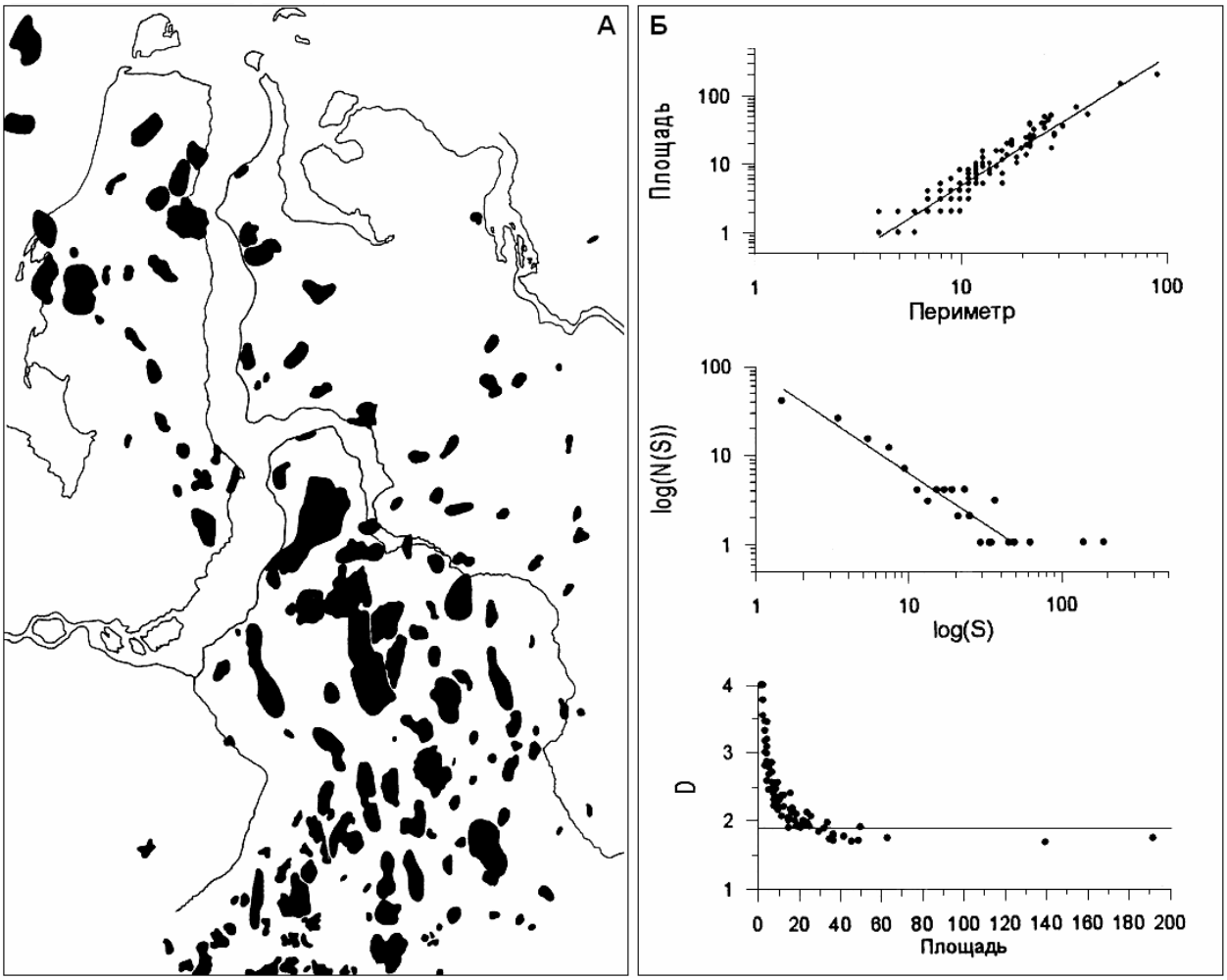


Рис. 19-15. Обзорная карта газовых и нефтяных месторождений севера Тюменской области (А). Фрактальный характер нефтяных месторождений: а) периметр *P* - площадь *S* в log-log масштабе; б) число месторождений *N* - площадь *S*; в) фрактальная размерность *D* = 2*lgP/lgS*, как функция *S* (Б).

Предлагаемый подход имеет смысл применить для других нефтяных и газовых регионов и даже внутри них. Возможно, это окажется полезным для понимания природы образования нефтяных и газовых месторождений и для более эффективного их использования.

Приведенный в этом параграфе материал можно рассматривать как ещё один пример фрактальности.

Алмазы на поверхности Земли. Алмаз - наиболее изученный минерал. Согласно (Харькив и др. 1997), каждый год публикуется более 1000 статей и монографий, посвященных алмазу. Не раскрывая широко эту очень интересную тему, мы попытаемся ответить на вопрос, могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли, или они возникли на очень большой глубине и затем были вынесены на дневную поверхность. Геологи считают, что алмазы сформировались в условиях их термодинамического равновесия, хотя известны алмазы ударного (импактного) происхождения. Считается, что средний возраст алмазов 3.2-3.5 млрд. лет, в то время как возраст пород кимберлитовых трубок «всего лишь» 90 - 170 млн. лет. Имеются данные, что возраст некоторых алмазов сравним с возрастом нашей планеты (Озима, 1990). Месторождения алмазов сосредоточены в пределах древних структур Земли, консолидация которых завершилась 2.5 млрд. лет тому назад. Преобладающее большинство специалистов считают, что алмаз

доставлен на поверхность Земли примерно с глубины 140-280 км. Поэтому мантийный алмаз важен как источник информации о событиях, происходящих на ранних этапах формирования Земли, во-первых, и как источник информации о верхней мантии, во-вторых.

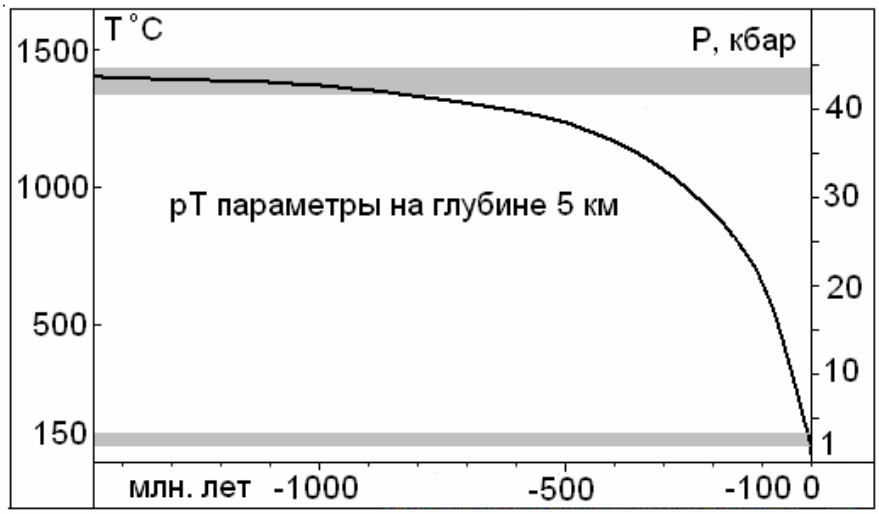


Рис. 19-16. Эволюция *pT* параметров Земли на глубине 5 км. Вверху - выделена зона оптимальных для образования алмазов параметров.

Как известно, для алмаза, где бы он ни был образован, - на Земле или лаборатории, необходимо создание определенных *pT* условий. Давление *p* должно быть не менее 40 кбар, а температура *T*, около 1000 °C. На Земле такие условия существуют в мантии на глубине примерно 100 км, что, как принято считать, однозначно определяет место их "производства". Затем, каким-то способом алмазы "транспортируются" на поверхность Земли, где их обнаруживают в т.н. трубках взрыва - диатремах (Милашев, 1984). Такие трубки напоминают жерла вулканов, что и определило способ их транспортировки - в лаве вулкана. Всё было бы хорошо, но в этой привычной для всех схеме есть небольшой, но неприятный дефект. Дело в том, что при такой транспортировке алмазы из области *pT*-условий устойчивого их существования в мантии обязаны перейти в такую область, где они существовать не могут и где углерод существует только в состоянии графита (см., например, Озима, 1990; Кузнецов, 1992).

Алмазы стабильны на глубине ниже 150 км, а на более высоких горизонтах они становятся неравновесными и переходят в графит, причем, этот переход происходит очень быстро при высоких температурах внутри Земли. Следовательно, если алмазы, образовавшиеся в недрах Земли, будут вследствие мантийной конвекции перенесены на глубину менее 100 км, они разрушатся и превратятся в графит (Озима, 1990).

В *pT* условиях земной поверхности алмазы устойчивы. Заметим, что буквально все алмазы на Земле образовались раньше одного миллиарда лет назад, т.е. на самой "ранней" стадии эволюции Земли. Более того, совсем недавно Соболевым и Шацким было доказано, что алмазы образовались в породах земной коры (Sobolev, Shatsky, 1990). Напомним, что согласно модели горячей расширяющейся Земли, 1 млрд. лет назад *pT*-условия, необходимые для образования алмаза, существовали практически на её поверхности, точнее, на самых малых глубинах земной коры. Продемонстрируем справедливость этого утверждения.

Согласно нашей модели, *pT* параметры на поверхности Земли и в её коре на раннем этапе её эволюции значительно отличались от - современных. Там же показано, что резкое изменение термодинамических характеристик Земли началось примерно 160-200 млн. лет назад, т.е. этот период совпадает с периодом образования трубок взрыва.

Наша модель недостаточно точна для того, чтобы однозначно определить глубину земной коры, на которой величины давлений и температур соответствовали условиям, необходимым для синтеза алмазов. Так же сложно определить период времени эволюции Земли, когда эти параметры были именно такими, какие нужны для синтеза. Базируясь на нашей модели, по-видимому, можно утверждать, что на глубине порядка 5-10 км в земной коре примерно 1 млрд. лет тому назад, *pT* условия вполне могли соответствовать тем, которые необходимы для синтеза алмазов (рис. 19-16). Как следует из модели горячей Земли, примерно 160-200 млн. лет назад началось довольно резкое охлаждение её оболочек, как внутренних, так и внешних. Термодинамическое равновесие оболочек достигалось путем конвективного тепло- и массопереноса в т.н. астеносферных зонах. В тех местах Земли, где конвекции не удавалось развиться, её вещество сохранялось в перегретом и переуплотненном виде. Переуплотнение вещества, как мы отмечали в начале главы, достигается увеличением количества водородных связей. Таким образом, Земле был необходим некий механизм, с помощью которого можно было бы освободиться от тепловой и гравитационной энергии, возникшей в неком объеме, где ранее образовались алмазы. Как мы неоднократно отмечали, Земля располагает несколькими способами "«сброса"» энергии: землетрясения, горные удары, вулканизм, плюмы. Если ни один из этих способов по той или иной причине Земле «не подходил», ей следовало «изобрести» ещё один.

Вполне возможно, что образование трубок взрыва - диатрем, это как раз и есть такой способ, которым Земля «воспользовалась» на одном из этапов своей эволюции. Суть его, в рамках нашей модели, заключается в быстром, взрывном освобождении нагретого до высокой температуры водорода, за счет разрыва водородных связей и выделения теплоты порядка 10 ккал/моль. Экзотермическое выделение энергии (теплоты) связи приводит к ещё большему нагреву водорода. Может развиться тепловой взрыв и дальнейшее истечение горячих газов. Именно такая причина считается Милашевым (1984) как наиболее вероятная для образования диатрем. Явление подобного спонтанного перехода, связанного с разуплотнением, декомпрессией вещества, имеет смысл реологического взрыва (Ярославский, 1982). Он должен отличаться от классического химического или ядерного взрыва, когда имеется взрывчатое вещество (ВВ), а порода дробится и выносится с помощью газов, выделяющихся при детонации ВВ. В нашей ситуации более вероятен случай объемной детонации, наиболее близкий известный аналог которой, например, детонация газообразных ВВ или пыли. Сделаем необходимые оценки.

Стандартная трубка взрыва согласно данным, приведенным в (Милашев, 1984), представляет собой конус. Радиус основания конуса ~ 300 м, глубина ~ 2 км, радиус «острия» конуса ~20 м. Объем типовой диатремы $\approx 2.5 \cdot 10^7$ м^3, а энергия, необходимая для дробления горной породы и выноса её из объема трубки, должна быть не менее $2.5 \cdot 10^{14}$ Дж. Плотность энергии оказывается порядка 10^7 Дж/м^3, или 10^8 эрг/см^3. Если допустить, что разуплотнение вещества в процессе его адиабатического охлаждения порядка самого объема, то “сбрасываемое” в этом процессе давление оказывается порядка 0.1 - 1 кбар. Эта оценка делается таким образом. Предположим, что величина g изменилась на $1/2g$. Давление p на глубине 10 км $\approx$ 2 кбар, следовательно, разуплотнение соответствует изменению p на 1 кбар и меньше. Необходимая плотность водорода n должна быть: $n = p/kT$, где $T = 10^3$ К, а k – постоянная Больцмана, что после подстановки дает: $n = 10^{21} – 10^{22}$ см$^{-3}$. Общее количество атомов Si в см^3 примерно равно 10^{24}, отношение H/Si, по нашей модели, должно быть порядка 10^{-3}, что примерно совпадает с нашими оценками. Если принять энергию водородной связи 10 ккал/моль, то на водород приходится примерно 1/30 часть, или около 1 кДж/г, что примерно в 4 раза меньше чем удельная энергия тротила. По оценке Милашева (1984), для создания типовой трубки взрыва необходимо примерно $2.5 \cdot 10^{14}$ Дж или, в тротиловом (TNT) эквиваленте 10^{11} г TNT. По нашим оценкам, эффективность перегретого вещества диатремы примерно в 4 раза меньше. Примем, что она хуже в 10 раз. Тогда масса ВВ должна быть порядка 10^{12} г, а масса самой

трубки равна $5 \cdot 10^{13}$ г, что в 50 раз больше, чем масса ВВ. Можно сделать вывод, что идея образования объемного взрыва вещества диатремы, выброса материала на поверхность Земли и охлаждение части вещества её недр вполне правдоподобна. По-видимому, имеет смысл учитывать и этот диссипативный механизм, так же как, дрейф материков, землетрясения, вулканизм, образование плюмов и т.п. Заканчивая этот раздел, на вопрос о том, могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли, мы, по-видимому, можем ответить утвердительно.

Литература.

Басин А.С. Основные параметры критической точки металлов с плотноупакованной кристаллической структурой. Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2002. № 10. С. 83-88.

Кузнецов В.В. Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности. Новосибирск: ИГиГ. 1985. 71 с.

Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск: Наука, 1992. 92 с.

Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра. 1984. 268 с.

Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М.: Недра. 1969. 687 с.

Озима М. Глобальная эволюция Земли. М.: Мир. 1990. 164 с

Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходоа. М.: Наука. 1982.

Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Зуев В.М. История алмаза. М.: Недра. 1997. 600 с.

Ярославский М.А. Реологический взрыв. М.: Наука. 1982.193 с.

Sobolev N.V., Shatsky V.C. Diamond inclusion in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation. Nature. 1990. V. 343. P. 742-746.

Глава 2. Вращение Земли.

В главе 2 обсуждаются: вращение Земли (ВЗ), параметры и неравномерность вращения, средства и результаты измерения скорости вращения Земли, скорость ВЗ в прошлом, движение северного географического полюса, супервращение атмосферы и внутреннего ядра. Рассмотрен вопрос, имеющий познавательное значение, - появление в диссипативных системах отрицательной вязкости и теория супервращения.

2. 1. Вращение Земли.

О вращении Земли (ВЗ) известно с тех пор, как Коперник предложил гелиоцентрическую систему, принципиально отличающуюся от системы мира Птолемея. Однако ещё в 123 г. до н.э. Гиппарх нашел, что земная ось перемещается вокруг оси эклиптики, обеспечивая прецессию. Сомнения в постоянстве скорости суточного вращения Земли возникли после открытия Э.Галлеем в 1695 г. векового ускорения движения Луны, а мысль о вековом замедлении вращения Земли под действием приливного трения впервые была высказана И.Кантом в 1755 г. В 1737 г. Дж. Брадлей открыл явление нутации - колебания оси ВЗ, которые накладываются на прецессионное движение. В 1758 г. Л. Эйлер разработал теорию вращения абсолютно твердой Земли вокруг оси главного, полярного момента инерции C, при условии отсутствия моментов внешних сил. Частота эйлеровой прецессии $\omega_E = (C - A)\times r_o/A$, где A - экваториальный момент инерции, r_o - имеет размерность (сутки)$^{-1}$. Период прецессии Эйлера составляет 305 суток. В действительности, Земля не абсолютно твердое, а упругое, деформируемое тело и поэтому в спектре вращения Земли эйлеровой прецессии не наблюдается. В 1892 г. С. Чандлер обнаружил в спектре движения полюса вращения Земли вокруг оси инерции период, равный примерно 428 суток (≈ 14 месяцев). Это 14-месячное колебание названо в его честь чандлеровским периодом, а сами колебания чандлеровскими. Американский астроном С. Ньюком показал, что чандлеровский период, это тот же период Эйлера для упругой Земли.

В настоящее время хорошо известно, что чандлеровский период не остается постоянным во времени - он флуктуирует, отклоняясь от среднего не более ± 4 %. По-видимому, это вызвано вариацией параметров Земли: жесткости, степени сжатия и т.п. Известно также, что период чандлеровского движения и его амплитуда пропорциональны друг другу (коэффициент корреляции 0.88), причем увеличение периода чандлеровских колебаний коррелирует с уменьшением амплитуды этих колебаний (Мельхиор, 1968).

Несмотря на почти вековую историю исследований чандлеровских колебаний, природа их остается загадкой. Так, например, до сих пор по этому поводу высказываются различные, подчас противоположные друг другу, мнения. Л. Мансина и Д.Е. Смайли в 1967 г. выдвинули предположение о том, что чандлеровские колебания возбуждаются при землетрясениях (Стейси, 1972). Ранее, обсуждая эту проблему, У. Манк и Г. Макдональд (1964) такой механизм не считали возможным. Оценки порядков величин изменения моментов инерции, подтверждают неприемлемость этого предложения. По мнению Ф. Стейси (1972), корреляция между землетрясениями и малыми движениями оси вращения представляется парадоксальной. Попытки объяснить природу чандлеровских колебаний атмосферными флуктуациями и магнитосферными вариациями, вызванными изменениями интенсивности потока солнечного ветра, показали, что эти явления на много порядков, меньше момента, необходимого для поддержания чандлеровских колебаний. Стейси предполагает, что существует какой-то механизм возбуждения колебаний, о котором мы совершенно не подозреваем.

Из астрономических наблюдений известно, что в настоящее время ВЗ замедляется за счет приливного трения, увеличивая длину суток примерно на 1.5 мс за 100 лет. Известно, что примерно две тысячи лет тому назад скорость замедления $1/\omega\times d\omega/dt$ была примерно в два раза выше - около 3 мс за 100 лет, или = 4×10^{-22} рад/с^2. Однако такое

замедление ВЗ представляет собой тренд, на фоне которого происходят как сезонные колебания скорости ВЗ порядка $\Delta\omega/\omega \le 10^{-8}$, так и долгопериодные изменения того же порядка. Скорость вращения Земли наименьшая в апреле и ноябре, а наибольшая - в конце января и июле. Принято считать, что главная причина сезонной неравномерности ВЗ, это атмосферная циркуляция. Атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад - дуют западные ветры, а в умеренных и высоких широтах - с запада на восток. Момент импульса восточных ветров отрицателен, а западных - положителен. Сезонная неравномерность состоит в перераспределении моментов импульса, причем, момент импульса восточных ветров в несколько раз меньше момента импульса западных.

Можно обсуждать другие причины сезонной неравномерности вращения, например, астрономическую, когда учитывается перекачка импульса из вращательного движения в поступательное и наоборот. Или изменение скорости вращения за счет сезонной зависимости величины океанических приливов, возмущающих форму Земли наиболее сильно и т.п. (Кузнецов, 1990). Хорошо известна взаимосвязь скорости ВЗ с явлениями Эль-Ниньо. Это явление связано с переменой направления течений в Тихом океане. Наиболее сильное возмущение величины ω за счет этого явления наблюдалось на рубеже 1982-83 г.г.

Изменения $\Delta\omega/\omega$ должны коррелировать с вариацией силы тяжести $\Delta g/g$, однако, до внедрения в практику гравиметрического мониторинга криогенных сверхчувствительных гравиметров, этого обнаружить не удавалось. После постановки таких приборов в некоторые обсерватории, синхронные вариации $\Delta g/g$, в частности, чандлеровский период в гравитационном поле Земли, были зафиксированы.

Поиски корреляции долгопериодных вариаций скорости ВЗ с различными геофизическими явлениями постоянно занимали особое место в работах по физике Земли. В частности, речь шла, например, о связи $\Delta\omega/\omega$ с сейсмичностью Земли. Считалось, что такая связь распространяется на глубокофокусные землетрясения, а неглубокие землетрясения со скоростью вращения не связаны. Многие пытались найти взаимосвязи $\Delta\omega/\omega$ с вариацией магнитного поля Земли, с амплитудой и длительностью чандлеровского периода, с вулканизмом и т.д. Несколько лет тому назад считалось, что такие корреляции вполне достоверны. Однако жизнь показала (в том числе и наши исследования), что значимых корреляций в действительности нет. Все геофизические параметры не имеют простой прямой связи с вариацией величины скорости вращения, хотя утверждать обратное, что на них не оказывает никакого влияния вращение Земли, тоже нельзя.

Вращение Земли – это смена дня и ночи, видимое суточное движение небесных тел, а также некоторые явления, происходящие на поверхности Земли: поворот плоскости качаний груза, подвешенного на нити (маятник Фуко), отклонение падающих тел к востоку и др. Вследствие ВЗ на тела, движущиеся по её поверхности, действует Кориолиса сила; её влияние проявляется в подмывании правых берегов рек в Северном полушарии Земли и левых — в Южном (закон Бэра) и в некоторых особенностях циркуляции атмосферы. Центробежной силой, порождаемой ВЗ, частично объясняются и различия в ускорении силы тяжести на экваторе и полюсах Земли.

Для исследования закономерностей ВЗ вводят (см. рис. 2-1) две системы осей координат с общим началом в центре масс Земли O: одну - движущуюся вместе с Землёй ($X_1Y_1Z_1$), а другую - неподвижную (XYZ). Плоскость XOY неподвижной системы - совмещают с плоскостью эклиптики в начальную эпоху (некоторый момент, принятый за нулевой), а ось OX - направляют в точку весеннего равноденствия этой эпохи. В качестве осей $X_1Y_1Z_1$ движущейся системы удобно брать главные оси инерции Земли, хотя, в зависимости от конкретной задачи исследования, возможен и другой выбор осей. Положение системы $X_1Y_1Z_1$ относительно системы XYZ принято определять тремя эйлеровыми углами: ψ,υ,φ.

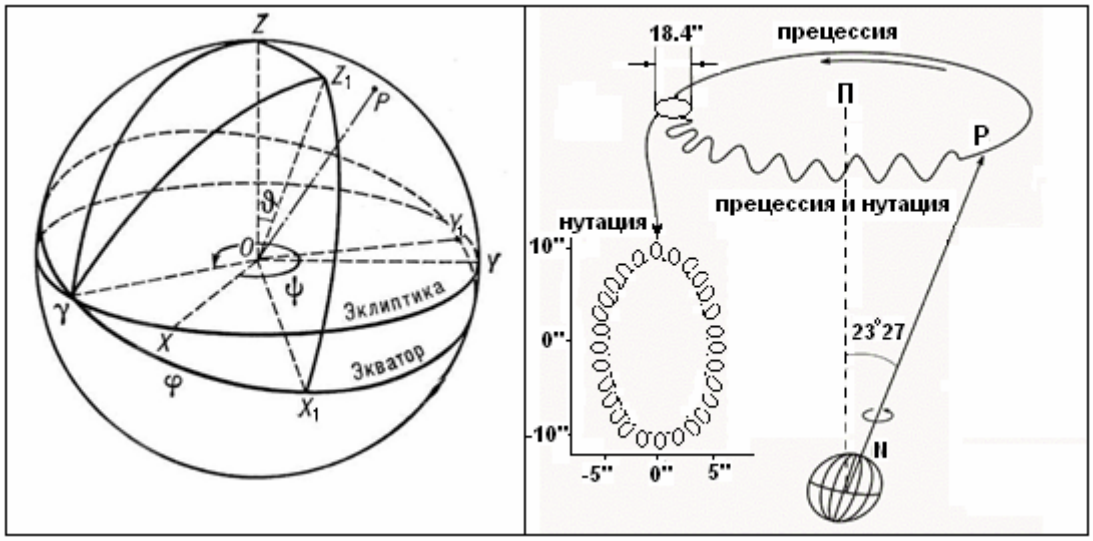


Рис. 2-1. Вращение Земли. Слева: системы координат. Справа: схема движения оси вращения Земли в пространстве с точки зрения земного наблюдателя. Полюс мира Р движется (прецессирует) вокруг полюса эклиптики П с периодом 25 700 лет и кроме того совершает небольшие нутационные движения с периодами от 18.6 года до 4 суток.

Основные сведения о ВЗ получены путем наблюдения суточного движения небесных тел. Из наблюдений установлено, что Земля, по отношению к точке весеннего равноденствия, - совершает один оборот за 1 звёздные сутки (около 23 ч 56 мин 4 сек) среднего солнечного времени. Вращение Земли происходит с запада на восток, т. е. против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса Земли. Ось ВЗ не сохраняет неизменным своего направления в пространстве, она перемещается так, что средний наклон (υ) экватора к эклиптике начальной эпохи почти постоянен (в 1900 он был равен 23° 27′8, 26″ и в течение 20 в. увеличится менее чем на 0,1″). Линия же пересечения экватора Земли и эклиптики начальной эпохи (линия узлов) медленно движется по эклиптике с востока на запад, перемещаясь на 1° 13′ 57,08″ в столетие, вследствие чего угол ψ изменяется на 360° за 25 700 лет. Таким образом, ось *OP* описывает коническую поверхность вокруг перпендикуляра к плоскости эклиптики (прецессия). Кроме этого, ось *OP* совершает в пространстве ряд колебаний с периодами от нескольких суток до 18,6 года (нутация). Относительно оси ВЗ само тело Земли совершает небольшие колебания (движение полюсов). Мгновенная ось вращения *OP* всегда почти совпадает с наименьшей осью эллипсоида инерции Земли *O* L_1: угол между этими осями по наблюдениям, выполненным с конца 19 в., не превосходит 0,4″.

До начала 20 в. считалось, что Земля вращается равномерно, и период её вращения использовался как естественная единица времени. Промежуток времени между двумя последовательными совпадениями оси OX_1 с линией узлов Oγ, в течение которого угол φ возрастает на 360°, был назван звёздными сутками. Вследствие вращения самой линии $O\gamma$ звёздные сутки на 0,0084 сек короче периода ВЗ Однако из точного анализа позиционных наблюдений Солнца, Луны и планет выяснилось, что ВЗ происходит неравномерно и продолжительность звёздных суток меняется. Приливное трение замедляет ВЗ, вследствие чего продолжительность суток постепенно возрастает: за последние 2,5 тыс. лет она увеличивалась в среднем на 0,0024 сек в столетие. Происходят также периодические колебания скорости ВЗ: годовые и полугодовые, связанные с сезонными метеорологическими явлениями; месячные и полумесячные, возникающие из-за приливных деформаций Земли под влиянием притяжения Луны. Вследствие годовых изменений скорости ВЗ продолжительность суток в январе приблизительно на 0,001 сек больше, чем в июле. Обнаружены также «скачкообразные» изменения скорости Вращение

Земли, когда продолжительность суток за 1—3 года уменьшается или возрастает на несколько тысячных долей секунды. Наиболее значительные из них произошли в 1864, 1876, 1898 и 1920. Их причина окончательно не установлена.

2. 2. Параметры вращения Земли.

В астрономии, как и в других науках, единицей времени является секунда международной системы единиц СИ - атомная секунда. Приведём определение секунды, как оно дано 13-й Генеральной конференцией мер и весов в 1967 г.: «секунда - это продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения атома цезия 133, испускаемого им при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния. Если слово "сутки" используется для обозначения единицы времени, оно должно пониматься как 86400 атомных секунд. В астрономии употребляются и более крупные единицы времени: юлианский год - 365.25 суток, юлианское столетие - 36525 суток. Международный астрономический союз (общественная организация астрономов) в 1976 г. рекомендовал астрономам использовать именно такие единицы времени. Основная шкала времени, Международное атомное время (Time Atomic International, TAI), строится на основе показаний множества атомных часов в разных странах. Следовательно, с формальной точки зрения, основа измерения времени ушла из астрономии. Старые единицы "средняя солнечная секунда", "звёздная секунда" не должны использоваться.

Дать определение такому употреблению слова "сутки" несколько сложнее. Причин тому много. Во-первых, ось вращения Земли, или, выражаясь научно, вектор её угловой скорости, не сохраняет постоянного направления в пространстве. Это явление носит название прецессии и нутации. Во-вторых, сама Земля не сохраняет постоянной ориентировки относительно вектора её угловой скорости. Это явление называется движением полюсов. Поэтому радиус-вектор (отрезок от центра Земли до точки на поверхности) наблюдателя на поверхности Земли не вернётся через один оборот (и вообще никогда) к прежнему направлению. В-третьих, скорость вращения Земли, т.е. абсолютная величина вектора угловой скорости, тоже не остаётся постоянной. Так что, строго говоря, определённого периода вращения Земли не существует. Но с определённой степенью точности, несколько миллисекунд, можно говорить о периоде вращения Земли вокруг оси.

Кроме того, надо указать направление, относительно которого мы будем отсчитывать обороты Земли. Таких направлений в астрономии сейчас используется три. Это направление на точку весеннего равноденствия, на Солнце и небесное эфемеридное начало. Период вращения Земли относительно точки весеннего равноденствия называется звёздными сутками. Он равен $23^h\ 56^m\ 04.0905308^s$. Звёздные сутки - это период относительно точки весны, а не звёзд. Точка весеннего равноденствия сама совершает сложное движение на небесной сфере, поэтому это число следует понимать как среднее значение. Вместо этой точки Международный астрономический союз предложил использовать "небесное эфемеридное начало". Оно выбрано так, чтобы период вращения Земли относительно него был близок к периоду относительно инерциальной системы отсчёта, т.е. относительно звёзд или точнее, внегалактических объектов. Угол поворота Земли относительного этого направления называется звёздным углом. Он равен $23^h\ 56^m\ 04.0989036^s$, чуть больше звёздных суток на величину, на которую точка весны смещается на небе из-за прецессии за сутки.

Рассмотрим вращение Земли относительно Солнца. Это самый сложный случай, поскольку Солнце движется на небе не по экватору, а по эклиптике и притом неравномерно. Но эти солнечные сутки, очевидно, и самые важные для людей. Исторически сложилось так, что атомная секунда была подогнана под период вращения Земли относительно Солнца, причём осреднение было сделано приблизительно за 19 век. Этот период равен 86400 единиц времени, которые назывались средними солнечными секундами. Подгонка произошла в два приёма: сначала было введено "эфемеридное

время" и "эфемеридная секунда", а затем атомная секунда была положена равной эфемеридной секунде. Таким образом, атомная секунда всё-таки "происходит от Солнца", но атомные часы в миллион раз точнее, чем "земные часы".

2. 3. Неравномерность вращения Земли.

Период вращения Земли не остаётся постоянным. Причин для этого много. Это и сезонные изменения в распределении температуры и давления воздуха по земному шару, и внутренние процессы, и внешние воздействия. Различают вековое замедление, декадные (в течение десятилетий) неравномерности, сезонные и внезапные. На рис. 2-2 и 2-3 приведены графики, показывающие изменение продолжительности суток в 1700-2000 гг. и в 2000-2006 гг. На рис. 2-2 прослеживается тенденция к увеличению суток, а на рис. 2-3 - сезонная неравномерность. Графики основаны на материалах Международной службы вращения Земли и опорных систем (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS, http://www.iers.org/).

Изучение неравномерности вращения Земли очень важно для практики и интересно с научной точки зрения. Например, спутниковая навигация невозможна без знания вращения Земли. А его особенности несут информацию о внутреннем строении Земли. Эта сложная проблема ждёт своих исследователей.

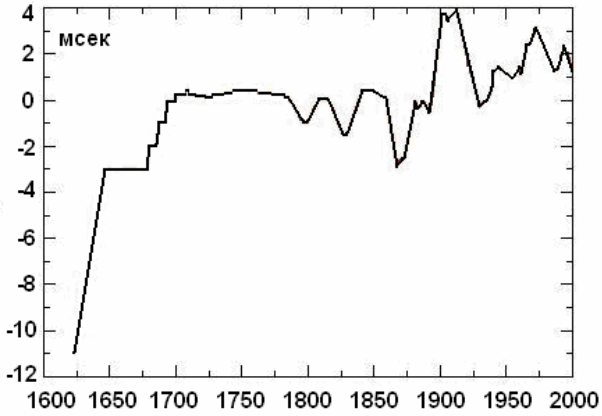


Рис. 2-2. Отличие периода вращения Земли от 86400 с СИ, в миллисекундах. Данные до начала 20 в. не очень надёжны, но тенденция к увеличению продолжительности суток видна отчётливо.

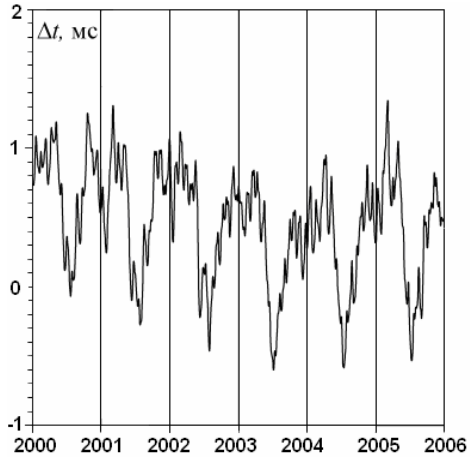


Рис. 2-3. Изменение длительности суток в 2000-2006 гг. График показывает отличие периода вращения Земли от 86400 с (секунд СИ), в миллисекундах. Хорошо видна сезонная неравномерность.

2. 4. Средства и результаты измерения скорости вращения Земли.

Измерение скорости вращения Земли основывается на определении длительности промежутка времени между моментами прямых восхождений звезд. Если бы продолжительность суток была бы неизменной, то в одно и тоже время по кварцевым часам можно было бы фиксировать истинное звездное время. На самом деле прохождения звезд отмечались на 30 мс позже весной и примерно на 20 мс раньше в конце лета. Этот факт свидетельствовал о сезонной вариации длительности суток. Для измерения таких долгопериодных вариаций подходящим стандартом является т.н. эфемеридное время – время, определяемое по движению Луны.

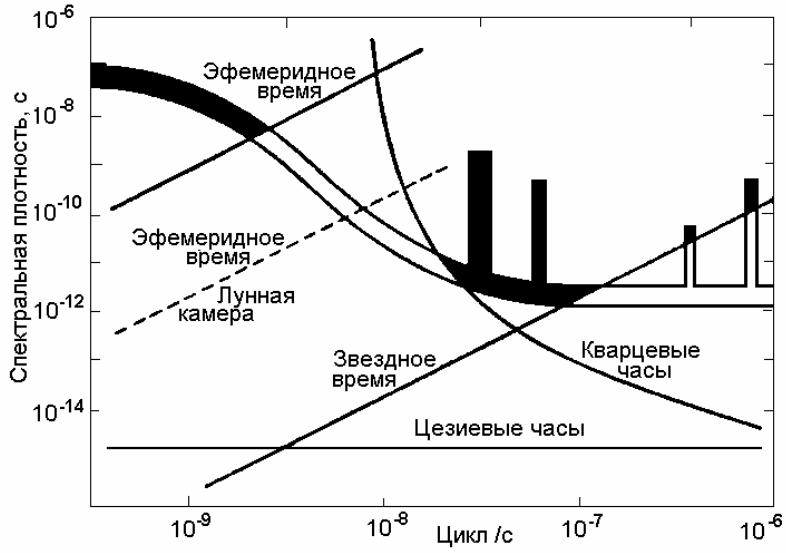
Как следует из (Манк, Макдональд, 1964) к 1930 году точность измерения временных интервалов достигла 0”,02. Начиная с 1950, уточненные годовые двойные амплитуды вариации суток уже составляли 2.6, 1.8 и 2.8 мс. В настоящее время есть основания считать, что эти числа завышены в 2 – 3 раза.

Таким образом, определенная до 1950 г. амплитуда годовой вариации составляла ≈ 1 мс. После 1950 гринвичские наблюдения дали лишь 0.53 мс и эта величина была уменьшена до 0.38 мс после учета поправок каталога FK3.

С точки зрения (Манк, Макдональд, 1964) Земля является геофизической лабораторией, а не хранителем времени. «Ошибок» в её переменной скорости вращения не существует, есть лишь ошибки «отсчетов» по астрономическим наблюдениям. Продолжительность суток определяется путем сравнения с независимым стандартом времени. Точность этого определения зависит как от точности астрономических наблюдений, так и от точности стандарта времени.

Оценим ошибки измерений. Средняя квадратичная ошибка для N ночей равна ε^2/N в предположении о независимости ошибок. Значения звездного времени задаются на интервалах в M суток и каждое значение есть среднее наблюдение за N ночей. Спектр в области частот от 0 до частоты Найквиста $2M\Gamma^{-1}$, где Г – продолжительность суток. Средняя квадратичная ошибка на единичный интервал частот, т.е. спектральная плотность, равна $2M\Gamma\varepsilon^2/N$. Для случая N = M спектральная плотность: $2\Gamma\varepsilon^2 = 2\cdot 86400\cdot (0.005)^2 \approx 5$ с^3.

Это спектральная плотность ошибки времени $\tau(t)$. Спектральная плотность ошибки продолжительности суток равна произведению Г на спектр $d\tau/dt$, спектр ошибки: $(2\pi f)^2\cdot 2\Gamma\varepsilon^2$. В случае годовой частоты $f = 0.32\cdot 10^{-7}$ Гц спектр помех равен $2\cdot 10^{-13}$ с. Эти величины характерны для всех новейших методов.



.Рис. 2-4. Распределение дисперсии на ед. частоты в зависимости от частоты (цикл/с) для четырех основных типов наблюдений. Наблюдаемый спектр изображен широкой лентой с выступами, зачерненной там, где он расположен выше уровня помех.

Первый стандарт, с которым можно было сравнить звездное время, появился с введением эфемеридного времени. Оно базируется на орбитальном движении планет, включая Землю, вокруг Солнца или спутников вокруг своих планет. Луна, это наиболее быстро движущееся по небосводу светило, её небесная долгота меняется на 0.55” в секунду и, следовательно, является наиболее подходящим объектом для определения эфемеридного времени. Для измерения скорости вращения Земли была разработана специальная лунная камера, в которой Луна и окружающие её звезды экспанируется одновременно в течение 20 с. Луна удерживается неподвижной на пластинке среди окружающих её звезд. Если эфемеридное время (положение Луны) может быть отсчитано с невероятной точностью, точность будет ограничиваться ошибкой часов (рис. 2-4).

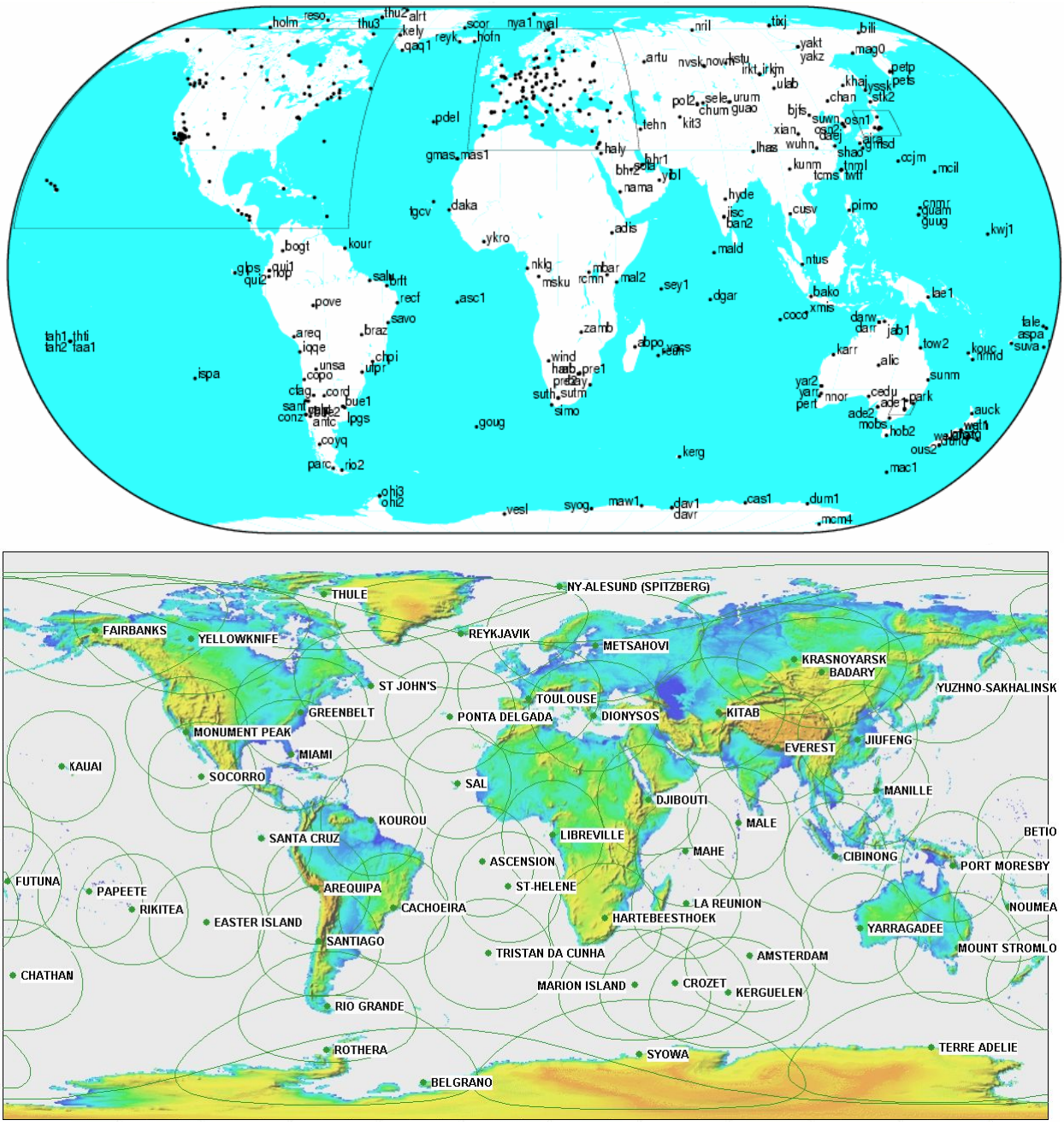


Рис. 2-5. Расположение станций используемых в системах: IGS (вверху), DORIS (внизу).

В последние годы в измерении скорости вращения Земли был достигнут огромный прогресс. Это связано с внедрением новых технологий, таких систем как: VLBI (Very

Long Baseline Interferometry), DORIS (Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite) и IGS (International GPS Service) (рис. 2-5). В таблице 1 приведена информация об этих системах.

Таблица 1.

Technique	Software	Institution	Resolution	Period
SLR	DOGS	DGFI	1 week	11/1992 – 12/2006
SLR	EPOS	GFZ	1 week	10/1992 – 12/2006
VLBI	OCCAM	DGFI	1 day	01/1984 – 12/2006
VLBI	Calc/SOLVE	IGG-B / BKG	1 day	01/1984 – 12/2006
GPS	EPOS	GFZ	1 week	Several months
GPS	Bernese	GFZ	1 day	01/1994 – 12/2006
LEOs	EPOS	GFZ	3 days	01/2004 – 12/2004
Altimetry	DGFI software	DGFI		01/1993 – 12/2005
Combination	DOGS-CS	DGFI	1 day / 1 week	01/1984 – 12/2006
Combination	Bernese	GFZ	1 day / 1 week	01/1984 – 12/2006

SLR – спутниковые лазерные измерения, VLBI – длиннобазовая интерферометрия, LEOs – низкоорбитальные спутниковые измерения.

В качестве примера, на рис. 2-6 приведены данные, полученные за 25 лет наблюдений на системе VLBI. Хорошо выделяются годовые вариации скорости вращения.

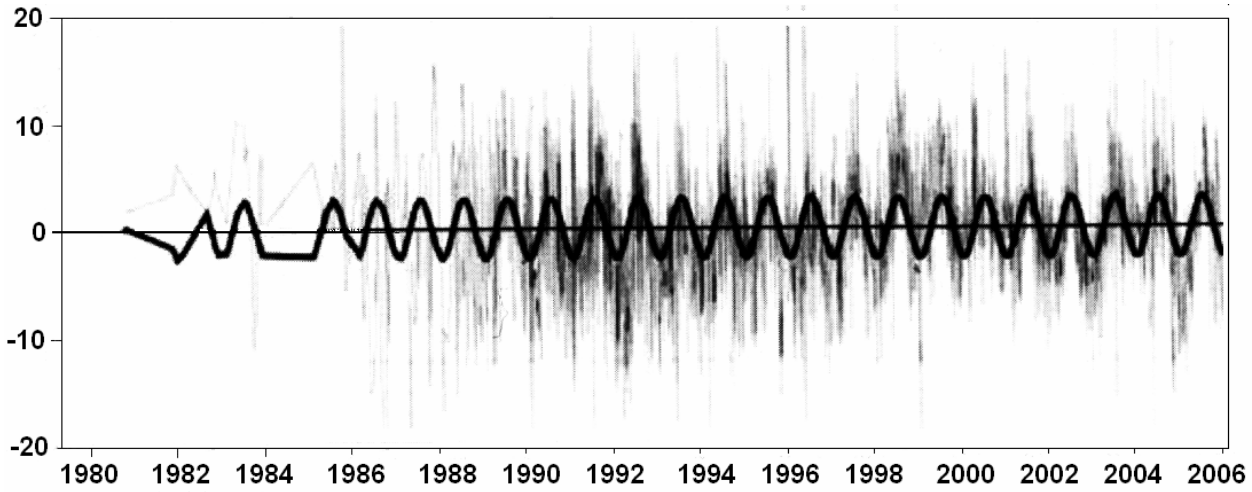


Рис. 2-6. Результаты наблюдений за отклонениями скорости вращения Земли при измерении на системе длиннобазовой радиоинтерферометрии (VLBI).

2. 5. Скорость вращения Земли в прошлом.

Принято считать, что Земля раньше вращалась значительно быстрее, чем сейчас. В доказательство этому, в физике Земли обычно ссылаются на данные по продолжительности года, суток, периода лунных приливов и т.п., по анализу кольцевых наростов и подсчету темно- и светлоокрашенных серий слоев известковых скелетов на срезах ископаемых кораллов, моллюсков и раковин. Чередование различно окрашенных слоев связывается с развитием скелета моллюска и изменением физико-географических условий его обитания и сопоставляется с годовыми кольцами деревьев. По поводу этой методики у специалистов нет ясного и однозначного мнения, насколько достоверны подсчеты колец на срезах древних моллюсков. Литература по этим вопросам очень обширна. Сошлемся на работу В.Н.Сакса с сотрудниками (Козлова и др., 1973), которые считают, что наблюдаемые слои в какой-то мере все же отражают суточные колебания жизнедеятельности животных в течение года, но не все суточные слои или пары слоев видны в разрезе достаточно четко и поддаются подсчету. В качестве аргумента авторы приводят результаты исследования современных коралловых полипов, у которых даже

годовые слои не всегда четко выражены и легко могут быть пропущены. В ещё большей степени это может проявляться в крайне тонких суточных слоях нарастания. Таким образом, к данным, полученным по анализу древних кораллов, моллюсков и пр., следует относиться весьма осторожно. Вероятно, это можно отнести и ко всем другим методам, основанным на расшифровке “каменной летописи” Природы. Грамотно прочесть их - пока проблема.

На рис. 2-7 приведены данные измерений длительности суток, полученные по кораллам (Wells, 1963; Berry and Barker, 1975; Pannela, 1972; Longer.., 1996; Sonett et al., 1996; Zahnle, Walker; 1987). На рисунке изображена зависимость изменения длительности периода T обращения Земли вокруг оси от времени эволюции. Кривая построена по нашей модели. Точки – эксперимент. Последняя точка для 900 млн. лет опубликована в журнале Astronomy (Longer.., 1996). Из рисунка следует, что оценка величины T полученная при подсчете слоев кораллов не противоречит модели. Заметим, что в данном случае мы использовали закон сохранения вращательного момента Земли. Учет влияния Луны должен привести к ещё большему расхождению модели и данных, полученных по кораллам. Дело в том, что обычно полагают, что момент вращательного импульса сохраняется: $0.33MR^2\omega = const$, однако, учет перераспределения вращательного момента Земли с Луной дает:

$$0.33\, MR^2\omega + [M\times m/(M + m)]\times L^2\, \omega_) = const,$$

где m - масса Луны, L - расстояние до Луны, а $\omega_)$ - скорость её вращения. Учет второго члена уравнения приводит к уменьшению длительности периода вращения Земли. Можно ли считать, что выявленное несоответствие модели и данных по кораллам показывает несостоятельность модели горячей Земли? Полагаю, что отвергать модель на этом основании нельзя.

Обратимся к формуле:

$$\varphi = GM/R + G/R^3 \times [(A + B)/2 - C]\, (3/2cos2\theta - S) + \Omega^2R^2/2\, sin\theta,$$

из которой следует, что если в результате эволюции Земли её радиус будет увеличиваться, то скорость вращения должна уменьшаться ($\varphi \approx GM/R + \Omega^2R^2/2$). Соответственно, должна наблюдаться зависимость: $T \sim 1/\Omega \sim R(t)$.

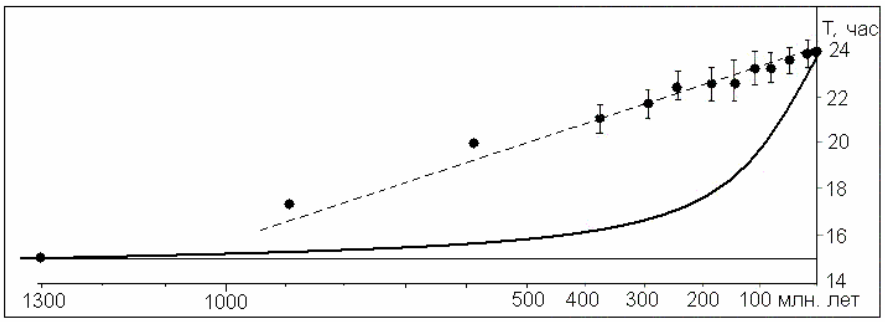


Рис. 2-7. Изменение скорости вращения Земли по модели горячей Земли и данным по кораллам и строматолитам (ссылки в тексте).

Более того, в 2003 г. в средствах массовой информации, в частности, в сети Интернет (Земля замедляет, 2003) и агенства Синьхуа (Xinhuanet, 2003), появилась новая информация о палеовращении Земли. Согласно этой информации (не получившей пока подтверждения в научных публикациях) китайские ученые из Тяньцзиньского института геологии и минеральных ресурсов Zhu Shixing и др., на основе анализа напластований строматолитов, обнаруженных в древних пластах горы Яньшань, показали, что 1.3 млрд. лет тому назад Земля вращалась значительно быстрее, чем сейчас. В сутках ранней Земли было всего 15 часов (см. рис 2-7). Если этот результат подтвердится, будет признан научной общественностью и опубликован в научном журнале, то его можно считать

прямым доказательством правомерности модели горячей Земли. Согласно модели (рис. 2-7) длительность суток в этот период эволюции должна действительно составлять примерно 15 часов. Это соответствует радиусу Земли равному ≈ 4 тыс. км.

Вращение Земли монотонно замедляется. Этот факт никто не подвергает сомнению. Можно ли считать, что скорость замедления всегда была такой, как сейчас? Можно ли предложить какой-либо тест, с помощью которого внести определенность в эту проблему? Оказывается, что такой тест имеется, он состоит в выяснении характера поведения во времени системы Земля - Луна. Известно, что в настоящее время Луна, за счет диссипации энергии вращения океаническими приливами, удаляется от Земли со скоростью 3.3 см/год. Если проследить эволюцию системы Земля - Луна во времени назад, то оказывается, что в прошлом Луна была гораздо ближе к Земле, чем сейчас. При этом, очевидно, предполагается, что и скорость замедления Земли, и скорость удаления Луны, были такими же, как в настоящее время. Линейная экстраполяция полученных оценок в прошлое дает изменение радиуса орбиты Луны L за время 4.5×10^9 лет, равное 1.5×10^5 км, что составляет почти половину современного значения величины L. Тот факт, что амплитуда прилива, а, следовательно, и скорость замедления вращения и скорость удаления Луны пропорциональны $1/L^3$, значительно увеличивает скорость замедления. Так, например, согласно модели Гестенкорна (Стейси, 1972), когда Земля и Луна располагались очень близко друг от друга, на расстояниях, несколько больших предела Роша, орбита Луны была почти полярной. Это происходило примерно 1.78×10^9 лет тому назад. До этого времени Луна должна была двигаться по орбите в направлении противоположном нынешнему. Надо сказать, что перенос в прошлое современной скорости удаления Луны приводит к парадоксальной ситуации (Кузнецов, 1990). Выходом из неё многие считали отказ от такого переноса. В оправдание приводились аргументы относительно того, что современные океаны возникли сравнительно недавно и таких приливов, тормозящих Луну, раньше не было. По-видимому, в этом есть некий здравый смысл. По крайней мере, этот тезис не противоречит нашей модели горячей Земли. Скорее всего, Луна всегда находилась на расстояниях от Земли, если и меньших, чем современное, то не настолько, чтобы “заставлять” её вращаться в противоположную сторону и приближаться к Земле на опасное расстояние порядка предела Роша. Проблема практически снимается, если учесть, что на Земле в более ранние эпохи не было современных океанов, а, следовательно, не было и такого приливного торможения Луны, как сейчас.

2. 6. Дрейф полюса.

Вращение Земли вокруг своей оси испокон веков используется человеком для измерения времени; в астрономии и геодезии это незаменимая основа для введения различных систем координат. Однако вращение Земли недостаточно стабильно: меняется его скорость, движутся географические полюса, происходят нутации (колебания) земной оси. Причинами таких нестабильностей служат как гравитационные воздействия окружающих небесных тел, так и процессы, протекающие на Земле. Будучи отражением этих процессов, нестабильности вращения нашей планеты несут ценную информацию об особенностях строения и физических свойствах земных недр.

Таким образом, изучение неравномерности вращения Земли, движения полюсов и нутаций земной оси имеет большое практическое и научное значение. Оно позволяет исправлять искаженные координаты небесных и земных объектов, способствует расширению и углублению наших знаний в различных областях наук о Земле.

Астрономические наблюдения. В 80-е годы наблюдения в оптические телескопы стали дополняться новыми методами измерений: с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинными базами, лазерной локации спутников и Луны, системы глобального позиционирования (GPS) и т.д. Точность определения Всемирного времени увеличилась

на два порядка. В итоге стало возможным изучать колебания скорости вращения Земли с периодами до суток, а в настоящее время - до нескольких часов. На рис. 2-3 воспроизведен ход отклонений длительности суток в 2000-2003 гг. с дискретностью в одни сутки (по данным Международной службы вращения Земли).

Спектральный анализ. Эффективным инструментом исследования периодических процессов оказался спектральный анализ. Он заключается в том, чтобы, во-первых, представить изучаемые колебания в виде суммы элементарных гармоник, а во-вторых, выявить зависимость средних квадратов амплитуд этих гармоник от их частоты или периода, т.е. найти спектральную функцию или просто спектр. В спектре приливных колебаний скорости вращения Земли выделяются компоненты с периодами: год, полгода, 13.7, 27.3, 9.1 сут, 24, 12, 8, 6 ч. Спектральный анализ всего 350-летнего ряда среднегодовых значений δP дает максимум спектральной плотности на периоде около 70 лет. Колебание с этим периодом особенно заметно проявлялось в последние 150 лет. В начале XX в. амплитуда 70-летнего колебания достигала 2 мс.

Изменяется не только угловая скорость Земли - наша планета качается относительно оси вращения. Поэтому точки, в которых ось пересекает земную поверхность, - мгновенные географические полюса Земли - движутся. Они перемещаются по земной поверхности вокруг среднего многолетнего (за 6 лет) полюса в направлении вращения Земли, т.е. с запада на восток. Траектория движения мгновенного полюса имеет вид спирали, которая периодически то закручивается, то раскручивается. Для примера на рис. 2-8 показана траектория движения Северного полюса за 1996-2007 гг.

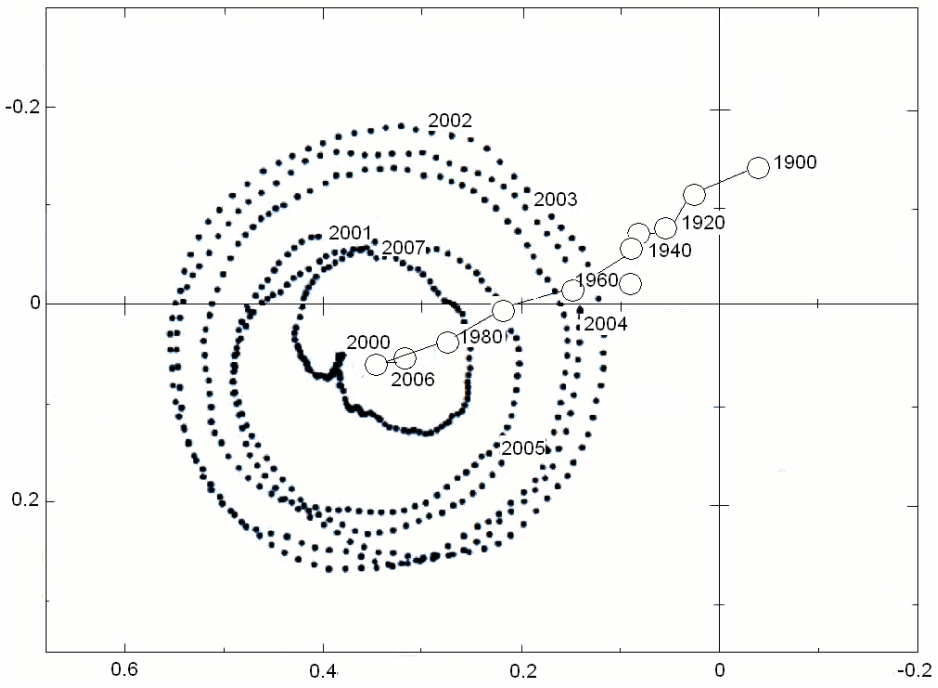


Рис. 2-8. Траектория движения Северного географического полюса в 1996-2007 гг. (цифры в угловых секундах). Кривая - траектория среднего полюса с 1900 по 2006 гг. (по данным Международной службы вращения Земли, 2007).

Самое большое удаление мгновенного полюса от среднего не превышает 15 м. Закручивание и раскручивание траектории мгновенного полюса объясняется тем, что он совершает два периодических движения: свободное, или чандлеровское (названо в честь открывшего его в 1891 г. С. Чандлера), с периодом около 14 месяцев, и вынужденное с

годовым периодом. Чандлеровское движение возникает, когда ось вращения Земли отклоняется от оси ее наибольшего момента инерции. Вынужденное движение вызывается действием на Землю периодических сил со стороны атмосферы и гидросферы, имеющих годовую цикличность. Период свободного движения зависит от динамического сжатия и упругих свойств Земли, а не от периода возбуждающей силы, как это характерно для вынужденного движения. Сложение этих двух периодических движений и дает наблюдаемую картину биений (Сидоренков, 2002).

Анализ координат мгновенного полюса за последние 110 лет показывает, что вынужденное движение происходит вдоль эллипса, - с запада на восток. Величины больших полуосей эллипса колебались в пределах от 3.4 до 2.7 м, малых полуосей - от 2.5 до 1.8 м, эксцентриситетов - от 0.15 до 0.46, а восточные долготы большой полуоси изменялись от 205° до 145° в.д. Чандлеровское движение полюса, по тем же данным, происходит почти по круговой траектории. Оно характеризуется еще большей изменчивостью параметров. Радиус свободного движения имеет амплитудную модуляцию с периодом около 40 лет. Максимальные значения радиуса (9 м) наблюдались около 1915 и 1955 г., а глубокий минимум (2 м) - около 1930 г. Из-за этого в спектрах координат мгновенного полюса возле основного пика на чандлеровской частоте 1/(1.18 г.) имеется боковой пик на частоте 1/(1.24 г.).

На рис. 2-8 видно, что центр спирали находится в стороне от исходной точки - международного условного начала координат. Причина тому - так называемое вековое движение географического полюса. Если из спектра координат мгновенного полюса отфильтровать годовую и чандлеровскую составляющие, можно получить координаты среднего полюса. Оказывается, он тоже смещается. В течение всего периода наблюдений средний полюс двигался по сложной зигзагообразной кривой со скоростью около 10 см в год с преобладающим направлением в сторону Северной Америки (меридиан 290°в.д.).

2. 7. Чем вызваны периодические колебания.

Фигура Земли близка к эллипсоиду вращения. Когда Луна и Солнце не лежат в плоскости земного экватора, их силы притяжения стремятся развернуть Землю так, чтобы экваториальные вздутия фигуры располагались по линии, соединяющей центры масс Земли, Луны и Солнца. Но Земля не поворачивается в этом направлении, а под действием момента пары сил прецессирует (Сидоренков, 1999).

Ось вращения Земли медленно описывает конус вокруг перпендикуляра к плоскости эклиптики (рис. 2-1). Вершина конуса совпадает с центром Земли. Точки равноденствий и солнцестояний движутся по эклиптике навстречу Солнцу, совершая один оборот за 25 700 лет (скорость движения 1° за 72 года).

Моменты сил притяжения, которые действуют на экваториальные вздутия, меняются в зависимости от положений Луны и Солнца по отношению к Земле. Когда Луна и Солнце находятся в плоскости земного экватора, моменты сил исчезают, а когда склонения Луны и Солнца максимальны, то и величина момента наибольшая. Вследствие колебаний моментов сил тяготения наблюдаются нутации оси вращения Земли, которые складываются из ряда небольших периодических колебаний. В теории нутации учитываются в настоящее время свыше 1000 членов. Главнейший из них имеет период 18.6 года - время обращения узлов орбиты Луны. Движение с этим периодом происходит по эллипсу. Большая ось эллипса перпендикулярна направлению прецессионного движения и равна 18.4″; малая параллельна ему и равна 13.7″. Далее по величине амплитуды идут члены с периодом 0.5 г., 13.7 суток, 9.3 г., 1 г., 27.6 суток и т.д. Из-за них траектория имеет вид “тонких кружев” (показано на увеличенном фрагменте в левой части рис. 2-4). Таким образом, ось вращения Земли описывает на небесной сфере сложную волнообразную траекторию, точки которой находятся на угловом расстоянии в среднем около 23°27′ от полюса эклиптики.

Приливные выступы постоянно перемещаются по земной поверхности вслед за Луной и Солнцем - с востока на запад, т.е. в направлении, обратном суточному вращению Земли. Естественно, что при этом в океанах и в теле планеты возникают силы трения, которые тормозят вращение Земли, благодаря чему и происходит ее вековое замедление. По оценкам, сутки должны удлиняться из-за этого на 0.003 с за 100 лет. Таким образом, неравномерности вращения Земли почти не связаны с влиянием приливного трения, а вызываются другими причинами.

Земные приливы играют заметную роль и в колебаниях скорости вращения Земли с периодом менее одного месяца. Приливообразующая сила растягивает Землю вдоль прямой, соединяющей ее центр с центром возмущающего тела - Луны или Солнца. При этом сжатие Земли увеличивается, когда ось растяжения совпадает с плоскостью экватора, и уменьшается, когда ось растяжения отклоняется к тропикам. Момент инерции сжатой Земли больше, чем недеформированной шарообразной планеты. А поскольку момент импульса Земли (т.е. произведение ее момента инерции на угловую скорость) должен оставаться постоянным, то скорость вращения сжатой Земли меньше, чем недеформированной. При движении Луны и системы Земля-Луна постоянно меняются склонения Луны и Солнца и расстояния от Земли до Луны и Солнца. Поэтому приливообразующая сила колеблется во времени. Соответствующим образом меняется сжатие Земли, что в конечном итоге и вызывает приливную неравномерность ее вращения. Наиболее значительны колебания скорости вращения с полумесячным и месячным периодами.

Чем же обусловлены неприливная неравномерность вращения Земли и движение полюсов? В принципе на вращение Земли могут влиять очень многие процессы: изменения в распределении воздушных масс в атмосфере, снежного и ледяного покровов, осадков и растительности на земной поверхности, вариации уровня Мирового океана, взаимодействие ядра и мантии Земли, извержения вулканов, землетрясения, воздействия внешних сил и т.д. Тщательные оценки вклада этих процессов позволили выявить наиболее существенные из них.

В течение года массы воздуха и влаги (воды, снега и льда) перераспределяются между материками и океанами, а также между Северным и Южным полушариями. Так, над Евразией масса воздуха в январе на $6 \cdot 10^{15}$ кг больше, чем в июле. С января по июль из Северного полушария в Южное переносится $4 \cdot 10^{15}$ кг воздуха. В течение всей зимы происходит накопление снега в северных районах Евразии и Северной Америки, весной же снег тает, и влага возвращается в Мировой океан. Все это меняет момент инерции Земли и в какой-то степени сказывается на ее вращении. Оценки показывают, что сезонное перераспределение воздушных и водных масс мало влияет на сезонную неравномерность вращения Земли, но почти полностью обусловливает вынужденное движение географических полюсов с годовым периодом.

Чандлеровское движение полюсов возникает, как мы уже отмечали, когда ось вращения Земли отклоняется от оси наибольшего момента инерции планеты. Однако оно должно со временем затухать, так как энергия свободного движения полюсов преобразуется в тепло. Отсутствие затухания свободного движения полюсов указывает на то, что существуют некие процессы, непрерывно его поддерживающие. К таким процессам относят землетрясения, электромагнитное взаимодействие ядра и мантии Земли, лунно-солнечную прецессию и т.д. Наиболее вероятно, что свободное движение полюсов поддерживается межгодовыми колебаниями системы Земля-океан-атмосфера. Как удалось показать (Сидоренков, 1999), атмосфера, океан и Земля совершают согласованные колебания. Так, квазидвухлетняя цикличность и южная осцилляция атмосферы, явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья в океане, чандлеровское колебание и главная нутация Земли имеют соизмеримые частоты, кратные частоте Чандлера 1/(1.2 г.). Поэтому свободное движение географических полюсов может поддерживаться за счет комбинационных резонансов в системе Земля-океан-атмосфера.

Главная причина сезонной неравномерности вращения Земли - это атмосферная циркуляция. Известно, что в среднем атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад (дуют восточные ветры), а в умеренных и высоких - с запада на восток (преобладают западные ветры). Момент импульса восточных ветров отрицателен, а западных - положителен. Можно было бы думать, что эти моменты компенсируют друг друга и момент импульса ветров всей атмосферы всегда равен нулю. Однако расчеты показывают, что у восточных ветров данная величина в несколько раз меньше, - чем у западных. Поэтому момент импульса ветров всей атмосферы не равен нулю, а составляет в среднем за год $+14 \cdot 10^{25}$ кг·м^2·с$^{-1}$. Его величина меняется в течение года от $+16.1 \cdot 10^{25}$ кг·м^2·с$^{-1}$ в апреле и ноябре до $+10.9 \cdot 10^{25}$ кг·м^2·с$^{-1}$ в августе.

Момент импульса - это физическая величина, которая не может возникать или уничтожаться. Она способна лишь перераспределяться. В рассматриваемом случае перераспределение происходит между атмосферой и твердой Землей. Когда момент импульса атмосферы увеличивается, т.е. усиливаются западные ветры или ослабевают восточные, момент импульса тела Земли снижается, т.е. замедляется ее вращение. Когда же момент импульса атмосферы уменьшается (ослабевают западные или усиливаются восточные ветры), вращение Земли ускоряется. Суммарный момент импульсов Земли и атмосферы всегда остается неизменным, может служить хорошей иллюстрацией справедливости закона сохранения момента импульса не только в лабораторных экспериментах, но и в глобальных масштабах. Явление ускорения вращения атмосферы относительно твердой Земли получило название сверхвращения. Как будет показано ниже, это явление обнаружено на других планетах, Особенно сильно оно проявляется на Венере (Taylor, 2002). Сверхвращение обнаружено и при вращении ядра Земли. Некоторые авторы полагают, что основная причина супервращения – действие приливов (Добролюбов, 2005).

2. 8. Супервращение.

Супервращение на Венере. Венера полностью охвачена толстым слоем облаков, причем верхняя их часть состоит из капелек серной кислоты и некоторого пока неизвестного аэрозоля. Верхний слой облаков испытывает сильное ретроградное вращение (супервращение), но причины ответственные за такие проявления природы Венеры пока неизвестны. Эти данные были получены при наблюдениях за Венерой с помощью Venus Monitoring Camera с борта Venus Express. Ученые, исследуя глобальные и менее масштабные облачные структуры, их временные и широтные изменения, получают скорость ветра. Южная полярная область является очень переменной и может претерпевать масштабные драматические изменения, причинами которых возможно являются выбросы SO_2 в мезосферу. Конвективные ячейки, ограниченные верхним слоем облаков, в близких к Солнцу уровнях оказались намного меньшими по размеру, чем это предполагалось ранее.

Орбитальный аппарат Venus Express обеспечил возможность просмотра геометрии нижних уровней Южного полюса и получил обзоры крупного плана с высоким разрешением Северного полушария. Рисунок показывает глобальные виды Южного полушария, полученные в ультрафиолетовом диапазоне с помощью Venus Monitoring Camera (VMC) на расстоянии в 40 000 — 60 000 км. Яркая средняя область отделяет более темные нижние широты от полярных областей, в которых глобальные облачные образования спирально закручиваются к полюсу. Полярный вихрь, первоначально обнаруженный в тепловом инфракрасном диапазоне, теперь замечен VMC в виде темной овальной особенности в ультрафиолетовом диапазоне. Облачная высокоширотная структура очень напоминает структуру земных ураганов, но на Венере полярный вихрь превосходит его земные аналоги в 3 — 4 раза. В более низких широтах облачная

морфология «пятнистая», что указывает на энергетическую конвекцию (передача энергии путем перемешивания в больших объемах).

11 апреля 2006, космический корабль Venus Express был выведен на малую полярную орбиту вокруг Венеры с 24 часовым периодом. Миссия предназначалась для глобального исследования атмосферы Венеры большим набором инструментов, включая VMC, которая является широкоугольной цифровой камерой, предназначенной для исследования морфологии облаков и динамики видимых слоев. VMC может получать изображение в четырех спектрах излучения, Уф диапазон (365 нм), видимый диапазон (513 нм), почти инфракрасный диапазон (965 и 1010 нм) с пространственным разрешением от 50 до 200 км на пиксель. Ультрафиолетовый диапазон сосредоточен на изучении неизвестного УФ поглотителя, для которого предназначены максимальные наблюдения. Это изображение показывает Венеру в ультрафиолетовом диапазоне. Южный полюс расположился на линии терминатора в нижней части обзора. Супервращение происходит против часовой стрелки.

Супервращение внутреннего ядра Земли. Идея, согласно которой твердое внутреннее ядро вращается немного быстрее чем мантия и вся Земля в целом (эффект т.н. супервращения внутреннего ядра), не нова. Приливное торможение, наиболее эффективное в верхних оболочках Земли, и наличие жидкого внешнего ядра, определяют принципиальную возможность этого явления Гипотеза дифференциального вращения вещества внешнего, железного ядра, находящегося в расплавленном состоянии, использовалась ранее при построении модели генерации геомагнитного поля на механизме динамо и попытке объяснения такого явления в геомагнетизме, как западный дрейф. Совсем недавно к идее супервращения внутреннего ядра обратились сейсмологи, обнаружившие при использовании метода travel time, что анизотропия свойств поверхностного слоя внутреннего ядра изменяется со временем, что можно объяснить прокручиванием ядра относительно мантии. Применение для этой цели данных по расщеплению (splitting) спектров собственных колебаний Земли во внешнем ядре и их возможному изменению во времени, факта супервращения внутреннего ядра не подтвердило.

Лабораторное моделирование супервращения внутреннего ядра. Влияние приливов на супервращение внутреннего ядра изучалось в серии лабораторных экспериментов, проведенных в институте горного дела СО РАН, в Новосибирске. Авторы этих работ (Бобряков и др., 1991; Ревуженко, 1991) изучили механизмы приливного деформирования сыпучих и жидких вязких сред на установке, моделирующей приливные эффекты. Как известно, приливные силы стремятся растянуть космическое тело в направлении силы тяготения и сжать его в ортогональных направлениях. При этом космическое тело вращается вокруг собственной оси. Приливные силы моделировались на лабораторной установке путем создания системы сложного нагружения пластических тел (рис. П4-4). Такие эффекты достигались путем растяжения тела с постоянной скоростью в одном направлении и одновременного сжатия с такой же скоростью в ортогональном направлении. Исследуемое тело проворачивается относительно направления растяжения-сжатия с частотой Ω.

Для вязкой, однородной и несжимаемой среды, в пренебрежении инерционными силами, в плоском случае течение (скорость смещения частиц среды) описывается уравнениями:

$$dx/dt = -y + \lambda(-x^3 - 3xy^2 + 3x) - \Omega y; \quad dy/dt = x + \lambda(y^3 - 3x^2y - 3y) + \Omega x.$$

Здесь: $\lambda = \rho\Gamma R^2/8\mu\Omega$, параметр $\Gamma = G/MD^3$, где G - гравитационная постоянная, M – масса тела, вызывающего прилив, D – расстояние до её центра, μ - вязкость среды, R – масштаб длины. Приливные силы невелики ($\lambda << 1$) и поэтому решение можно разложить по этому малому параметру. Показано, что две частицы среды, из выбранных соседних,

обращаются вокруг центра системы по замкнутым траекториям. В пределах одного оборота различие в их полярных углах возрастает на величину порядка λ и затем уменьшается до величины $\approx \lambda^2$. Это говорит о том, что в системе с приливным переносом массы осуществляется дифференциальное вращение. Если в формуле для λ принять высоту прилива λR порядка 0.5 м, то для тела с параметрами Земли и Луны, вызывающей прилив, величина вязкости оказывается порядка 10^{16} Пз.

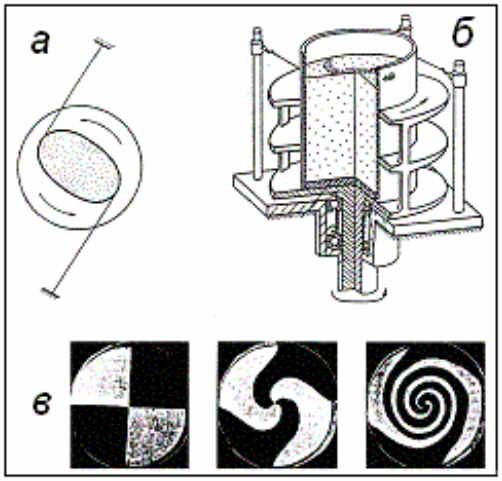


Рис. 2-9. Кинематическая схема (*а*), общий вид стенда для моделирования приливной волны (*б*) (Бобряков и др. 1991). Результаты лабораторных опытов по приливному переносу масс с сухим песком: – раскраска песка до начала вращения, – последовательные фигуры поверхности песка, показывающие характер нарастания деформаций (*в*) (Ревуженко, 1991).

Эффект дифференциального вращения демонстрирует экспериментальный результат, полученный на лабораторной установке (Ревуженко, 1991)с сухим песком (рис. 2-9-в). Песок предварительно, до начала вращения, окрашен в два цвета. На двух следующих фигурах показан характер нарастания деформаций. Автор утверждает, что аналогичная картина дифференциального вращения наблюдается и в экспериментах с вязкими жидкостями. Общим выводом из лабораторного моделирования приливного переноса масс следует, что, по мере приближения к оси вращения системы от её деформированной «приливом» стенки, круговая скорость вращения частиц среды, - только увеличивается. Трудно представить себе, как в такой системе могут возникнуть предпосылки для западного дрейфа, когда часть ядра должна вращаться медленнее, чем мантия? Однако, как будет показано ниже, такие идеи так же высказывались.

Супервращение по данным travel time экспериментов. В некоторых моделях Земли принято считать, что внутреннее ядро окружено жидким внешним ядром очень низкой вязкости (Gans, 1972; Poirier, 1988) и поэтому оно может легко вращаться относительно мантии. Идея, согласно которой твердое внутреннее ядро может вращаться со скоростью, отличной от суточного вращения мантии и коры, была предложена более десяти лет назад (Steenbeck, Helmis, 1975; Gubbins, 1981; Szeto, Smylie, 1984). Эта возможность подтверждена недавним численным моделированием динамо Земли (Glatzmaier, Roberts, 1995-a,-b), которое предполагает, что вращение внутреннего ядра происходит на несколько градусов в год быстрее, чем вращается кора и мантия. Такое быстрое вращение должно отразиться на прохождении PKP (DF) волн, пока ось вращения отличается от оси анизотропии. Кроме того, должна наблюдаться взаимосвязь анизотропии внутреннего ядра с систематическими изменениями, связанными с вращением внутреннего ядра (Song, 1997).

Song и Richard (1996) первыми сообщили о факте дифференциального вращения внутреннего ядра. Они изучали сейсмические волны от землетрясений, которые распространяются через внутреннее ядро и регистрируются на стационарных сейсмостанциях в течение нескольких лет. Ими были исследованы две полярных траектории (от землетрясений, произошедших на Южных Сандвичевых островах и зарегистрированных на Аляске, и землетрясений, произошедших на острове Кермадек и фиксируемых на островах Норвегии) и одна экваториальная траектория (землетрясения в желобе Тонга и их запись на островах Германии). Наблюдались систематические изменения времени прихода сигнала для двух полярных траекторий, но таких изменений не было обнаружено на экваториальной траектории. Различие во временах распространения между полярной трассой и экваториальной трассой зависит от угла ориентации сейсмического луча и показывает, как изменяется направление анизотропии от вращения внутреннего ядра. Сейсмограммы, зарегистрированные на сейсмостанции College (Аляска) от землетрясений, которые произошли в Южных Сандвичевых островах с 1967 по 1995, являются первыми свидетельствами эффекта супервращения ядра (Song, Richards, 1996). Эта трасса изучалась в предыдущих работах (Creager, 1992; Song, Helmberger, 1993) в связи с анизотропией внутреннего ядра. Разность времен распространения волн по трассам PKP (DF) во внутреннем ядре, и трассам PKP (BC) - во внешнем ядре (рис. 2-10-а) прогрессивно увеличивается со средней годовой скоростью приблизительно 0.3 секунды в течение последних 28 лет. При этом предполагается, что ось анизотропии внутреннего ядра перемещалась все ближе и ближе к трассе “Сандвичевы острова – Аляска”. Изменение превышает в 2-5 раз среднеквадратичные отклонения времени распространения, оцененные по 5-летним усреднениям, и представляет сдвиг фазы более 90° для короткопериодных волн с доминирующими периодами меньше одной секунды. Принимая, что внутреннее ядро вращается относительно оси вращения Земли, авторы (Song, Richards, 1996) получили, что скорость его вращения в восточном направлении составляет примерно 1° в год.

Наиболее важные источники ошибок, как показано в работе (Song, Richards, 1996), представляют собой случаи изменения местоположения источника. Например, изменение положения очага землетрясения на 50 км на трассе источник - станция может изменить DC - DF время на 0.3 секунды. Таким образом, наблюдаемые временные изменения могли потенциально быть артефактом при использовании различных глобальных сетей, т.к. землетрясения в различные годы происходили в различных местах. Однако, строгая настройка местоположений землетрясений показывает, что действительно наблюдается систематическое изменение travel time для траекторий от Южных Сандвичевых Островов до Аляски (Song, Richards, 1996).

Дифференциальное вращение внутреннего ядра рядом авторов динамо моделей генерации геомагнитного поля связывается с электромагнитным сцеплением границы внутреннего ядра (Gubbins, 1981; Glatzmaier, Roberts, 1995-a; Glatzmaier, Roberts (GR), 1996; Aurnou et al., 1996; Bloxham, Kuang (BK), 1996). Вращение внутреннего ядра приводит к появлению зонального потока в жидком внешнем ядре, который через силовые линии магнитного поля связан с хорошо проводящим внутренним ядром. По GR-модели динамо, из-за супервращения внутреннего ядра со скоростью на 2°-3° в год быстрее, чем мантия, в жидком ядре возникает сильный зональный поток в восточном направлении (образуется тороидальне магнитное поле). По BK-динамо модели генерация поля происходит аналогично GB-модели во внешней части ядра, но очень различается для его внутренней части. Получается, что сильное тороидальное поле отсутствует около границы внутреннего ядра и внутреннее ядро может вращаться или в восточном направлении или в западном, но более медленно, чем мантия. Надо сказать, что в настоящее время очень трудно (даже невозможно) отдать предпочтение какой-либо из моделей динамо и выбрать, какая из них обеспечивает лучшее приближение к реальной Земле. Ясно, что

дифференциальное вращение внутреннего ядра обеспечивает возможность появления важной и уникальной причины для моделирования динамо.

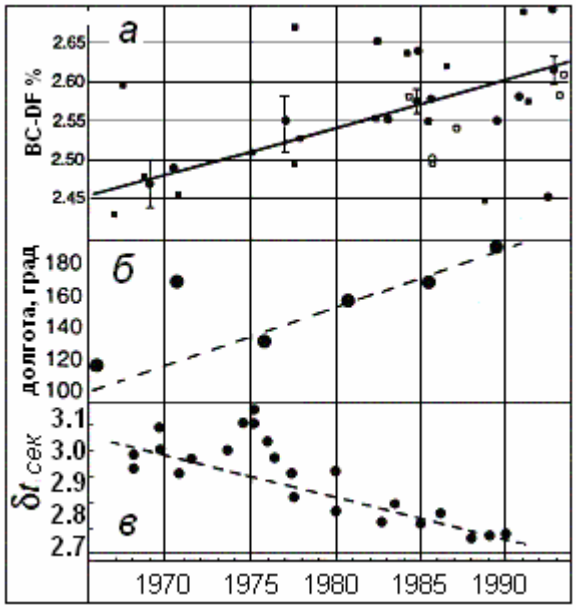


Рис. 2-10. Изменение относительно времени (BC-DF) в % (Creager, 1997) - *а*; вариация долготы цилиндрической анизотропии внутреннего ядра в град. (Su, et al., 1996) - *б*; изменение времени прихода волны от ядерных взрывов (Овчинников и др. 1998) – *в*.

Попыткам подтвердить факт вращения внутреннего ядра, используя сейсмические данные, были посвящены работы (Glatzmaier, Roberts, 1995-a; Glatzmaier, Roberts, 1996; Aurnou et al., 1996; Bloxham, Kuang, 1996). Вскоре после Song и Richards (1996), авторы (Su, Dziewonski, Jeanloz, 1996) сообщили, что данные по времени распространения волн по трассе PKP (DF), полученные из Международного Сейсмологического Центра (ISC), могут использоваться для локации местоположения оси анизотропии. Для этого 30-летний набор данных по регистрации супервращения внутреннего ядра делился на шесть 5-летних циклов. Оценки положения оптимальной оси показали сложный характер временных изменений в промежуток времени около 1970 года, когда магнитное поле подвергалось «джерку» (внезапному изменению его интенсивности) (Courtillot, et al., 1978). Средняя скорость вращения внутреннего ядра в восточном направлении за период 1964 - 1992 в (Su, Dziewonski, Jeanloz, 1996) была оценена в 3° в год. Скорость супервращения ядра полученная в (Su, et al., 1996) оказалась значительно выше, чем скорость, оцененная в (Song, Richards, 1996) и скорость, которую принимали в своих моделях динамо Glatzmaier и Roberts (1995-a, 1995-b) и Aurnou и др. (1996). Все эти авторы утверждают, что внутреннее ядро вращается быстрее в восточном направлении. Song и Richards (1996) наблюдали изменение разности времен прохождения в 0.3 секунды, что значительно ниже величины разброса (среднеквадратичные отклонения равны примерно 1-3 секунды) времени распространения сейсмических волн, оцененных по данным ISC-бюллетеней, а также ниже оценок ошибок усреднения. Song (1997) полагает, что к подобным оценкам следует относиться весьма осторожно и, более того, он вообще ставит под сомнение результаты наблюдений супервращения ядра. В подтверждение он приводит такие аргументы. Неравномерное распределение сейсмостанций образуется из-за роста глобальной сети в течение времени наблюдений за изменением анизотропии внутреннего ядра (25 – 30 лет). Неравномерное распределение землетрясений связано с изменением глобальной сейсмичности, которое используется для того, чтобы оценить анизотропию внутреннего ядра в разное время. Всё это может приводить к тому, что при

сравнении фактически используются различные участки мантии и внутреннего ядра. Следовательно, изменения оси симметрии анизотропии могли оказаться результатом различного осуществления выборки и вовсе не связаны с дифференциальным вращением внутреннего ядра.

Подобную точку зрения разделяют авторы (Souriau et al., 1997), которые показывают, что на основании ставших теперь доступными данных, наклон оси анизотропии не может быть надежно обнаружен. Они утверждают, что имеется очевидная корреляция между данными по travel-time, полученными на основе модели супервращения внутреннего ядра, и величинами сейсмических событий. Эта корреляция, которая могла быть следствием метода анализа данных и зависеть от их полосы частот изменения, может частично смещать данные наблюдений. Эти результаты не исключают возможности внутреннего основного дифференциального вращения, но они подвергают сомнению, было ли оно фактически обнаружено. Souriau (1998) полагает, что в настоящее время дифференциальное вращение внутреннего ядра еще твердо не установлено. Однако, даже если завтра окажется, что эти результаты не совсем верны, они представляют важный шаг для науки о внутреннем строении Земли только потому, что они уже вызвали захватывающие дискуссии в геомагнетизме, сейсмологии и геодинамике.

Исследование временной зависимости анизотропии проводилось не только с использованием землетрясений в качестве источников сейсмических волн, о которых шла речь выше, но и с применением ядерных взрывов (Овчинников и др. 1998).

Оценка соответствия величины вязкости η и $\Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)$. Воспользуемся результатом работы (Денисов, Новиков, 1998). Обозначим I_1 и I_2 моменты инерции мантии и внутреннего ядра, а ω_1 и ω_2 - их угловые скорости. Запишем уравнения вращательного движения мантии и твердого внутреннего ядра:

$$I_1\, d\omega_1/dt = h(\omega_2 - \omega_1) - M,$$
$$I_2\, d\omega_2/dt = -h(\omega_2 - \omega_1).$$

Здесь M – момент сил, обусловленный приливным взаимодействием в системе Земля-Луна и приводящим к увеличению продолжительности суток на 1.7 мс за 100 лет, а: $h(\omega_2 - \omega_1)$ – момент сил трения, обусловленный наличием жидкого внешнего ядра. Вывод об опережающем вращении твердого внутреннего ядра является очевидным следствием, вытекающим из этих уравнений.

Комбинируя эти уравнения, авторы получают:

$$d(\omega_2 - \omega_1)/dt = -h(1/I_1 + 1/I_2)(\omega_2 - \omega_1) + M/I_1.$$

Учитывая, что M мало меняется с изменением угловой скорости вращения, можно принять движение ядра относительно мантии установившимся, т.е. $d\omega_2/dt = d\omega_1/dt$, и в результате:

$$h(\omega_2 - \omega_1) = MI_2/(I_1 + I_2) \approx I_2 M/C,$$

где C – осевой момент инерции Земли. Для вращающейся жидкости, обладающей коэффициентом вязкости η и заполняющей зазор между двумя вращающимися сферами, имеем:

$$h = 8\pi R_1^3 R_2^3 \eta/(R_1^3 - R_2^3),$$

где R_1 – радиус внутреннего ядра, а R_2 – радиус внешнего.

Полученные соотношения позволяют выразить разность $(\omega_2 - \omega_1)$ через вязкость вещества внешнего ядра, т.к. остальные параметры – константы:

$$(\omega_2 - \omega_1) \approx M/8\pi C \times 2m_2/5R_2 \times 1/\eta.$$

Подставляя известные значения величин: $M/C = 2\pi/T^2 \times 1.7\ 10^{-3}$ с/100 лет (T – период вращения Земли); m_2 – масса внутреннего ядра, получаем относительную скорость вращения внутреннего ядра $(\omega_2 - \omega_1)$ в единицах °/год, если вязкость η выразить в Па·с:

$$(\omega_2 - \omega_1) \approx 10^3/\eta.$$

Отсюда следует, что для оценок вязкости вещества внешнего ядра «по минимуму», $\eta \approx 10^5$ Па·с (реально, по-видимому, больше), величина (ω_2 - ω_1) оказывается на два-три порядка меньше, чем та, которая могла бы следовать из оценок по вековым вариациям геомагнитного поля и результатам наблюдений по вариации времени распространения P-волн на границе внутреннего ядра.

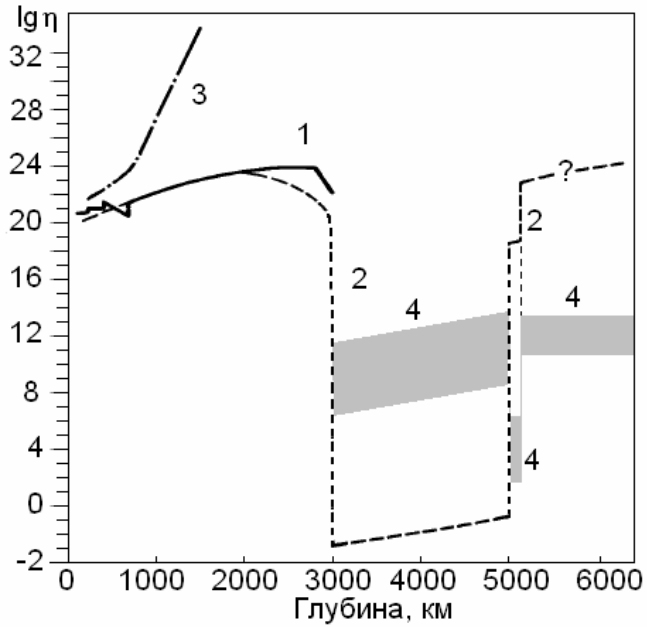


Рис. 2-11. Распределение вязкости в Земле: 1 - по модели Ранелли-Фишера при адиабатическом распределении температуры в мантии; 2 - принятое распределение; 3 - распределение в молодой Земле (до начала ее дифференциации); 4 – по данным сейсмологии (Денисов, Новиков, 1998; Бурмин, 2008).

Аналогичный результат был получен в работе (Bills, 1999), где так же оценивалась величина вязкости вещества внешнего ядра. В работе (Bills, 1999) автор учитывает эти эффекты и оценивает величину вязкости вещества внешнего ядра. Вращающие моменты взаимодействуют непосредственно с мантией Земли, и стремятся к тому, чтобы прекратить вращение. Вязкость внешнего ядра является эффективным средством передачи вращения внутреннему ядру. Автор полагает, что экмановский масштаб времени для диссипации переходных движений жидкости, связанных с неустойчивыми вращающими моментами - намного короче, чем масштаб времени для регулирования скорости вращения внутреннего ядра и мантии в устойчивом режиме потока Куэтта. Поэтому наличие в системе устойчивого приливно-отливного вращающего момента, приложенного к мантии, способствует вращению внутреннего ядра чуть быстрее относительно мантии. Увеличение скорости вращения пропорционально эффективной вязкости внешнего ядра и величины её вращающего момента. Проведенная автором оценка скорости супервращения внутреннего ядра относительно мантии определяет её величину примерно в 1 градус в год, что соответствует эффективной вязкости внешнего ядра 10^3 Па·с. Автор показывает, что возможное влияние ледниковых циклов в приливно-отливных вращающих моментах несколько усложняют эту картину, но не изменяет порядка величин оценок вязкости. Дифференциальная скорость вращения изменяет величину вязкости примерно в 2 раза на каждом 100 тысячелетнем ледниковом цикле. Приливно-отливное напряжение сдвига может также вносить вклад в развитие анизотропии во внутреннем ядре.

Супервращение по анализу splitting функций. Несмотря на весьма строгие оценки связи величины вязкости и скорости дифференциального вращения внутреннего ядра Земли, принято считать, что оно было реально обнаружено при изучении особенностей

распространения объёмных сейсмических волн. Полученные результаты указывают, что внутреннее ядро вращается со скоростью 0.2° - 3° в год быстрее, чем земная кора и мантия. Широкий разброс в полученных значениях скорости вращения, по всей видимости, был вызван чувствительностью изучаемых волн к локальным (временным и пространственным) неоднородностям структуры внутреннего ядра. С другой стороны, собственные колебания, splitting-функции, являются нечувствительными к локальной структуре, и поэтому имеется возможность оценить величину дифференциального вращения ядра более точно. Результаты предыдущих исследований собственных колебаний можно считать сомнительными из-за относительно низкого качества длиннопериодических цифровых данных, доступных 20 лет назад. Для того чтобы получить наиболее точную информацию о дифференциальном вращении ядра, авторы (Laske, Masters, 1999) использовали метод анализа свободных колебаний, который является нечувствительным к источнику, т.е. местоположению и механизму землетрясения. Авторы пришли к выводу, что дифференциального вращения внутреннего ядра, с величиной скорости ~ ± 0.2 °/год, не наблюдается вовсе. Авторы полагают, что внутреннее ядро, по всей видимости, гравитационно «заперто» мантией Земли. Этот результат иллюстрирует рис. 2-12, на котором приведены скорости вращения внутреннего ядра, полученные для девяти мод, чувствительных к особенностям строения во внутреннем ядре. На рисунке так же показана средняя скорость вращения в диапазоне 0.01 ± 0.21 ° в год, полученная путем усреднения данных по всем модам. Пунктирные линии отмечают полосы ошибок среднего числа, две вертикальные линии показывают скорости супервращения, найденных при недавнем изучении объемных волн. Данные Laske и Masters показывают, что есть некоторые основания утверждать, что супервращение ядра со скоростью 0.3° в год в принципе, - возможно, однако супервращение 1° в год - противоречит всем полученным данным.

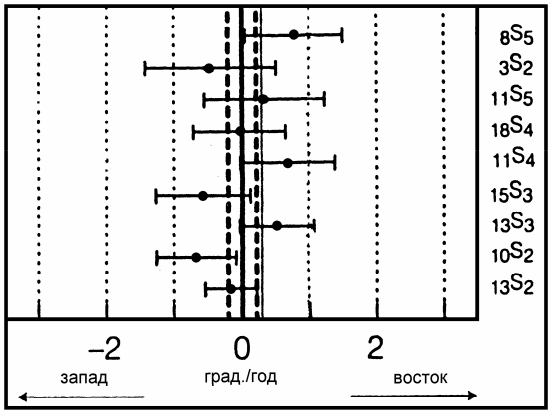


Рис. 2-12. Скорость супервращения ядра (± °/год) по данным splitting функций (Laske, Masters, 1999).

Авторы полагают, что используемый ими анализ, это лучший способ определить существование супервращения внутреннего ядра. Во-первых, потому, что они имеют дело с крупномасштабными вариациями, которые нечувствительны к ошибкам в выборе положения источника и к локальной структуре внутреннего ядра. Во-вторых, метод независим от механизма землетрясения. В-третьих, авторов не беспокоит причина, вызывающая расщепление собственных колебаний (т.е. причина, вызывающая splitting функции), т.е. неважно вызваны они гетерогенностью или анизотропией. Важно только, изменяются ли они со временем. Полученные авторами результаты допускают весьма незначительные скорости диференциального вращения, однако они же показывают, что

внутреннее ядро не вращается с заметной скоростью относительно мантии. Это соответствует предположению, что внутреннее ядро гравитационно заперто мантией.

Эта работа вызвала резонанс. Так, например, Dahlen (1999) считает выводы авторов относительно отсутствия супервращения внутреннего ядра, вполне обоснованными. С другой стороны, категоричным выводам Laske и Masters (1999) предшествовали ряд работ. Например, за три года до этого момента авторы (Romanowich et al., 1996) полагали, что данные по расщеплению собственных колебаний Земли и различиям во временах распространения объемных волн, дают ограничения на величину анизотропии внутреннего ядра Земли. Применение формализма, который позволяет отличить отклонения от радиальной симметрии и результатов по цилиндрической анизотропии в моделях с распределением скоростей распространения Р-волн, несовместимо с "замороженной " анизотропией, а скорее предполагает режим крупномасштабной конвекции во внутреннем ядре.

Анализируя результаты сейсмологических данных относительно супервращения внутреннего ядра и дифференциального вращения ядра внешнего, можно заключить, что это явление, при величинах относительных скоростей порядка единиц градусов в год, - весьма сомнительно. Однако временная зависимость анизотропии внутреннего ядра, возможно, существует, и, учитывая то обстоятельство, что она “привязанна” к поверхности внутреннего ядра, нельзя считать невозможным здесь, - наличие гидродинамического переноса. Он, вероятнее всего, происходит в пограничной области фазового перехода, т. е. в F слое.

Литература

Бобряков А.П., Ревуженко А.Ф., Шемякин Е.И. Приливное торможение планет: опыт экспериментального моделирования. Геотектоника. 1991. № 6. С. 21-35.

Бурмин В.Ю. Вязкость земного ядра по сейсмическим данным. ДАН Т. 418. № 6. С. 825-828. 2008.

Денисов Г.Г., Новиков В.В. Об оценке вязкости жидкого ядра Земли. ДАН. 1998. Т. 362. № 4. С. 484-485.

Добролюбов А.И. Волновой перенос вещества. М.: Ком Книга. 2005. 256 с.

Земля замедляет свое вращение. 2003. URL: http://www.webphysics.ru/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=14

Козлова Л.Е., Киприкова Е.Л., Найдин Д.П., Сакс В.Н. О природе концентрической слоистости в рострах белемнитов. Геология и геофизика. 1973. № 9. С. 38-49.

Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. М.: Мир. 1964. 384 с.

Овчинников В.М., Адушкин В.В, Ан В.А. О скорости относительного вращения внутреннего ядра Земли. ДАН 1998. Т. 362. № 5. С. 683-686.

Ревуженко А.Ф. О приливном механизме переноса масс. Физика Земли. 1991. № 6. С. 13-20.

Сидоренков Н.С. Межгодовые колебания системы атмосфера-океан-Земля // Природа. 1999. №7. С.26-34.

Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М., 2002.

Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир. 1972. 342 с.

Aurnou J. M., Brito D., Olson P. L. Mechanics of inner core super-rotation. Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 3401-3404.

Berry W.B.N., Barker R.M. Growth increments in fossil and modern bivalves. Growth Rhythus and the History of the Earth’s Rotation. Ed. S.K.Rosenberg. London. John Wiley and Sons. 1975. P. 9-25.

Bills B.G. Tidal despinning of the mantle, inner core superrotation, and outer core effective viscosity. J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 2653-2666.
Bloxham J., Kuang W. The inner core and the geodynamo (abstract). Eos Trans. AGU. 1996. V. 77. P. F42.
Creager K.C. Anisotropy of the inner core from differential travel of the phases PKP and PKIKP. Nature. 1992. V. 356. P. 309-314.
Creager K.C. Inner core rotation rate from small-scale heterogeneity and time-varying travel times. Science. 1997. V. 278. P. 1284-1288.
Dahlen F.A. Latest spin on the core. Nature. 1999. V. 402. P. 26-27.
Gans R. F. Viscosity of the Earth's core. J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 360-366.
Glatzmaier G. A., Roberts P. H. A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle. Phys. Earth Planet. Inter. 1995-a. V. 91. P. 63-75.
GlatzmaierG.A., Roberts P.H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. Nature. 1995-b. V. 377. P. 203-209.
Glatzmaier G. A., Roberts P. H. Rotation and magnetism of Earth's inner core. Science. 1996. V. 274. P. 1887-1891.
Gubbins D. Rotation of the inner core. J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 11695-11699.
Laske G., Masters G. Limits on differential rotation of the inner core from an analysis of the Earth's free oscillations. Nature. 1999. V. 402. P. 66-69.
Longer days ahead. Astronomy. 1996. V. 24. N. 10. P. 28.
Pannella G. Paleontological evidence on the Earth's rotational history since Early Precambrian, Astrophysics and Space Science. 1972. V. 16. P. 212-237.
Poirier J. P. Transport-properties of liquid-metals and viscosity of the Earth's core. Geophys. J. 1988. V. 92. P. 99-105.
Romanowich B., Li X.D., Durec J. Anisotropy in the inner core: Could it be due to low-order convection? Science. 274. 964-966. 1996.
Sonett C.P., Kvale E.P., Zakharian A., Chan M.A., Demko T.M. Late Proterozoic and Paleozoic tides, retreat of the Moon, and rotation of the Earth. Science 1996. V. 273. P. 100-4.
Song X. D. Anisotropy of Earth's inner core. Rev. Geophys. 1997. V. 35. P. 297-313.
Song X., Helmberger D.V. Anisotropy of Earth's inner core. Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. N. 23. P. 2591-2594.
Song X. D., Richards P. G. Observational evidence for differential rotation of the Earth's inner core. Nature**.** 1996. V. 382. P. 221-224.
Souriau A., Roudil P., Moynot B. Inner core differential rotation: Facts and artefacts. Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. P. 2103-2106.
Souriau A. Earth's inner core - is the rotation real? Science. 1998. V. 281. P. 55-56.
Steenbeck M., Helmis G. Rotation of the Earth's solid core as a possible cause of declination, drift and reversals of the Earth's magnetic field. Geophys. J. R. Astron. Soc. 1975. V. 41. P. 237-244.
Szeto A. M. K., Smylie D. E. The rotation of the Earth's inner core. Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A. 1984. V. 313. P. 171-184.
Su W. J., Dziewonski A. M., Jeanloz R. Planet within a planet – Rotation of the inner core of Earth. Science. 1996. V. 274. P. 1883-1887.
Taylor F.W. Venus: Atmosphere. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics. Hampshire. Bristol. 2002.
Wells J.W. Coral growth and geochronometry. Nature 1963. V. 197. P. 948-950.
Xinhuanet. Algae fossil betrays time secret of 1.3 billion years ago. 2003-07-07. http://www.china.org.cn/english/scitech/69268.htm
Zahnle K., Walker J.C. A constant daylength during the Precambrian era? Precambrian Res. 1987. V. 37. P. 95-105.

Глава 20. Атмосферное электричество.

В главе 20 дается общее представление об атмосферном электрическом поле Земли (E_z), о способах его измерения и аппаратуре, об особенностях поведения E_z и его унитарной вариации (кривая Карнеги), об унитарной вариации ионосферы, о других электрических явлениях в атмосфере: тета (Θ) авроре, молниях, спрайтах и шаровой молнии. В заключительной части главы приведен обзор известных моделей атмосферного электричества.

Предложена новая модель атмосферного электрического поля (АЭП), согласно которой образование АЭП (E_Z) происходит за счет разделения электрических зарядов в атмосфере «хорошей погоды», а не за счет грозовых разрядов, как это обычно принято. Электрические заряды образуются за счет ионизации воздуха галактическими космическими лучами (ГКЛ). Максимум поглощения ГКЛ приходится на высоту тропопаузы, где влажность воздуха и его температура очень стабильны. Здесь образуются легкие положительные ионы, поднимающиеся к ионосфере и отрицательные водные аэрозоли, опускающиеся за счет силы тяжести – на Землю. Решающую роль в формировании АЭП, кроме ГКЛ, - играют также процессы конденсации и испарения паров воды. Рассмотрены такие вопросы как: поле E_Z и температура поверхности Земли, поле E_Z и грозы, унитарная вариация E_Z, АЭП и геомагнитные бури, обсуждение электрической нейтральности Земли и других небесных тел.

20. 1. Атмосферное электрическое поле.

О существовании электрического поля в атмосфере Земли известно давно, известно так же то, что полярность Земли, в отсутствие грозовых облаков, всегда отрицательна, т.е. её поверхность несет на себе довольно значительный отрицательный заряд, в то время как верхний слой атмосферы электросфера (ионосфера) - заряжена относительно Земли положительно. Электрическое поле атмосферы всегда вертикально, т.е. направлено вдоль *Z*-компоненты от ионосферы к Земле - E_Z. АЭП уменьшается летом и возрастает зимой, ночью поле больше его дневного значения; АЭП увеличивается в горах, но, в целом, уменьшается с высотой и т.п. Электрическое поле обладает уникальной особенностью, которую необходимо выделить среди других. Большинство авторов считают её само собой разумеющейся. Речь идет о том, что величина E_Z практически постоянна для различных регионов Земли и в различное время года E_Z = 130 В/м. Факты, о которых речь шла выше: уменьшение величины E_Z летом и днем, и т.п., только подчеркивают эту особенность атмосферного электричества. Любая модель атмосферного электричества будет вызывать сомнение, если она не сможет найти логичное объяснение этому факту. Попытки объяснить это свойство каждодневным равенством количества электрических разрядов молний не выдерживают критики. Многолетние наблюдения за распределением гроз по поверхности Земли, говорят совсем об обратном: количество гроз (а, значит, и разрядов молний) и их расположение на Земле, меняется день ото дня, причём, иногда - на порядок.

Исследования явлений атмосферного электричества были начаты Франклином, Далибаром, Ломоносовым и Рихтером в середине 18 века. Основное внимание было сосредоточено на изучении молний и гроз: эти явления природы, естественно, привлекали внимание многих ученых. Эффекты влияния грозовых облаков на атмосферное электричество хорошо изучены (Wilson, 1920; Chalmers, 1967; Hays, Roble, 1979; Tinsley, 2000). Общепринято, что грозовые облака и разряды молний являются единственным, по крайней мере, - основным, источником атмосферного электричества. Ломоносов и Лемонье практически одновременно и независимо друг от друга обнаружили, что электрические явления в атмосфере происходят и в отсутствие грозовых облаков. С начала 20 века интерес к изучению молний и гроз сильно уменьшился. Основное

внимание исследователей было сосредоточено на изучении электрического поля хорошей погоды (Имянитов, Шифрин, 1962).

В 20-х годах прошлого века Симпсон, Маучли и Свердруп обнаружили так называемую унитарную вариацию (кривая Карнеги) атмосферного электрического поля E_Z, т.е. синхронные изменения напряженности поля величины E_Z, - в целом по Земле (ссылки в: Имянитов, Шифрин, 1962). Вильсон высказал предположение, что унитарная вариация E вызвана грозами, которые приводят к заряжению Земли и высоких слоев атмосферы, зарядами разных знаков (Wilson, 1920). Эти идеи были развиты Уипплом и Скрейзом, которые предположили, что суточный ход поля подобен суточному ходу площади поверхности материков Земли, занятой грозами. Эта модель объяснения унитарной (UT) вариации АЭП признана до сих пор. Принято считать, что все проявления атмосферного электричества, такие как унитарная вариация, корреляции его с галактическими космическими лучами (ГКЛ) и метеоусловиями, связаны с электрическим полем «хорошей погоды».

Таким образом, возникло представление о том, что электричество ясных дней связано с грозовой деятельностью облаков, т.е. с тем фактором, который в исследованиях поля «хорошей погоды» исключался как аномальный. Надо сказать, что на этот очевидный парадокс мало кто обращает внимание, тем не менее, именно нелепость этой ситуации послужила основанием для разработки новой модели атмосферного электричества и его унитарной вариации, суть которой изложена в настоящей статье.

На континентах, где согласно общепринятой модели происходит генерация АЭП за счет разряда молний, UT вообще не наблюдалась. Это обстоятельство связывалось с тем, что возможной причиной её отсутствия могли быть, например, влияние хорошей проводимости поверхности Земли (т.н. электродный эффект), либо наличие горизонтальных неоднородностей земной поверхности, либо - неравномерное распределение электрических зарядов по высоте и т.п. Возникла ситуация, при которой наблюдаемые противоречия полностью заслонили ясность представления о природе атмосферного электричества. Один из основателей исследований в области атмосферного электричества Х. Израэль в 1939 г. отметил, что выход из создавшегося тупика можно найти, перестроив способы регистрации величины E, проведя непрерывные наземные измерения в течение, по крайней мере, 50 лет.

За время, прошедшее с тех пор, в мире созданы приборы и организована сеть наземных станций (которая в России, к настоящему моменту, практически прекратила существование). Несмотря на некоторый прогресс в техническом плане, проблема АЭП в понимании физики этого явления, по большому счету, далеко не продвинулась. Изучение атмосферного электричества показало взаимосвязь его с другими, в частности, атмосферными процессами. Так, например, В.И. Герасименко (1976) приводит высказывание знаменитого английского физика Томсона (Лорда Кельвина) о том, что в будущем предсказание погоды будет осуществляться посредством электрометра. Это будущее еще не наступило, но предвидению классика (как будет следовать из нашей модели взаимосвязи атмосферы и электричества), нельзя не удивляться. Известны многие другие, не всегда явные и далеко не всегда ясные взаимосвязи электрического поля с такими геофизическими параметрами как сейсмичность, вулканизм, явления в ионосфере и магнитосфере и пр. Наиболее явно и сравнительно недавно выявлена связь атмосферного электричества с интенсивностью ГКЛ (Tinsley, 2000). В этой работе показано, что величина E убывает практически сразу после эффекта Форбуша в ГКЛ и постепенно восстанавливается до прежнего уровня в течение нескольких дней. Идея, касающаяся роли космических частиц в генерации АЭП не нова. Надо сказать, что G.G.Simpson (Швейдлер, 1936) ещё в 1904 г до открытия космических лучей (1912) высказал мысль о возможности проникновения на Землю заряженных частичек, которые

обеспечивали бы Земле приток заряда в атмосферу (эквивалентную, при их вертикальном падении заряженных частиц, слою ртути толщиной 76 см).

В середине прошлого века проблема атмосферного электричества была очень популярна среди физиков. Именно в то время были сделаны фундаментальные работы и, в частности, вышли в свет известные книги П.Н.Тверского (1949) и Я.И.Френкеля (1949). Казалось, что проблема атмосферного электричества вот-вот будет решена, однако, надежды так и не оправдались. Ни в России, ни за рубежом, не нашлось автора, который сумел бы убедить коллег в том, что его модель наиболее адекватна явлениям атмосферного электричества. В последнее время интерес к этой проблеме значительно уменьшился, книг и статей по атмосферному электричеству встречается всё меньше и меньше, и поэтому имеет смысл, напомнить некоторые идеи и наиболее достоверные экспериментальные факты, имеющие отношение к обсуждаемой теме. Заметим, что отсутствие интереса к атмосферному электричеству, происходит на фоне настоящего бума, связанного с недавно обнаруженными явлениями образования светящихся электрических разрядов между верхней частью грозового облака и ионосферой, получивших название спрайтов и синих струй (sprite, blue jet). Шаровая молния, несомненно, имеющая непосредственное отношение к атмосферному электричеству, - до сих пор возбуждает интерес исследователей. Возможно, ключом к пониманию физики таких феноменов как, шаровая молния, спрайты, унитарная вариация и прочие явления, присущие атмосферному электричеству, может быть генерация некоторой общей физически непротиворечивой идеи, охватывающей все стороны явления с единой позиции.

Большинство исследователей сходятся во мнении, что атмосферное электричество взаимосвязано с разделением электрических зарядов в грозовом облаке. Принято считать, что возникновение электрических зарядов в атмосфере может быть обязано одному из трех источников, возможно так же их сочетание. К ним относятся: ГКЛ и солнечные космические лучи (СКЛ), естественные радиоактивные источники почвы (радон, ^{40}К, радионуклиды ториевого и уранового рядов) и возникновение зарядов за счет фазовых переходов в воде (Качурин, Бекряев, 1960). По-видимому, это правильное предположение. В дальнейшем, при построении модели атмосферного электричества, будем использовать все известные идеи. Принципиально новым моментом нашей модели является то, что электрическое поле может возникнуть не только за счет грозовых разрядов, как это принято в подавляющем большинстве моделей, а за счет разделения зарядов в атмосфере «хорошей погоды». По-видимому, под это определение попадают и те облачные дни, в течение которых наблюдаются все особенности АЭП. В такой ситуации мы избегаем парадокса, о котором шла речь выше: свойства АЭП получены в ситуации «хорошей погоды», в то время как источником поля являются грозы, что «хорошей погодой» считать не принято. Отметим, что в ряде работ принимается идея о генерации АЭП в «мировом центре грозовой активности», якобы размещающемся в Африке. Это предположение возникло 100 лет назад, когда проверить его не было возможности. С появлением контроля погоды со спутников, и создания международной сети контроля гроз (http://flash.ess.washington.edu/), стало очевидно, что это предположение ошибочно. Тем не менее, и в наше время появляются модели АЭП, ориентированные на существование этого гипотетического «мирового центра».

Атмосферное электрическое поле. Основные формулы. Атмосферное электрическое поле можно определить в любой его точке, зная его потенциал V, величина которого обусловлена суммой всех электрических зарядов на Земле и в атмосфере. Каждая точка пространства обладает вполне определенным потенциалом. Соединение всех точек, обладающих одним значением потенциала, приводит к построению т.н. уровенной, изопотенциальной поверхности. Эти поверхности, в силу свойств, присущих потенциалу,

не могут ни пересекаться, ни касаться друг с друга. Беря производную от потенциала по нормали (n), получаем напряженность поля $E = \partial V/\partial n$. У земной поверхности, считая её проводником, напряженность поля:

$$E = \partial V/\partial n = 4\pi\sigma, \qquad (20.1)$$

где σ – поверхностная плотность заряда Земли в данной точке.

Выражение (1) играет важную роль в формировании атмосферного электрического поля, т.к. в приземном слое, за счет имеющихся вблизи земной поверхности повышенной концентрации объемных зарядов, величина E резко возрастает. Это явление в атмосферном электричестве получило название электродный эффект.

При наличии в атмосфере объемных зарядов с плотностью ρ, должно выполняться соотношение Пуассона: $\partial^2 V/\partial x^2 + \partial^2 V/\partial y^2 + \partial^2 V/\partial z^2 = -4\pi\rho$.

Рассматривая только одну координату поля x, заменяя x на h, и полагая $\partial^2 V/\partial y^2 + \partial^2 V/\partial z^2 = 0$, градиент электрического поля:

$$E = -dV/dh, \ \partial^2 V/\partial h^2 = -4\pi\rho. \qquad (20.2)$$

Наблюдения за величиной E, проведенные у земной поверхности, дают в среднем для градиента потенциала значение порядка 130 В/м. Это позволяет вычислить величину поверхностной плотности заряда Земли (1): $\sigma \approx 7\cdot10^5$ элементарных зарядов/см^2. Общий заряд Земли $Q = 5.7\cdot10^5$ кулон. Общий потенциал положительно заряженной ионосферы относительно отрицательной Земли $U = 300$ кВ, плотность тока в «конденсаторе» Земля-ионосфера $j = 10^{-12}$ А/м^2. Полное сопротивление атмосферы $R \approx 230$ Ом. Сопротивление R можно представить как параллельное соединение цепочек сопротивлений между Землей и ионосферой, расположенных равномерно по поверхности Земли, соединенных между собой сопротивлениями в точках, между которыми возможно возникновение горизонтального E и возможны горизонтальные перетоки электрического заряда, как, например, в облаках или ионосфере. В таких цепочках включены источники напряжения, которые создают необходимый потенциал на обкладках сферического конденсатора. В качестве такого генератора принято считать грозы.

Глобальная атмосферно-электрическая цепь определяет в атмосфере баланс электрических токов, условия поддержания электрического поля, а также структуру электрических полей и токов. Данные многолетних измерений электрических характеристик атмосферы вблизи поверхности Земли указывают на существование электрического поля напряженностью порядка 10^2 В/м и электрического тока плотностью порядка 10^{-12} А/м^2. Эти параметры определяются в так называемых условиях хорошей погоды, т. е. при отсутствии в данном районе Земли облаков, ветров, метелей. Измерения электрического поля «хорошей погоды» вблизи земной поверхности позволяют оценить некоторый эффективный заряд Земли, который составляет 10^5 К. Поскольку атмосфера Земли обладает электропроводностью, то при отсутствии источников электрического поля электрическое поле в атмосфере исчезает примерно за 10 мин. Согласно современным представлениям, основным источником электрического поля в тропосфере и стратосфере являются грозовые облака. Грозовые облака действуют как токовые генераторы. Возможно, что грозовые облака не единственные генераторы, поддерживающие электрическое поле атмосферы. Не до конца выяснена роль генераторов, действующих в верхних слоях атмосферы (ионосферы и магнитосферы), облаков слоистых форм, конвективного токового генератора, действующего в пограничном слое атмосферы. Отметим, что в областях существования грозовых облаков текут токи, заряжающие атмосферу, в областях, свободных от грозовых облаков, текут токи разрядки.

Основные уравнения, описывающие глобальную токовую цепь, имеют следующий вид:

$$rotE = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}, rotH = j + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t},$$
$$divE = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, divH = 0, \frac{\partial \rho}{\partial t} + divj = 0, \qquad (20.3)$$

где E - напряженность электрического поля, H - напряженность магнитного поля, ρ - плотность электрического заряда, j — плотность электрического тока, ε_0, μ_0 - диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума.

В условиях $T >> L\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}, T >> 2\pi\mu_0 \lambda L^2$ (T - характерный временной масштаб, L - характерный пространственный масштаб задачи) система уравнений сводится к следующей системе:

$$rotE = 0, divE = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \frac{\partial \rho}{\partial t} + divj = 0. \qquad (20.4)$$

Отметим, что эта система фактически описывает все электрические процессы в нижних слоях атмосферы, исключая только быстропеременные процессы, протекающие при молниевых разрядах. Последнее уравнение для плотности электрического заряда есть следствие уравнения для rot H, если от него взять операцию div. Выражение для плотности электрического тока записывается в следующем виде:

$$j = \lambda E + \rho v + D_T \nabla \rho + \sum_S j_S, \qquad (20.5)$$

где v – гидродинамическая скорость движения среды, D_T - коэффициент турбулентной диффузии, js — плотность электрического тока, создаваемая i-м источником.
Последний член, входящий в выражение, описывает источники тока в атмосфере, которыми, в частности, являются грозы. Второй и третий члены существенны в по-пограничном слое атмосферы.

Если выполнено условие $T >> \varepsilon_0/\lambda = \tau_\lambda$, то в этом случае током смещения $\varepsilon_0 \partial E / \partial t$ можно пренебречь и система уравнений превращается в стационарную:

$$divj = \text{O}, \; rotE = 0, \; divE = \rho/\varepsilon_0 .$$

Важную роль в исследовании электрических процессов в атмосфере играет ее электропроводящие свойства. Ионный состав атмосферы в нижнем слое довольно сложен. Имеется целый спектр ионов, которые представляют собой комплексы молекул, несущих заряд, равный элементарному заряду (заряд электрона e). Атмосферные ионы различаются химической природой входящих в них молекул, коэффициентом диффузии, подвижностью ($b\pm$). Можно выделить примерно пять групп ионов в зависимости от их подвижности и радиуса:
- легкие (малые) ионы ($b\pm \geq 10^{-4}$ м^2/(сВ), $r < 6{,}6 \cdot 10^{-8}$ см);
- легкие промежуточные ионы (10^{-6} м^2/(сВ) $\leq b\pm \leq 10^{-4}$ м^2/(сВ), $6{,}6 \cdot 10^{-8}$ см $\leq r \leq 810^{-8}$ см);
- тяжелые (большие) промежуточные ионы (10^{-7} м^2/(сВ) $\leq b\pm \leq 10^{-6}$ м^2/(сВ), $8 \cdot 10^{-8}$ см $\leq r \leq 2{,}5 \cdot 10^{-6}$ см);
- ионы Ланжевена ($2{,}5 \cdot 10^{-8}$ м^2/(с.В) $\leq b\pm \leq 10^7$м^2/(сВ), $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ см $\leq r \leq 5{,}7 \cdot 10^{-6}$ см);

$$\lambda = \sum_i (e_{i+} b_{i+} n_{i+} + e_{i-} b_{i-} n_{i-}) = \lambda_+ + \lambda_-,$$

Ультра тяжелые ионы ($b\pm < 2{,}5\text{-}10^{-3}$ м^2/(сВ), $r > 5{,}7\ 10^{-7}$ см).

Электропроводность атмосферы λ при известном ионном составе определяется выражением

$$\lambda = \sum_i (e_{i+} b_{i+} n_{i+} + e_{i-} b_{i-} n_{i-}) = \lambda_+ + \lambda_-, \qquad (20.6)$$

где i означает суммирование по группам ионов, λ_+, λ_- - полярные электропроводности.

Согласно современным представлениям, основной вклад в электропроводность нижних слоев атмосферы вносят легкие ионы. Электропроводность в этой части земной атмосферы формируется под влиянием радиоактивного излучения поверхности Земли, радиоактивных примесей, содержащихся в воздухе, космического излучения. По мере удаления от земной поверхности она растет и ее зависимость от высоты
может быть представлена в виде:

$$\lambda = \lambda_0 \exp \alpha \left(r - r_0 \right), \qquad (20.7)$$

где r_0 — радиус Земли, α^{-1} = 6,4 км.

Это представление не единственно. В ряде случаев до высоты примерно 40 км электропроводность λ может быть представлена в следующем виде:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 \exp\left(\dfrac{r - r_0}{0.82} \right), 0 < r - r_0 < 3.6км, \\ \lambda_1 \exp\left(\dfrac{r - r_0}{4.1} \right), 3.6км < r - r_0 < 17.7км \\ \lambda_2 \exp\left(\dfrac{r - r_0}{7.0} \right), 17.7км < r - r_0 < 40км, \end{cases} \qquad (20.8)$$

где $\lambda_1 = \lambda\ (3.6)$, $\lambda_2 = \lambda\ (17.7)$.

Кроме высотных изменений λ в атмосфере наблюдаются широтные изменения, связанные с зависимостью интенсивности космических лучей от широты, значения которой на полюсе и экваторе различаются между собой в два раза.

20. 2. Способы измерений и аппаратура.

Методы и аппаратура, предназначенные для измерения напряженности (градиента потенциала) электрического поля, условно *делятся на две группы* (Тверской, 1947).

Первая группа*:* методы, основанные на использовании соотношения: $E = - dV/dh$. (20.9)
Метод разности потенциалов. Измеряются потенциалы V на разных высотах h.
Метод Пельтье. Проводник в виде шара, на высоте h, соединенный с электрометром. На проводнике за счет индукции происходит разделение и накопление зарядов Q. Зная емкость шара C, и измерив Q, определяется потенциал V: $Q = - CV$.
Метод коллекторов. Состоит в автоматическом измерении потенциала электрометрами одновременно в нескольких местах. *Коллектора*: механические, распылительные, пламенные, радиоактивные. *Характеризуются*: емкостью, кажущимся сопротивлением, временем релаксации, степенью изоляции и пр.

Вторая группа: методы, основанные на использовании уравнения: $E = \partial V/\partial n = 4\pi\sigma$.
Метод Вильсона. Действие метода Вильсона отражено на схеме (Тверской, 1949). Изолированная пластина P соединена с электрометром E и окружена охранным кольцом D. Сверху пластина закрыта заземленной крышкой S, которая отодвигается во время измерений. После этого на верхней части пластины появится отрицательный заряд плотностью σ. На остальной части прибора распределится положительный заряд и электрометр даст отклонение, являющейся относительной мерой плотности σ, а тем самым и напряженности поля $E = 4\pi\sigma$. Метод Вильсона может быть применен для непрерывной регистрации. Для этого крышка S приводится во вращение, тогда сигнал приобретает пульсирующий характер и может быть зарегистрирован.

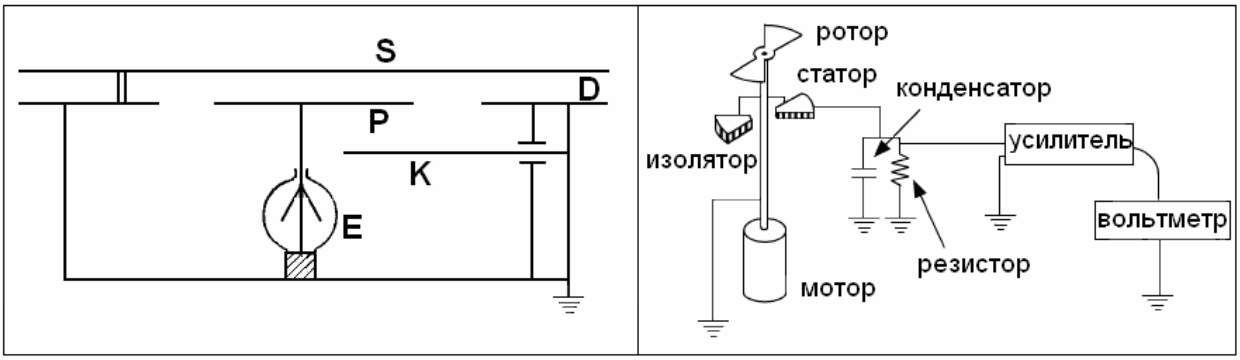


Рис. 20-1. Схема измерения *E* по методу Вильсона (Тверской, 1949) – слева и её реализация - справа.

Рис. 20-1. Датчики АЭП различных типов, применяемых в обсерваториях «Борок» (1 – 3: ИФЗ, Ярославль) и «Паратунка» (4: ИКИР, Камчатка).

Неконтактный способ измерения E в области над грозой заключается в том, что величина поля оценивается по эффекту Керра и поляризации неба (Carlson, Inan, 2008).

Датчики напряженности электрического поля. Получившие в практике измерения величины *E* широкое применение датчики, основаны на использовании метода Вильсона.
Датчики напряженности электрического поля Градиент-М2 *и Поле*-2. Величина *E* измеряется в двух диапазонах: +/- 500 В/м и +/- 5000 В/м. Датчик состоит из дифференциального электростатического генератора, усилителей, генераторов, щеточного узла и пр.
Электростатический генератор (основной узел датчика поля) представляет собой дифференциальную пару измерительных пластин и модулирующей пластины, изготовленных из нержавеющей стали. Измерительные пластины установлены на фторопластовых изоляторах, защищенных сверху от натекания воды металлическими колпачками. Модулирующая пластина закреплена на конце вала привода, другой конец которого заземлен посредством щеточного узла. Крепление модулирующей пластины не позволяет установить ее в произвольное положение. Щеточный узел состоит из торцевой щетки, расположенной на фланце крепления электродвигателя, и закрепленной в держателе щетки, и торцевого контакта, расположенного на торце вала модулятора, посредством которого пластины модулятора ЭСГ электрически соединяются с шиной нулевого потенциала.

Датчик электрической проводимости воздуха «Электропроводность-2*»* ГГО, Гидромет им. А.И. Воейкова, С-Петербург.
Аспирационный измерительный конденсатор: цилиндрическая обкладка, внутренняя собирающая обкладка, входная труба, аэрозольная защита, напряжение и измеряется ток. Величина тока I пропорциональна полярной электрической проводимости σ:
$I = 1/\varepsilon_o(C\ U\ \sigma) + \Delta I$ (ток помехи) σ в $Ом^{-1}$ $м^{-1}$. Скорость протяжки воздуха 20 л/с
Номинальная статистическая характеристика преобразования $u = \pm(4\pm0.2)\ 10^{-2}\ \sigma$
σ - полярная (положительная или отрицательная) электрическая проводимость воздуха в $фСмм^{-1}$. Предел диапазона измерений 25 $фСмм^{-1}$.

Датчик напряженности электрического поля конструкции Струминского. Основой датчика является вибрирующая стальная ленточка. Вибрация осуществляется с помощью автогенератора. По обе стороны ленточки расположены две проволочки – приемники сигнала. Проволочки хорошо изолированы от корпуса датчика. При вибрации ленточка, приподнявшись над проволочками, частично экранирует проволоки, при опускании – экранировка нарушается, в результате чего на входе усилителя появляется сигнал, который, после дополнительного усиления, поступает на вход синхронного детектора и усиливается.

Щелевой струнный электрометр. Принцип работы такой же, как у *датчика Струминского*, но вместо ленточки используется стальная проволока диаметром около 1 мм, которая расположена в щели. Конструкция датчика симметрична относительно плоскости, перпендикулярной направлению вибрации проволоки. Конструкция имеет диаграмму направленности типа "восьмерки", как у диполя Герца, что позволяет производить векторные измерения.

20. 3. Обзор моделей атмосферного электричества.

Практически все модели атмосферного электричества, начиная от Френкеля, связывают его с облаками и, в частности, с грозами и разрядами молний. Рассмотрим некоторые из них, наиболее, на наш взгляд, приемлемые.

Модель Эльстера и Гейтеля. В основе модели авторов положена предложенная ими т.н. «индукционная теория». Суть идеи состоит в том, что «большая» капля воды поляризуется в электрическом поле таким образом, что в верхней части капли скапливается отрицательный заряд, а в нижней – отрицательный. Эта большая капля взаимодействует с более мелкими, - на которых индуцируется заряд того или иного знака, который распределяется в пространстве за счет разных скоростей падения капель.

Модель Вильсона. Отличается от предыдущей только тем, что в этой теории дополнительно учитывается взаимодействие капли с ионами.

Модель Симпсона. Теория Симпсона построена на использовании эффекта Ленарда электризации при разбрызгивании воды, причем мелкие капельки оказываются заряженными отрицательно, а крупные – положительно.

Модель испарения. Идея генерации заряда при испарении обсуждалась во второй половине прошлого столетия Томсоном, Пельтье и др. очень оживленно. Тогда же было установлено экспериментально, что струя водяного пара несет значительный положительный заряд (Герасименко, 1976).

Электризация капель. По данным экспериментов, проведенных в аэрозольной камере Института экспериментальной метеорологии, авторами сообщения (Гирс, Шварц, 1976) было показано, что в камере, при образовании адиабатического тумана, накапливался некоторый положительный объемный заряд. Анализ знака зарядов, образующихся в камере капель, показал, что они имели отрицательный заряд. Авторы пришли к выводу, что рост капель на отрицательных зародышах эффективнее, чем на положительных.

Модель Френкеля. Френкель полагал, что крупные капли воды обладают отрицательным зарядом (- q), а мелкие - положительным (+ q). Электрическое поле E образуется за счет разделения зарядов в облаке в поле силы тяжести (g). При заданных величинах массы (m) и подвижности (u) капель, поле E будет равно:

$$E = [(u_1m_1 - u_2m_2)/(u_1q_1 + u_2q_2)]\, g \qquad (20.10)$$

Так как величина подвижности частицы (капли) $u = 1/(6\pi\eta r)$ в значительной степени определяется вязкостью среды η и размером капли, Френкель заменяет: $u_1 \sim 1/r_1$; $u_2 \sim 1/r_2$, и получает:

$$E = (4\pi\rho g/3) \times (r_1^2 - r_2^2)/(q_1/r_1 + q_2/r_2) = 4\pi\rho g r^2/3\varphi, \qquad (20.11)$$

что для воды дает: $\rho = 1$, $g = 1000$, $\varphi = 0.1$ В, $r = 10$ мкм, $E = 10$ CGSE = 3000 В/см.
Полученную оценку Френкель сравнивает с напряженностью электрического поля на земной поверхности при безоблачной погоде E = 1 В/см и E = 150 В/см - в облаках. Сомнение у него вызывает принятое им значение r = 10 мкм. Действительно, сомнение Френкеля, как будет показано ниже, – вполне справедливо, т.к. реальный размер капель, принимающих участие в процессах электризации атмосферы, значительно меньше.

Тверской (1949), сравнивая различные модели образования и разделения зарядов в электрическом поле, отметил, что Френкель, в отличие от других авторов, рассматривает электрическое поле в атмосфере не как следствие наличия отрицательного заряда Земли и положительного заряда атмосферы, а как причину возникновения этих зарядов.

Согласно развиваемым здесь представлениям, суть идеи Френкеля состоит в том, что разделение зарядов происходит благодаря конденсации, хотя он рассматривал и другие способы электризации. Он полагал, что при распылении малых частиц воды происходит разрушение двойного электрического слоя (ДЭС), возникающего в водяной капле. Размеры отделяющихся частиц, соизмеримых с эффективной толщиной ДЭС, приобретают положительный заряд, остальная масса - отрицательный.

Модель Никандрова. Электрические процессы, обусловленные фазовым переходом “вода-пар”, рассмотрены в книге Никандрова (1981). Автором делается попытка найти объяснение образованию электрических полей в облаке. Взаимодействие молекул воды с собственным паром во многом обязаны их электрическим свойствам. Полная энергия взаимодействия двух молекул водяного пара равна:

$$W = B/L^{12} - \Gamma/L^6, \qquad (20.12)$$

где B/L^{12} -энергия отталкивания; Γ/L^6- энергия притяжения; L - расстояние между центрами молекул. В состоянии равновесия энергия взаимодействия принимает минимальное значение, равное $W_o = kT_{кр}$ ($T_{кр}$ - критическая температура). Энергия притяжения, в свою очередь, суммируется (по мере убывания эффекта) из:
1) потенциальной энергии ориентационного взаимодействия:

$$W = 2/3 \times \mu^2/kT\, L^6 \ (\mu \text{ - дипольный момент}), \qquad (20.13)$$

2) поляризационной энергии:

$$W = 2\alpha\mu^2/L^6 \quad (\alpha \text{ - коэффициент поляризации}), \qquad (20.14)$$

3) энергии, обусловленной дисперсионным эффектом:

$$W = 3/4 \times h\nu\alpha/L^6, \qquad (20.15)$$

$h\nu$ - квант энергии, ν - частота колебаний внешних электронов.
Для N-молекул энергия притяжения определяется их числом:

$$W = Nr/2L^6. \qquad (20.16)$$

Таким образом, видно, что взаимодействие молекул определяется их электрическими свойствами. Эти свойства проявляются особо при фазовых переходах, когда возникают не скомпенсированные электрические поля.

В подтверждение идеи Френкеля, считавшего, что большая капля заряжена отрицательно, а маленькая - положительно, приведем пример из книги Никандрова. Конденсация паров воды происходит достаточно быстро при четырехкратном пересыщении, для отрицательных ионов, и шестикратном, - для положительных ионов. Отсюда следует, что капли, выросшие до больших размеров, могут сохранять отрицательный заряд, в то время как капли меньших размеров - положительный. Единичный заряд капли составляет примерно 10^{-14} Кулон. Размер капли варьируется от малого (7-8 Å) к среднему (100 Å) и большому (> 550 Å).

Вращение плазмосферы. Авторы модели базируются на идее Ландау и Лифшица, что вокруг вращающегося намагниченного шара существует не только магнитное дипольное поле, но и квадрупольное электрическое. Развивая эту идею, Беспалов и Чугунов (1994) обсуждают модель возникновения атмосферного электричества в результате трения плазмосферы, вращающейся со скоростью, меньшей, чем скорость суточного вращения Земли ω_o, о "магнитосферную периферию". Разность потенциалов, приложенная к атмосферному промежутку, $U = \omega_o M/cr_o$, где M - магнитный момент Земли, r_o - её радиус, c - скорость света. Данная модель, по мнению авторов, дает правильный знак заряда планеты и величину плотности атмосферного тока.

Электрическая машина Рише. Автор этой (1997) и ряда предыдущих работ обращает внимание на роль космического излучения в формировании "электрической машины Земли" (ЭМЗ). Он учитывает то обстоятельство, что величина атмосферного электрического поля распределена вдоль высоты атмосферы весьма неравномерно (см. рис. 20-3): около Земли E принимает самое большое значение, затем довольно резко спадает и затем, в районе т.н. электросферы, - E вновь велико. В принципе, в атмосфере есть область, где $E \approx 0$. По мнению Рише, эта "поверхность" делит ЭМЗ на две части, одна из них, это, собственно, атмосферное электрическое поле (АЭП), другая часть - внешнее электрическое поле (ВЭП), имеющее другую причину возникновения. В области $E = 0$ космический ток компенсируется рассеивающимися с поверхности зарядами. Электрическая машина Рише "работает" таким образом, что происходит перераспределение электрических зарядов между АЭП и ВЭП, так, что суммарный заряд Земли остается постоянным. При этом "поверхность E = 0" меняет свою высоту, а "зарядный" (от космических лучей) и "разрядный" (от Земли вверх) токи компенсируют друг друга. Автор полагает, что учет космического тока позволяет естественным образом, без привлечения сторонних идей и предположений, расширить представления о глобальной токовой цепи, электрическом поле Земли и работе ЭМЗ, а также понять причину сохранения квазистационарных зарядов атмосферы и Земли.

Грозовая модель атмосферного электричества. Модель, развиваемая в (Hays, Roble, 1979; Roble, Hays, 1979), основана на электрическом взаимодействии между верхней и нижней атмосферой. Главным источником электрического тока является грозовое облако, вверху которого скапливается положительный заряд, а внизу - отрицательный. Грозы распределены по поверхности Земли неравномерно, однако, именно их пространственное размещение обеспечивает возможность унитарной вариации атмосферного электричества. Электрический потенциал на поверхности Земле равен нулю и также равен нулю вдоль её орографической поверхности. Авторы делают расчеты величины E, как учитывая орографию, так и без её учета. Электрическая проводимость экспоненциально возрастает с высотой до тех пор, пока на атмосферные электрические эффекты не начнет оказывать влияние магнитосфера и космические лучи, обладающие, как известно,

широтной зависимостью. Авторы рассчитали электростатическую модель в зависимости от распределения грозовых источников тока. Результаты расчетов показывают, что величина E максимальна в окрестности источников, а потенциал может достигать ионосферных высот. Согласно расчетам в ионосфере величина E может достигать 0.25-0.5 мВ/м. Заметную роль в этой модели играют эффекты, связанные с ионизацией атмосферы космическими лучами. По мнению авторов в этой модели находят объяснение явления, связанные с т.н. Форбуш-эффектом. Естественно, авторы полагали, что в момент Форбуш-понижения величина АЭП должна возрастать, что, как оказалось, не соответствует наблюдениям.

20. 4. Новая модель атмосферного электрического поля.

Электрические заряды в атмосфере.

Атмосферное электрическое поле можно определить в любой его точке, зная его потенциал V, величина которого обусловлена суммой всех электрических зарядов на Земле и в атмосфере. Каждая точка пространства обладает вполне определенным потенциалом. Соединение всех точек, обладающих одним значением потенциала, приводит к построению т.н. уровенной, изопотенциальной поверхности. Эти поверхности, в силу свойств, присущих потенциалу, не могут ни пересекаться, ни касаться друг с друга. Беря производную от потенциала по нормали (n), получаем напряженность поля $E = \partial V/\partial n$. У земной поверхности, считая её проводником, напряженность поля:

$$E = \partial V/\partial n = 4\pi\sigma, \qquad (20.17)$$

где σ – поверхностная плотность заряда Земли в данной точке. Выражение (20.17) играет важную роль в физике АЭП, т.к. в приземном слое величина E резко возрастает. Это явление в атмосферном электричестве получило название электродный эффект. Наблюдения за величиной E, проведенные у земной поверхности, дают в среднем для градиента потенциала значение порядка 130 В/м, что позволяет вычислить величину поверхностной плотности заряда Земли (1): $\sigma^* \approx 7\cdot10^5$ элементарных зарядов/см^2 и общий заряд Земли: $Q = \varepsilon_o R^2_E E = 5.7\cdot10^5$ кулон, R_E – радиус Земли ε_o – электрическая постоянная. Учитывая сказанное, по-видимому, правильнее говорить не о постоянстве E во времени и пространстве, а о том, что электрический заряд Земли - суть константа (Швейдлер, 1936).

Общий потенциал положительно заряженной электросферы (ионосферы) относительно отрицательной Земли V = 300 кВ, плотность тока в «конденсаторе» Земля-ионосфера $j \approx 10^{-12}$ А/м^2, полный ток «разрядки» $I \approx 1$ кА. Зная V и Q, можно оценить емкость «конденсатора» Земля – электросфера: $C = Q/V \approx 1$ фарада. Ёмкость сферического конденсатора можно оценить по формуле: $C \approx 4\pi\varepsilon_o\varepsilon S/d$, подставляя площадь поверхности Земли S и величину электрической постоянной ε_o, получаем высоту электросферы: $d \approx 60$ - 90 км. Полное сопротивление проводящей атмосферы $R \approx 230$ Ом. Сопротивление R можно представить как параллельное соединение цепочек сопротивлений между Землей и электросферой, расположенных равномерно по поверхности Земли, соединенных между собой сопротивлениями в точках, между которыми возможно возникновение горизонтального E и возможен горизонтальный ток электрического заряда, как, например, в облаках или ионосфере. В таких цепочках включены источники напряжения, которые создают необходимый потенциал на обкладках сферического конденсатора. В качестве такого генератора принято считать грозы.

Суть развиваемой нами идеи состоит в том, что грозы и разряды молний оказывают влияние на АЭП, но они не являются основными его источниками. Согласно модели, образование электрических зарядов происходит за счет ионизации атмосферы ГКЛ, а их разделение - за счет выноса легких положительно заряженных ионов в верхние слои атмосферы и падения на Землю тяжелых отрицательно заряженных аэрозолей, - в атмосфере «хорошей погоды». Для того, чтобы доказать правоту этой идеи, необходимо, во-первых, найти убедительные свидетельства того, что ГКЛ могут принести Земле электрический заряд, по величине не меньший, чем она теряет в единицу времени I =

dQ/dt = 10^3 кулон/с. Скорость образования ионов q связана с плотностью потока космических лучей P соотношением: $q = PsN_o$, s – эффективное сечение ионизации воздуха космическими лучами, N_o – концентрация молекул воздуха.

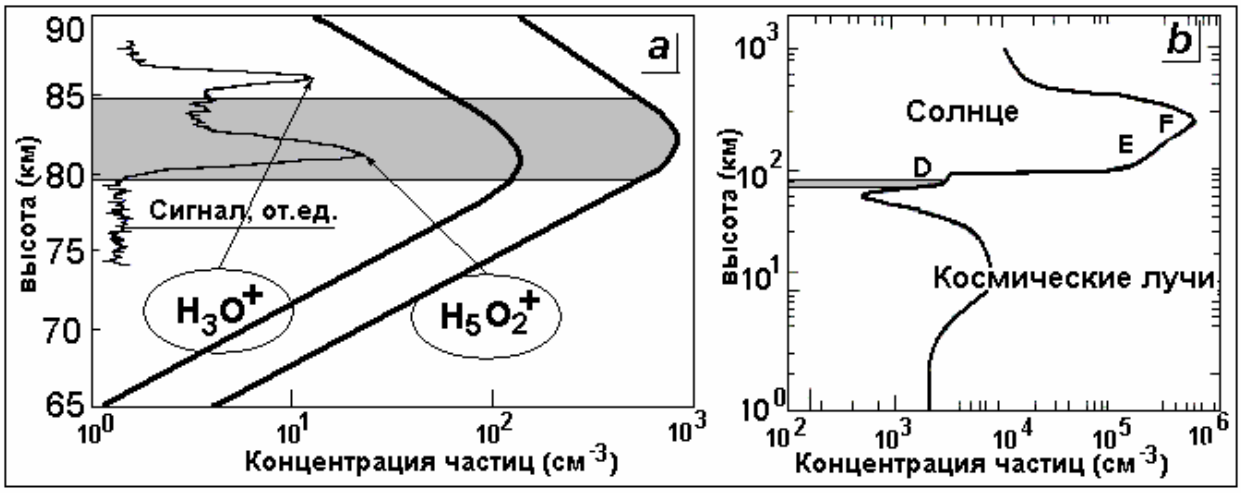


Рис. 20-2. Сигнал (в от ед.) зарегистрированный при ракетных измерениях АЭП (Shimogawa, Holzworth, 2009); вертикальные профили плотности: водных кластеров $H_5O^+_2$ и H_3O^+, и ионизированных частиц в атмосфере: (Ferguson, Fehsenfeld, 1969) – *a*, Концентрация частиц по высоте (Marsh, Svensmark, 2000) – *b*.

Во-вторых, наша модель требует наличия в атмосфере Земли, на высоте $d \approx$ 60-90 км, положительно заряженного слоя, плотность зарядов в котором должна быть не ниже $\sigma^* \approx 7 \cdot 10^5$ элементарных зарядов/см^2. Как показано в (Ferguson, Fehsenfeld, 1969) такой слой, состоящий из положительно заряженных водных кластеров $H_5O^+_2$ и H_3O^+ (ионов гидроксония), - реально существует на высоте ~ 80 км (рис. 20-2-а). Эта информация получила подтверждение прямыми ракетными измерениями АЭП на этих высотах (на том же рис.) (Shimogawa, Holzworth, 2009). Как следует из этой работы, слой оказывается двойной. Возможно, как это показано на рис, в каждом слое находятся различные ионы гидроксония.

Для обеспечения величины $\sigma^* \approx 7 \cdot 10^5$, толщина слоя, при концентрации 10^3см$^{-3}$, должна быть не менее 700 см. В действительности, толщина этого слоя значительно больше, - достигает 2 – 3 км, что позволяет считать положительно заряженный слой ионов гидроксония, - второй обкладкой сферического конденсатора «Земля – электросфера».

Рассмотрим подробнее поведение параметров, необходимых для построения модели АЭП, в области её генерации (рис. 20-2). Максимальная плотность потока ГКЛ приходится примерно на тропопаузу. В этой области атмосферы – самая низкая температура. Влажность уменьшается с высотой, но незначительно: всего в 10 раз относительно слоя наибольшей облачности. Кривая АЭП показывает (в логарифмическом масштабе) уменьшение поля с высотой.

Распределение плотности электрических зарядов по высоте атмосферы представлено на рис. 20-2-*b* (Marsh, Svensmark, 2000). Как следует из рисунка, ионизация воздуха той части атмосферы, которая причастна к генерации АЭП, происходит за счет ГКЛ. Оценим величину dQ/dt – скорость образования ионов, приняв величину плотности зарядов $N = 2 \cdot 10^9$ м$^{-3}$, для чего воспользуемся равенством: $dN/dt = \alpha N^2$. Положим, что $N^+ = N^-$, тогда, зная коэффициент рекомбинации ионов α, можно оценить скорость образования зарядов в атмосфере dN/dt. Подставив в формулу величину элементарного заряда e, получим скорость накопления зарядов: $dQ/dt = eV \cdot dN/dt$, где V – объем атмосферы Земли (~ $5 \cdot 10^{18}$ м^3). Отсюда величина: $dQ/dt = \alpha \cdot 4 \cdot 10^{18}$ кулон/с. Таким образом, если бы скорость

рекомбинации α была бы: $\alpha \geq 2.5 \cdot 10^{-16}$ ($м^3$ $с^{-1}$), проблема создания плотности зарядов в атмосфере за счет ионизации её ГКЛ – решалась бы элементарно.

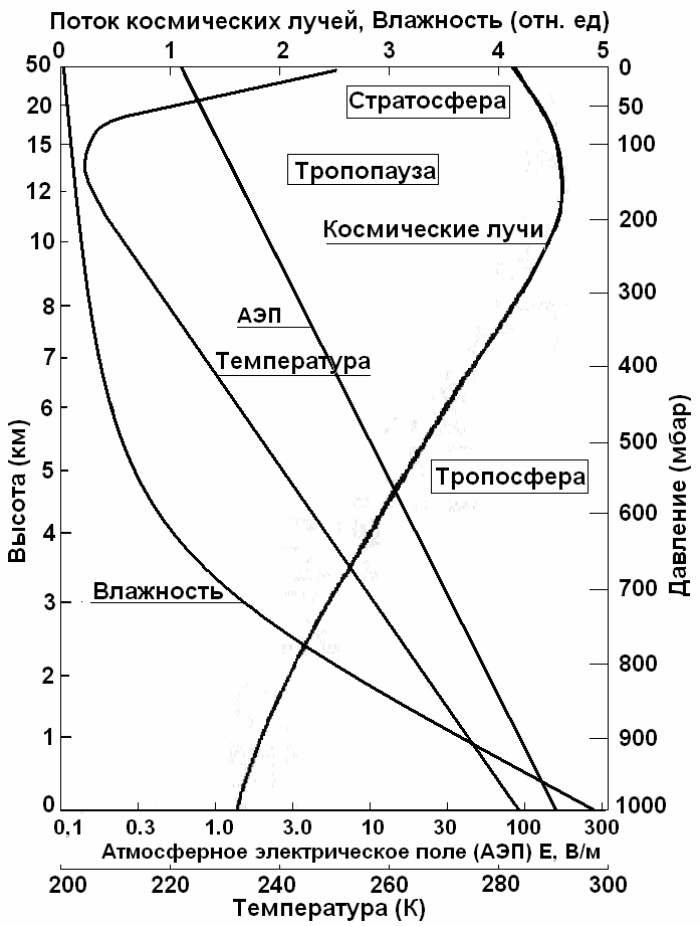


Рис. 20-3. Поток галактических космических лучей, АЭП, температура воздуха и влажность в зависимости от высоты и атмосферного давления.

Обратимся к справочным данным по величине коэффициента объемной рекомбинации α. Величина α изменяется в пределах: 10^{-16} – 10^{-12} $м^3$ $с^{-1}$. Требуемое для нашей модели ограничение величины α находится в этом диапазоне величин, тем не менее, эта оценка не дает однозначного ответа на поставленный выше вопрос. Для того чтобы ответить на него, необходимо точно знать, на каких ионах происходит рекомбинация зарядов, и какова роль электронов в этом процессе. Согласно данным, приведенным в (Боярчук и др. 2000) скорость рекомбинации положительных ионов с электронами $\alpha \approx 10^{-12}$ $м^3$ $с^{-1}$, в то время как коэффициент рекомбинации между ионами намного меньше $\alpha \approx 10^{-16}$ $м^3$ $с^{-1}$ (что несколько меньше нашей оценки). Если процесс ион ионной рекомбинации превалирует над ион электронной, то ГКЛ, в данной модели объемной рекомбинации, по-видимому, не могут обеспечить необходимый приток зарядов. В этом случае задача усложняется, необходимо привлечение дополнительных источников ионизации.

Наша оценка показывает, что ГКЛ вносят существенный вклад в формирование электрического заряда в атмосфере Земли, но пока нельзя считать, что это единственный источник зарядов. Существует и другой способ оценить роль ГКЛ в ионизации атмосферы.

В работах (Ermakov et al., 1997; Ермаков, Стожков, 2004) экспериментально установлено, что ионизация атмосферного воздуха космическими лучами q происходит в соответствии с линейным уравнением баланса ионов: $q = \beta N$, а не в состоянии с обычно используемым квадратичным уравнением: $q = \alpha N^2$. Здесь α – коэффициент объемной

рекомбинации, β – коэффициент линейной рекомбинации, эти коэффициенты различны по величине и по размерности. Обнаруженная зависимость указывает на то, что в действительности связь между концентрацией ионов в атмосфере и потоком космических лучей является более сильной ($N \sim P$), чем предполагалось ранее ($N \sim P^{1/2}$). Этот подход укрепляет уверенность в том, что ГКЛ оказывают решающее влияние на АЭП и ток проводимости атмосферы j. В качестве иллюстрации сказанному приведем рис. 20-4, на котором можно видеть устойчивую корреляцию между потоком ГКЛ - N и током j (dQ/dt).

Обратим внимание на то, что уменьшение плотности потока ГКЛ и тока проводимости j соответствуют периодам максимальной активности Солнца (69-70 и 80-82 гг.), а их синхронное увеличение - минимальной (76-77 гг.). Таким образом, рис. 20-4. подтверждает однозначную связь АЭП с ГКЛ. Однако пока речь шла только о том, что ГКЛ в атмосфере могут обеспечить необходимую плотность электрических зарядов. Теперь, во-вторых, необходимо определить, имеется ли в атмосфере достаточное количество мелких капель, водных аэрозолей или тяжелых ионов, которые смогли бы принять участие в разделении образовавшиеся за счет ионизации атмосферы ГКЛ заряженных частиц в поле силы тяжести таким образом, чтобы Земля оказалась отрицательной, а ионосфера – положительной.

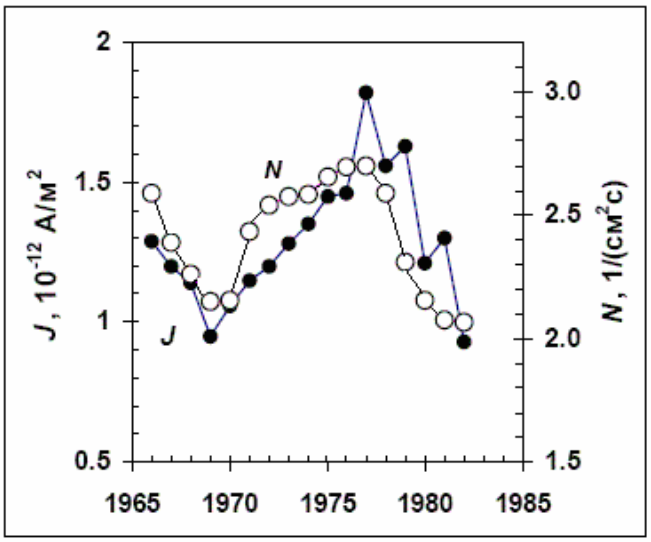


Рис. 20-4. Зависимости величины плотности атмосферного тока j (темные кружки) (Roble, 1985) и потока космических лучей N на средних широтах на высоте $h \approx 22$ км; светлые кружки (Stozhkov, 2003; Ермаков, Стожков, 2004).

Образование водных аэрозолей. Размер частиц.

В спокойной атмосфере всегда существуют аэрозольные частицы размером от нескольких сотен ангстрем до нескольких микрон. В глобальном масштабе выделяют три типа распределения частиц по размерам в тропосфере: «фоновый», «океанический» и «континентальный». Идеализированные кривые, демонстрирующие существенные черты этих распределений, изображены на рис. 20-5 (Ивлев, Довгалюк, 1999). Фоновый тип распределения аэрозоля по размерам предполагается репрезентативным для средней и верхней тропосферы. Кривые рисунка соответствуют ситуации существования и отсутствия непрерывной генерации мелкодисперсной фракции. Фоновая концентрация (кривые 1, 5) типична для очень чистого воздуха и предполагается равной 700 $см^{-3}$. Самый нижний слой воздуха над океанами, высотой 2 км, содержит морские частицы. Океанический тип распределения частиц по размерам (кривые 2, 4) отличается от фонового в интервале радиусов от 0.5 до 20 мкм, в котором концентрация частиц океанического типа увеличивается по сравнению с фоновой концентрацией - за счет

частиц, возникающих из морских брызг. Общая концентрация частиц морского происхождения не велика: $< 10^3$ см$^{-3}$. В нижней тропосфере над сушей предполагается репрезентативным третий тип распределения частиц по размерам – континентальный (кривая 3). Счетная концентрация частиц в этом случае возрастает до 10^4 см$^{-3}$. Распределение частиц с $r < 0.1$ мкм считается неопределенным. Как следует из рис. 20-5, максимальная концентрация аэрозолей соответствует размеру: $r \geq 0.1$ мкм. (В дальнейшем нас будут интересовать частицы именно такого размера). Распределение частиц по размеру, представленное на рис. 20-5, касается не только водных аэрозолей. Разделение электрических зарядов происходит на водных каплях и тяжелых ионах, поэтому необходимо выяснить, имеются ли в атмосфере подходящие условия, необходимые для конденсации и коагуляции капель радиусом $r \geq 0.1$ мкм.

Приведем данные по концентрации в атмосфере и подвижности легких и тяжелых ионов (Тверской, 1949), полученные при изменении влажности воздуха. Распределение ионов по концентрациям, подвижностям и скоростям (при влажности воздуха 2 – 3 мм Hg) приведено в 1:

Таблица 1.

Легкие ионы	$n = 200$ см$^{-3}$	$u = 1.1$ см^{2}с$^{-1}$ В$^{-1}$	$v \approx 10^{-2}$ м/с, для $E = 100$В/м
Средние ионы	$n = 700$ см$^{-3}$	$u = 0.05$ см^{2}с$^{-1}$ В$^{-1}$	$v \approx 5 \cdot 10^{-4}$ м/с
Тяжелые ионы	$n = 1600$ см$^{-3}$	$u = 0.008$ см^{2}с$^{-1}$ В$^{-1}$	$v \approx 8 \cdot 10^{-5}$ м/с

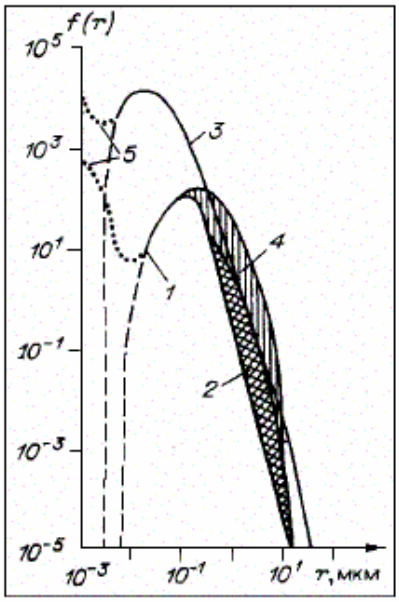


Рис. 20-5. Распределение атмосферных аэрозолей по размерам (Ивлев, Довгалюк, 1999).

При увеличении влажности воздуха от 2-3 мм Hg до 12-13 мм Hg, концентрации легких и средних ионов практически не изменяется, в то время как концентрация тяжелых – возрастает почти в 5 раз. Обратим внимание на то, что скорость дрейфа тяжелых ионов в поле E может быть соизмерима и даже меньше (как будет показано ниже) их стоксовой скорости падения в поле силы тяжести.

Заряженные водные аэрозоли и тяжелые ионы падают на поверхность Земли и передают ей свой заряд. Аэрозоли во время падения на Землю - испаряются. Критический размер, при котором они начинают испаряться, был оценен в (Harrison, 2001), где показано, что наиболее оптимальный размер водного аэрозоля составляет 0.13 мкм (рис. 20-6). Меньшие частицы – испаряются, частицы крупнее критического размера – растут.

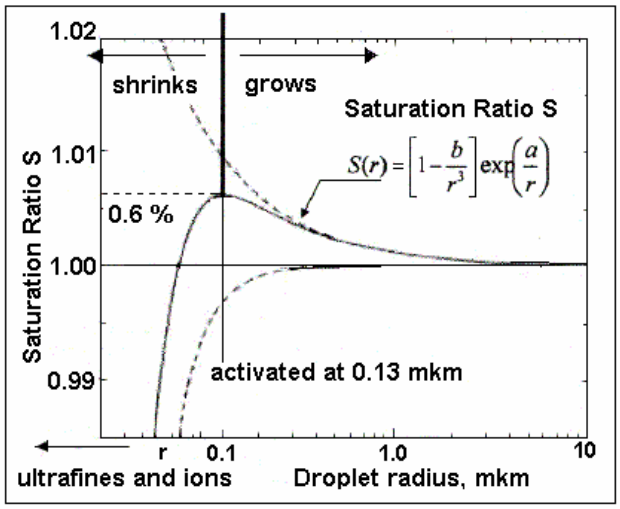


Рис. 20-6. Зависимость размера водного аэрозоля от степени насыщения (Harrison, 2001). Капли размером, $r < 0.13$ мкм будут испаряться, большим 0.13 мкм – расти.

Как показано на рис. 20-6, величина пересыщения в оптимальном случае $S_c \approx 1.006$ (0.6%). Зависимость критического пересыщения паров воды от температуры $S_c(T)$ приведенная на рис. 20-7, получена Артюхиным А.С. (2001). Расчеты проводились как по классической теории (1), так и по квантово-статистической (2). В последнем случае, результаты расчетов близки с экспериментальными точками, определенными при сверхзвуковом течении воздуха, в камере Вильсона, и в диффузионной камере. Автор считал пересыщение критическим, при котором отношение числовой плотности димеров к числовой плотности мономеров в системе составляет 3% (критерий Кало). Автором показано, что при температуре $T = 250$ К, $S_c = 1.5$ и оно плавно убывает по мере роста температуры: $T = 275$ К, $S_c = 1.0$; $T = 290$ К, $S_c = 0.5$ и т.д., отсюда для $S_c = 1.06$, $T = 265$ К.

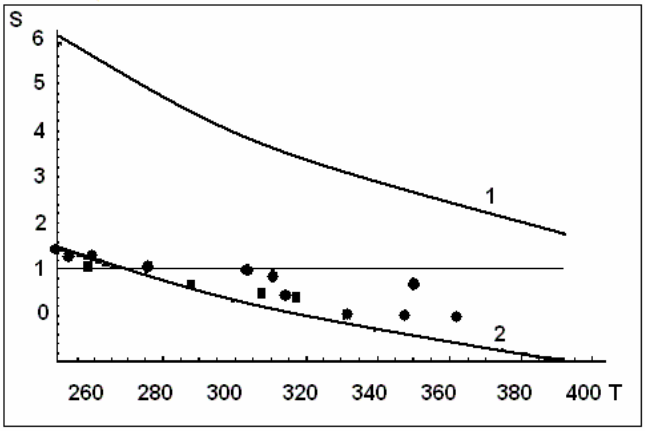


Рис. 20-7. Зависимость критического пересыщения паров воды от температуры $S_c(T)$ (Артюхин, 2001).

Полагая среднюю по Земле температуру $T_E = 15$ °С, а температуру $T_c = -10$ °С, используя эмпирическую формулу для убывания температуры тропосферы с высотой H: $T_c = T_E - 6.5\ H$ (км), получим, что степень пересыщения $S_c = 1.06$ будет достигнута на высоте ≈ 4 км. Полученный результат показывает, что область формирования водных аэрозолей с характерным размером $r \geq 0.1$ мкм совпадает с областью максимальной концентрации ионов, образующихся при торможении ГКЛ.

Разделение зарядов в поле силы тяжести.

Величину атмосферного электрического поля E_Z, можно оценить по формуле, полученной Френкелем при учете эффекта разделения зарядов на водных каплях, радиусом r (Френкель, 1949):

$$E_Z = (4\pi\rho g/3\varepsilon_o) \times (r_1^2 - r_2^2)/(q_1/r_1 + q_2/r_2) = 4\pi\rho g r^2/3\varepsilon_o\,\zeta. \qquad (20.18)$$

Здесь: ρ - плотность воды, g – ускорение силы тяжести, ε_o – электрическая постоянная, r_1 и r_2 - радиусы больших и малых капель, q_1 и q_2 – их заряды, соответственно, ζ.- электрокинетический потенциал воды. Френкель выражает величину E_Z внутри облака через его водность M:

$$E_Z = \varepsilon_o\, Mg\zeta/6\pi\eta\sigma_e. \qquad (20.19)$$

где: M – водность облака (в грозовом облаке считается величина $M \approx 1$ г/м^3), g – ускорение силы тяжести, ζ – электрокинетический потенциал воды ($\zeta \approx 0.25$ В), η – вязкость воздуха ($\eta \approx 10^{-5}$ Па с), σ_e- электропроводность ($\sigma_e \approx 10^{-14}$ Ом$^{-1}$ м$^{-1}$); $E_Z \approx 10^4$ В/м.

Следуя логике рассуждений Френкеля, для оценки величины E, возникающей при разделении зарядов в насыщенной влагой атмосфере «хорошей погоды», будем использовать формулу (20.19). Известно, что в такой атмосфере концентрация молекул «сухого» пара воды ≈ 12 г/м^3. Водность атмосферы (в виде водного аэрозоля) M для E_Z = 100 В/м должна быть в сто раз меньше, чем в кучевом облаке, т.е. M = 0.01 г/м^3. Как показано в предыдущем разделе, для того чтобы в атмосфере образовался мелкий аэрозоль, необходимо выполнение определенных pT условий. Важно, чтобы температура и давление водяного пара были бы близкими к давлению насыщенного пара при заданной температуре. Это означает, что пересыщение должно быть чуть больше единицы. Второе условие образования мелких капель состоит в том, что для их образования необходимы ядра конденсации. Согласно нашей модели, это могут быть электрические заряды.

Оценим размер капелек воды в этом случае. Очевидно, что это должны быть очень мелкие, не видимые глазом капли, размером, меньше 0.5 мкм. Если капли будут видимые и их будет много, то это уже не атмосфера «хорошей погоды», а грозовое облако или туман. Условие падения капель на Землю, при выполнении которого они могут принять участие в разделении зарядов, можно получить из формулы Стокса для скорости падения капли:

$$v = (mg - \varepsilon_o\, qE)/6\pi\eta r, \qquad (20.20)$$

где m – масса капли, а $q = \varepsilon_o\zeta r$ - её заряд. В облаке принято считать: $mg >> qE$. В нашем случае, для оценки минимального размера капли, можно остановиться на условии: $mg \geq qE$. Отсюда получаем минимальный радиус капли из условия: $(4\pi/3)\, r^2\, g\rho \geq \varepsilon_o\, \zeta E$, или $r \geq$ 0.1 мкм. Наша оценка соответствует очевидному условию «невидимости» капли: $r <$ 0.5 мкм, или: 0.5 мкм $> r \geq$ 0.1 мкм. Масса капли такого размера $m \approx 10^{-14}$ г.

Используя формулу (20.19), мы получили, что поле E_Z = 100 В/м возникает при водности атмосферы $M = 10^{-2}$ г/м^3. При этом в кубическом метре воздуха может находиться до $n \approx 10^{12}$ заряженных капель.

Оценим концентрацию электрических зарядов, принимающих участие в атмосферном токе «утечки». Однако прежде отметим, что в атмосферном токе участие принимают лишь легкие ионы. Ни средние, ни, тем более, тяжелые ионы, в силу своей малой подвижности, участие в формировании атмосферного тока утечки не принимают. (Это важный момент модели). Плотность атмосферного тока «хорошей погоды» $j = 10^{-12}$ А/м^2, подвижность легких ионов, носителей тока (по справочным данным): $u = 10^{-4}$ м^2/с·В, отсюда скорость переноса для E_Z = 100 В/м. $v_e = uE \approx 10^{-2}$ м/с. Мы можем оценить плотность переносчиков зарядов: $n_e = 10^9$ м$^{-3}$. Как известно, величина $E_Z \sim 1/h$, а проводимость: $\sigma \sim h$, h – высота. Известно так же, что плотность тока j от h практически не зависит. Эти данные позволяют получить примерное распределение плотности электрических зарядов n_e, участвующих в формировании тока утечки: $n_e \sim 1/E^2$ или: $n_e \sim h^2$. Плотность зарядов тока утечки возрастает с высотой квадратично.

Представим себе атмосферную электрическую цепь как глобальный контур, состоящий из внутреннего генератора и нагрузки. В нашей модели, генератором АЭП является атмосфера «хорошей погоды», в которой происходит образование и разделение зарядов в поле силы тяжести. Образование аэрозоля на отрицательном заряде требует значительно меньшего пересыщения и капля образуется значительно быстрее, чем на положительном заряде. Источником зарядов являются ГКЛ, которые, попадая в атмосферу, тормозятся, генерируя при этом каскад вторичный заряженных частиц dN/dt. Принципиальным моментом модели является величина скорости падения капли, в сравнении её со скоростью дрейфа в АЭП. Оценим величину стоксовой скорости капли радиусом 0.1 мкм, для чего воспользуемся формулой (20.20): $v \approx mg/6\pi\eta r = 10^{-4}$ м/с. Сравним полученную оценку с известными экспериментальными данными. Принято считать, что средняя скорость оседания стратосферного аэрозоля радиусом 0.1 мкм примерно 40 м за сутки, или $\approx 5\cdot 10^{-4}$ м/с, что близко к стоксовой скорости.

Скорость «падения» аэрозольных слоев, измеренная с помощью лидара на полигоне Томского института оптики атмосферы СО РАН, составляет около 5 км/сутки $\approx 5\cdot 10^{-2}$ м/с (Маричев и др. 2004). Размер аэрозоля, по оценкам авторов, порядка 1 мкм. Так как стоксова скорость $v \sim r^2$, то для капель такого размера, эта скорость, оцененная по формуле (20.20): $v \approx 10^{-2}$ м/с, что примерно соответствует измерениям в Томске. Эти оценки показывают применимость формулы (20.20).

Полярность Е. Роль процессов конденсации и испарения.

Рассматриваемая нами модель АЭП, как и модель Френкеля, определяет полярность заряда Земли тем, что капли, несущие отрицательный заряд, оказываются тяжелее капель, несущих заряд положительный. Мы вправе задать вопрос: всегда ли было так, и может ли заряд Земли знак изменить? Как следует из всего ранее сказанного, модель АЭП базируется на процессах конденсации и коагуляции капель. Процессы испарения практически не рассматривались, а ведь они в физике атмосферы играют не меньшую роль, чем процессы конденсации. Рассмотрим оба этих процесса чуть подробнее, и с общих позиций. Выясним, в частности, роль фазовых переходов в объяснении физической картины электрических процессов, иначе, попытаемся разобраться в физике, связанной с конкуренцией между процессами конденсации и испарения в атмосфере.

Скорость конденсации K ($с^{-1}$ $см^{-3}$), согласно формуле Френкеля (1975), упрощенной и модифицированной:

$$K \sim exp(-3/ln^2 S_C + ln\, S_C), \qquad (20.21)$$

здесь S_C - пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина S_C определяется температурой пара T: ($ln\ S_C \sim 1/T$), его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной поверхностного натяжения жидкости и т.п. Скорость конденсации K можно выразить через температуру пара:

$$K \sim exp(-T^2 + 1/T), \qquad (20.22)$$

Скорость конденсации K показывает количество элементарных процессов слияния частиц, которое происходит в единицу времени в единичном объеме. Величина K определяет скорость образования и роста капель.

В режиме испарения (кипения) в системе разрушаются капли и, им на смену, образуются «пузыри» пара, скорость образования которых J ($с^{-1}$ $см^{-3}$):

$$J \sim exp(-W/kT), \qquad (20.23)$$

где W - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Качественная зависимость K и J от температуры T изображена на рис. 20-8. При температуре T'', когда выполняется ($K \approx J$), казалось бы, система должна достичь

термодинамического равновесия. На самом деле всё обстоит в точности наоборот: такая ситуация ближе к критическому, крайне неустойчивому состоянию.

Для процессов, происходящих в атмосфере, температура поверхности океана $T'' \approx 26.5°$ С считается критической, при которой возникает неустойчивость, результатом развития которой является, в частности, возникновение тайфунов. Считается, что именно при этой температуре процессы испарения начинают превалировать над конденсацией. Как известно, средняя температура Земли, усредненная по земному шару и времени года: $T \approx 15°C$, что ниже T''. Таким образом, на Земле, в её атмосфере, согласно нашей феноменологической модели, процессы конденсации имеют преимущество перед испарением. Средняя температура Земли величина очень стабильная. Как правило, речь идет о возможных вариациях её от года к году не более единиц процентов. Возможно, постоянство T является одной из причин того, что и величина E поддерживаться постоянной. Вторая причина стабильности E - это стабильность потока ГКЛ.

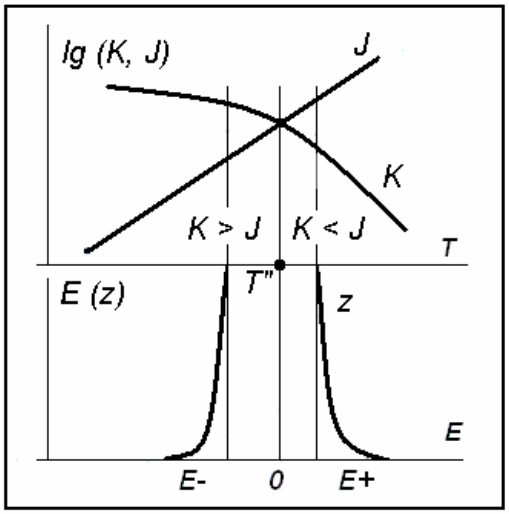


Рис. 20-8. Изменение *lg* скоростей конденсации (K) и испарения (J) в зависимости от температуры T – вверху. Внизу – полярность электрического поля E, как функция отношения J и K: E +, когда $J > K$, и E -, когда $J < K$.

Как мы отмечали выше, разделение электрических зарядов в атмосфере обязано тому, что капли заряжаются, в зависимости от их размеров: маленькие (ионы гидроксония) – приобретают положительный заряд и «всплывают», большие заряжаются отрицательно и «падают» на Землю. При постоянных параметрах: температуре, давлении и влажности атмосферы, это очень стабильный во времени процесс. Электрические заряды приносят в атмосферу ГКЛ, плотность потока которых так же очень стабильный во времени процесс. Взаимодействие этих двух стабильных процессов поддерживает уровень E_Z - стабильным. Тем не менее, зададимся вопросом, может ли, в принципе, возникнуть такая ситуация, при которой Земля может оказаться заряженной положительно, а ионосфера – отрицательно?

В современной атмосфере скорость конденсации воды выше скорости испарения. Представим обратную, гипотетическую ситуацию: скорость испарения воды превалирует над скоростью её конденсации. В нашей постановке задачи, это означает, что в непосредственной близости над поверхностью испарения скапливается положительный заряд. В это время в более высоких, и более холодных слоях атмосферы водяные пары конденсируются, и при этом образуются капли, обладающие отрицательным зарядом, Капли выносятся потоком пара в верхние слои атмосферы. При этом восходящий поток с каплями, несущими отрицательный заряд, преодолевает земное притяжение, т.е. градиент давления в потоке оказывается больше силы тяжести. Полярность атмосферного

электрического поля при этом изменится - на обратную. Эта ситуация отражена в правой части рис. 20-8. На практике эта ситуация возникает при образовании тайфунов, когда на большие высоты восходящими потоками выносится огромное количество водяных капель, заряженных отрицательно. В районе генерации АЭП, на высоте 12 – 15 км рассмотренная ситуация не реальна и на Земле смены полярности АЭП происходить не должно, сколько бы не возрастала температура её поверхности.

Всем известно, что в течение 100 последних лет температура поверхности Земли увеличивается. Согласно нашей модели, величина АЭП должна была бы уменьшаться. Действительно, как было недавно показано по наблюдениям в Шотландии и Шетланде, ежегодное снижение АЭП с 1920 до 1980, когда измерения прекратились (Harrison, 2002), - было зарегистрировано. Автор этой работы пытается связать уменьшение величины АЭП с якобы наблюдаемым уменьшением интенсивности ГКЛ, подчеркивая, тем не менее, существование отрицательной корреляции с глобальной температурой, как и следует из нашей модели (рис. 20-8).

Уместно ещё раз вспомнить слова знаменитого английского физика Томсона о том, что в будущем предсказание погоды будет осуществляться посредством электрометра. Если наши рассуждения о связи E с температурой, давлением и влажностью атмосферы Земли верны, то Томсон был очень близок к истине.

Поле E_Z и температура поверхности Земли.

Температура поверхности Земли в течение 100 последних лет возрастает. В этой связи, величина АЭП, согласно нашей модели, должна - уменьшаться. Действительно, как было недавно показано по наблюдениям в Шотландии и Шетланде, ежегодное снижение АЭП с 1920 до 1980, когда измерения прекратились (Harrison, 2002; Märcz, Harrison, 2003), было зарегистрировано (рис. 20-9). Авторы пытаются связать уменьшение величины АЭП с наблюдаемым уменьшением интенсивности ГКЛ, подчеркивая, тем не менее, существование отрицательной корреляции с глобальной температурой, как и следует из нашей модели (рис. 20-8). В последней обобщающей работе приведены уточненные данные по скорости уменьшения величины АЭП (Williams et al., 2005). Анализируя эти данные, приходим к заключению, что они противоречат идее грозового источника АЭП, согласно которому грозы происходят в регионах, близких к экватору с наиболее жарким климатом.

Рассмотрим подробнее, в контексте нашей модели, почему и каким образом, АЭП понижается с ростом температуры поверхности Земли. Согласно нашей модели величина E_Z пропорциональна массе водного конденсата облака, размеру частиц - капель воды, которые участвуют в разделении зарядов. Причем, чем больше размер частиц и больше их концентрация, тем эффективнее происходит разделение зарядов. Очевидна так же и высказанная выше идея относительно того, что чем скорость конденсации больше скорости испарения, тем больше размер частиц, капель, аэрозолей, т.е. тех частиц, которые переносят отрицательный заряд Земле. Сейчас нашей задачей будет оценить, почему АЭП уменьшается именно настолько, как это следует из данных наблюдений, приведенных на рис. 20-9. Из этого рисунка следует, что, начиная с 1920 г. До настоящего времени (в течение 80 лет; dt = 80), величина E_Z уменьшилась примерно вдвое: dE_Z/dt (E_Z') ≈ 2 (со скоростью ≈ 1 В/м ≈ 1% в год), в то время как температура поверхности Земли в этот же период времени выросла на 0.7 – 0.8 градуса (0.01° год$^{-1}$), что составляет, примерно, dT/dt (T') = 0.06, или 6 %. (где среднегодовая температура Земли T = 15 °C). Отношение скоростей изменения параметров T'/E' = 0.03. Для подтверждения модели нам следует получить теоретическую зависимость E_Z от температуры T, типа: $E_Z \sim \exp(-T)$, или: $M \sim \exp(-T)$, т.к. $E_Z \sim M$.

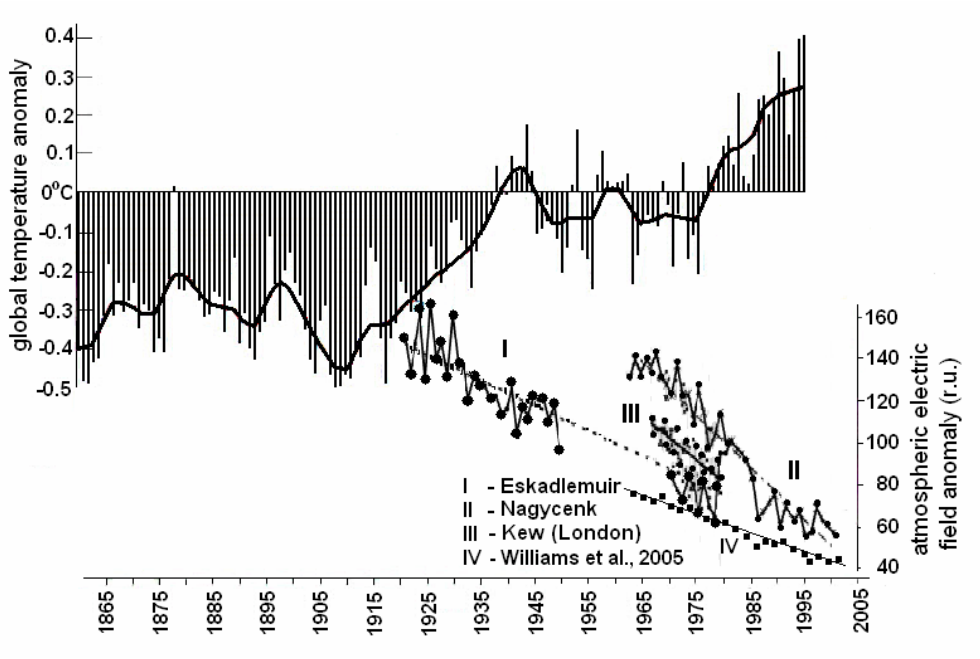


Рис. 20-9. Изменение глобальной температуры Земли. Уменьшение величины E_Z на обсерваториях Венгрии и Великобритании (Märcz , Harrison, 2003; Williams et al., 2005).

Водность атмосферы, иначе, интегральная масса образующихся в атмосфере капель, M определяется скоростью нуклеации, т.е. скоростью роста капли. Для оценки скорости нуклеации воспользуемся формулой, полученной Зельдовичем (1942):

$$M \sim nZ\,(4\pi rPK)/(2\pi\, m\, kT)^{1/2},$$

n – концентрация, r – радиус, m - масса ядер конденсации, т.е. «зародышей» капель, Z – фактор Зельдовича, P –давление, K – скорость конденсации $K \sim \exp(-T)$, k – постоянная Больцмана. Учитывая зависимость E_Z только от температуры, получаем:

$$M \sim T^{1/2} \exp(-T),$$ или, иначе:

$$E_Z \sim T^{1/2} \exp(-T).$$

Температура поверхности Земли возрастала в течение времени наблюдения t более или менее линейно со временем: $T = at$, тогда $T' = dT/dt = a$. Подставим это выражение в формулу для E_Z' и получим: $E_Z' \approx [\exp(-at)(1 + 2at)/a] \times (at)^{3/2}$, а отношение $T'/E' \approx 2a^{3/2}$, полагая $t = 1$. Как отмечалось, величина a, из наблюдений: $a = 0.06$, получаем отношение: $T'/E' = 0.03$, что можно рассматривать как подтверждение справедливости нашей модели.

Рассмотрим альтернативную модель, в которой уменьшение величины АЭП может быть, например, связано с вековым уменьшением интенсивности потока ГКЛ. Как будет показано ниже, при Форбуш понижениях, уменьшение E_Z происходит примерно в 10 раз больше (10 %), чем ГКЛ (1 %). Однако в этом случае понижение величины E_Z связано с уменьшением количества частиц самой низкоэнергетической частью общего потока ГКЛ, не принимающих участия в ионизации атмосферы. Принято считать, что максимум ионизации атмосферы приходится на область высот порядка 12-15 км, где наблюдается максимум ионизации атмосферы потоком ГКЛ, его вариации в процентах примерно соответствуют вариациям E_Z, что составляет ≈ 1 %. С другой стороны, 11-летние солнечные вариации ГКЛ составляют примерно 1 - 2 % в год. Наблюдения ГКЛ на нейтронных мониторах ведется около 50 лет, т.е. имеются данные по 5 циклам солнечной активности. Этих данных недостаточно для того, чтобы утвердительно ответить на вопрос существует ли тенденция векового уменьшения интенсивности потока ГКЛ. В следующей

главе 21 (рис. 21-11) показано, что концентрация Be-10 в течение последних 100 лет уменьшилась примерно в 3 раза, или на ~ 2 % в год. В такой ситуации правильнее считать, что у нас нет возможности ни уверенно принять альтернативную модель, ни её опровергнуть. В модели АЭП следует учитывать и изменения интенсивности потока ГКЛ.

20. 5. Унитарная вариация (Кривая Карнеги).

Особенности поведения E. Известно, что Земля заряжена отрицательно относительно окружающего её пространства. Принято считать, что положительный заряд сосредоточен в т.н. электросфере. Эту область пространства часто отождествляют с ионосферой. Напряженность электрического поля у поверхности Земли практически постоянна вдоль её поверхности, весьма незначительно меняется во времени и составляет (при выполнении условий "хорошей погоды": т.е. при отсутствии грозовой и интенсивной кучевой облачности, осадков, метели, поземки и других атмосферных явлений): $E \approx 120$ - 150 В/м над океаном и 75 - 125 В/м над материками. По сравнению с окружающим Землю воздухом, вещество Земли можно считать хорошим проводником. Это допущение позволяет рассчитать величину электрического заряда Земли: $Q = \varepsilon_o R^2 E$, где ε_o - диэлектрическая постоянная, R - земной радиус, а величина заряда оказывается равной: $Q \approx 6\times10^5$ кулон. Величина электрического поля $E = j/\sigma$ достаточно быстро уменьшается с высотой (см. рис. 20-10), что связано с возрастанием проводимости атмосферы σ, в то время как ток проводимости (j - плотность тока: $j \approx 10^{-12}$ А/м^2) от высоты практически не зависит. Интегрируя j по поверхности Земли, можно подсчитать полный "ток утечки" Земли: $I \approx 10^3$А. Полное сопротивление атмосферы $R^* \approx 230$ Ом. Используя известную формулу $Q = It$, можно оценить t - "время разрядки" конденсатора "Земля-ионосфера". Это время не превышает 10 минут. Каков же должен быть источник атмосферного электрического поля, чтобы поддерживать поле практически постоянным? Ответ на этот вопрос, несмотря на многочисленные попытки, до сих пор так и не получен.

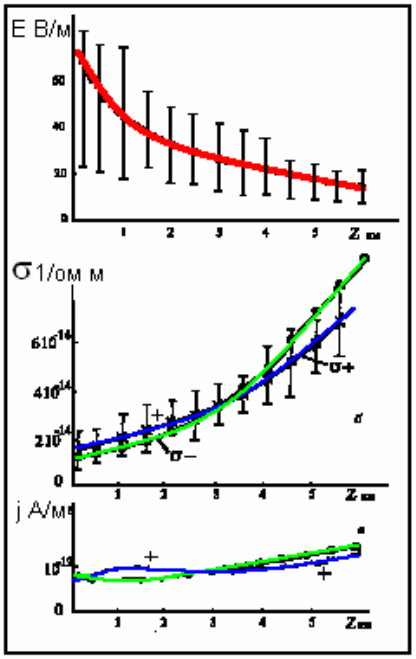


Рис. 20-10. Изменение поля E, проводимости атмосферы σ и плотности тока j с высотой z. (Рокитянский, 1981).

Проблема сохранения Землей электрического заряда считалась 100 лет тому назад одной из основных проблем геофизики (Швейдлер, 1936). За прошедшие годы

приоритеты физики Земли значительно изменились, но уровень решения этой проблемы остался таким же, близким к нулевому, как это было и в прошлом веке.

Потенциал между поверхностью Земли и электросферой (ионосферой) V определяется выражением:

$$V = \int_0^z E(h)\, dh, \qquad (20.\ 24)$$

где $E(h)$ - высотный профиль напряженности атмосферного электрического поля, полученный с помощью радиозондовых, аэростатных и ракетных измерений. Величина V составляет примерно 300 кВ, практически синхронно меняется на очень больших расстояниях и испытывает суточную и унитарную вариации.

***Унитарная вариация* (*Кривая Карнеги*)**. Наиболее интересным свойством атмосферного электричества является её т.н. унитарная вариация. Явление унитарной (UT) вариации заключается в том, что величина E по всей Земле одновременно возрастает на 20% в тот момент, когда в Лондоне (UT-мировое время) 19 часов (см. рис. 20-11-а). Общепринятое объяснение этого явления состоит в том, что именно в это время на Земле происходит максимальное количество гроз, представляется малоубедительным. Тем более что количество гроз максимально летом, а величина E летом - уменьшается (см. рис. 20-11-б). Грозы, как известно, чаще происходят ближе к экватору, в то время как наибольшие значения E наблюдаются на широтах авроральной зоны; к полюсам и к экватору величина E убывает (Апсен и др., 1988).

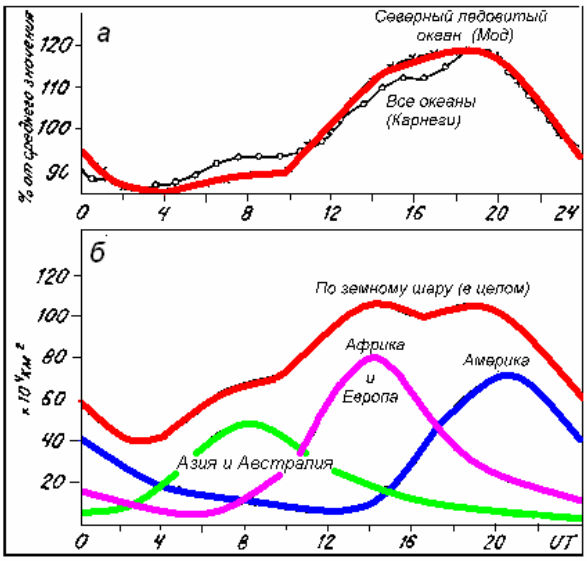


Рис. 20-11. Унитарная вариация E – а; распределение гроз по поверхности Земли – б.

Известна реакция гроз на солнечную активность, в частности, на вспышки. Частота гроз увеличивается на 20-70% на третьи-четвертые сутки после вспышки. Однако солнечные вспышки оказывают влияние и на атмосферное электричество. Аномально большие среднесуточные значения E, наблюдавшиеся в условиях хорошей погоды, как правило, совпадают с начальной стадией форбуш-понижения интенсивности космических лучей, непосредственно следующего за солнечной вспышкой. Таким образом, реакция гроз на вспышки проявляется с большим запаздыванием, чем реакция самого электрического поля. Аналогичные результаты наблюдений за поведением атмосферного электричества в момент разряда молнии приведены в известном популярном учебнике (Фейнман и др., 1966). Там говорится, что каждый удар молнии переносит примерно 20-30

кулон. Как быстро туча может восстановить потерю своего заряда? Измерения электрического поля, проведенные вдали от тучи, показали, что при разряде молнии наблюдается внезапный спад величины E, которая восстанавливается в течение примерно 5 секунд. Следовательно, в грозовой "машине" течет ток разделения зарядов порядка 4-6 ампер. В такой ситуации модель генерации E за счет разрядов молний представляется сомнительной.

Вариации E. Во временной зависимости E обнаружена 27-дневная вариация, связанная, по мнению авторов (ссылки в Апсен и др., 1988), со скоростью вращения Солнца и прохождением группы пятен через центральный солнечный меридиан. Там же отмечается, что по данным среднеширотной обсерватории, расположенной в Японии, корреляция E с потоком солнечного радиоизлучения не обнаружена.

E в океане. Интересный результат получен при измерении атмосферного электрического поля в океане. На среднеширотных станциях атмосферного электричества зафиксировать четкую унитарную вариацию практически не удается, т.к. "мешает" т.н. обменный слой высотой 2-3 км. Этот слой не оказывает такого сильного влияния на UT-вариацию E в океане (Гончаренко и др., 1992). Авторы сообщения обнаружили зависимость напряженности электрического поля атмосферы от глубины океана. Величина E уменьшалась с глубиной. Кроме этого, здесь же, в этой работе было обнаружено еще одно явление, связанное с атмосферным электричеством. Величина E уменьшалась на закате и увеличивалась на восходе. Авторы объясняют его образованием объемного заряда в процессе испарения воды с морской поверхности.

Carnegie curve в мезосфере. Авторы (Zadorozhny, Tyutin, 1997) анализировали измерения электрического поля на мезосферных высотах, которые проводились с использованием ракет в течение почти 20 лет. По мнению авторов, электрическое поле на высотах 50 – 70 км (величина $E \approx 1$ В/м) испытывает UT-вариацию, аналогичную той, которая обнаружена у приземного E. Этот результат находится в согласии с обнаруженной нами UT-вариацией в ионосфере.

Carnegie curve в ионосфере и магнитосфере. Унитарная вариация была обнаружена в F-слое ионосферы (Kuznetsov et. al., 1990; Плоткин и др., 1992; Kuznetsov et al., 1993) при обработке данных 26-ти ионосферных станций вертикального зондирования, расположенных в средней широте северного полушария. После отбора суточных вариаций на мировой сети станций, выяснилось, что при сравнительно простой их обработке, критическая частота F-слоя ионосферы (foF_2) при изменении мирового (универсального - UT) времени ведет себя аналогично величине атмосферного электрического поля E.

В этих работах применялось два метода. Первый - основан на наблюдаемом малом отличии ежесуточных зависимостей foF_2 на станциях с приблизительно одинаковой широтой. Входные данные исследуемой величины обычно представлены в зависимости от местного времени LT того часового пояса, где находится станция наблюдения. Станции расположены крайне неравномерно: в одних часовых поясах имеется несколько таких станций, в других, - их нет совсем. Поэтому, прежде всего, необходимо сопоставить каждому часовому поясу типичную для него зависимость исследуемой величины от местного времени LT. В тех часовых поясах, где было несколько станций, применялось обычное усреднение суточных зависимостей по станциям. Если в каком-либо часовом поясе, - станций наблюдения не оказывалось, использовалась линейная интерполяция зависимостей от LT, полученных в ближайших соседних часовых поясах. Справедливость подобной операции обусловлена небольшой величиной наблюдаемого долготного эффекта. Последний этап заключается в усреднении найденных зависимостей по часовым поясам для каждого момента мирового времени UT. Вследствие долготных вариаций и

UT-изменений суточного хода, вычисляемая на данной широте величина, не будет постоянной. По смыслу, это мгновенное среднее значение частоты foF_2 на данной широте. Описанный метод был использован впервые для получения унитарной вариации вертикального атмосферного электрического поля вблизи поверхности Земли (Парамонов, 1950), чем и объясняется использование нами термина, - унитарная вариация foF_2.

Однако не всегда можно подобрать обсерватории на фиксированной широте с долготным распределением, позволяющим применить линейную интерполяцию суточного хода по долготе. Был предложен другой метод (Плоткин и др., 1992; Kuznetsov et al., 1993) получения унитарной вариации с более слабыми требованиями к долготному распределению станций. При малом количестве станций авторы исходили из представления суточных зависимостей в виде суммы двух вариаций, одна из которых контролируется местным временем LT, а вторая, - мировым UT. Применяя для спокойных регулярных вариаций foF_2 спектральное представление данных в виде рядов Фурье, легко разделить методом наименьших квадратов наблюдаемые на станциях спектральные составляющие на части, контролируемые местным и мировым временем. Одновременное использование описанных методов повышает надежность определения унитарной вариации foF_2.

В работах (Плоткин и др., 1992; Kuznetsov et al., 1993) использовались данные мировой сети станций вертикального зондирования ионосферы в диапазоне широт 40°-50° N за сентябрь 1964 г. Результаты обработки ионосферных и геомагнитных данных по схеме, применявшейся для выделения унитарной вариации атмосферного электрического поля на континентах, показаны на рис. 20-12-a. Оказалось, что суточные пространственно-временные изменения критической частоты fo F_2-слоя ($fo \approx 9 \cdot 10^3 \, n_e^{1/2}$, n_e – концентрация электронов, $см^{-3}$) среднеширотной ионосферы, содержат поле унитарной вариации. UT вариация характеризуется в географической системе координат синхронным изменением foF_2 по мировому времени в течение суток на всех долготах круга заданной широты. Основное внимание было направлено на изучение интегральных характеристик суточной унитарной вариации foF_2. В качестве такой характеристики рассматривалось мгновенное средне долготное значение этой величины. Результаты расчетов показали наличие устойчивой вариации, зависящей от мирового времени, с максимумом в 19 UT и сходство унитарных вариаций ионосферного параметра foF_2 и атмосферного электрического поля E_Z, по данным большинства месяцев 1964 года. Расчеты были выполнены по данным 1963 и 1965 годов. Они показали близкие результаты. Полученная в средних широтах амплитуда унитарной вариации foF_2 имеет величину 0,5 МГц ($\Delta n_e/n_e \approx 10\%$) Она невелика и ее удается выделить лишь при общем спокойном состоянии ионосферы. Это обстоятельство позволяет предложить использовать данную величину как количественную характеристику глобального поведения ионосферы.

По методикам, пригодным для определения унитарных вариаций различных геофизических параметров, испытывающих суточные колебания, были обработаны данные среднеширотных станций (20°-60°N) мировой геомагнитной сети. Использовались усредненные обычным образом по спокойным дням вариации X-компоненты геомагнитного поля для нескольких месяцев 1964 года. Установлено, что существует унитарная вариация суточного изменения северной компоненты геомагнитного поля с величиной вариации ~ 1 нТл. К сожалению, в сравнении с ионосферной ситуацией, точность используемых в мировой геомагнитной сети станций наблюдения не столь велика, чтобы можно было достаточно надежно выделять обсуждаемую вариацию указанной амплитуды, но полученные результаты указывают на ее существование.

В (Кузнецов и др. 1998; Kuznetsov et al., 1998) была исследована UT-вариация частоты foF_2, в зависимости от солнечной активности и времени года. Установлено, что вид унитарной вариации foF_2 в годы минимумов и максимумов (рис. 20-12-b) солнечной

активности существенно отличается. В годы минимумов она имеет вид, похожий на унитарную вариацию атмосферного электрического поля с максимумом в 19 UT (рис. 20-12-а). Сезонные изменения унитарной вариации foF_2 в годы минимума очень незначительны (рис. 20-12-с), тем не менее, они повторяют аналогичные кривые, полученные для UT E_Z. В годы максимума солнечной активности вид унитарной вариации foF_2 существенно изменяется (рис. 20-12-б). Можно предположить, что в спокойных условиях, в годы минимума солнечной активности UT E_Z и UT – вариация ионосферы и магнитосферы имеют общую природу.

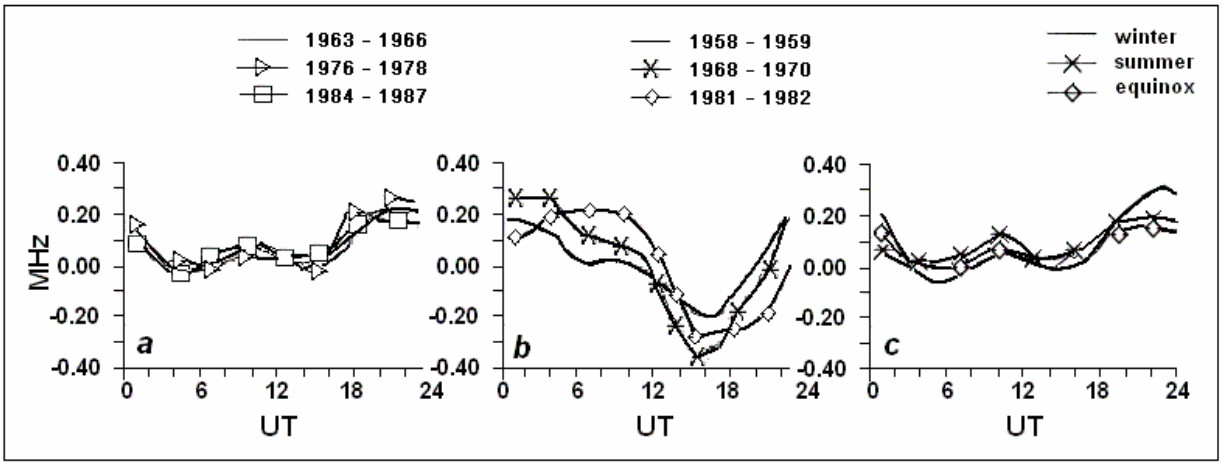


Рис. 20-12.Унитарная вариация foF_2, усредненная за годы минимумов (a), максимумов (b) для трех циклов солнечной активности, и в зависимости от сезона (c) (Кузнецов и др., 1998; Kuznetsov et al., 1998).

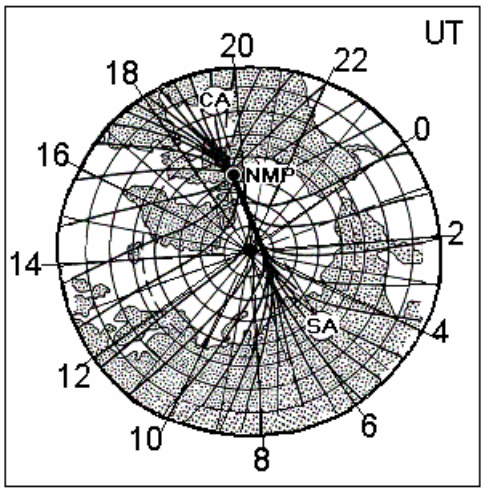


Рис. 20-13. Структура магнитных силовых линий в районе северного магнитного полюса (NMP) и глобальных магнитных аномалий: Канадской (CA) и Сибирской (SA).

Необычное поведение слоя F_2 на высоких широтах, в частности, образование широтной зоны пониженной ионизации («провала»), идущей параллельно зоне полярных сияний, где наблюдается более высокая степень ионизации, хорошо известно и изучено. Всё это говорит о том, что помимо солнечного излучения изменения электронной концентрации, а, следовательно, и критической частоты fo в F_2-слое определяются рядом геофизических факторов. Одним их таких факторов может быть и наличие ГМА,

являющихся причиной, по нашей модели, возникновения UT-вариации E_Z. В общепринятой интерпретации, это явление адекватно факту несовпадения полюсов: географического и магнитного. На рис. 20-13 показано распределение магнитных силовых линий в районе северного полюса. Можно видеть, что в области изучения вариаций ионосферы на широте ~ 50° N (внешний овал на рис. 20-13) плотность магнитных силовых линий возрастает в районах ГМА, что в принятой нами шкале соответствует ~ 7 и 19 UT. Как известно, ионосферная плазма в приполярных районах дрейфует вдоль магнитных силовых линий, и чем гуще силовые линии, тем выше плотность плазмы. Эффекты влияния геомагнитного поля на концентрацию электронов в F_2 слое рассмотрены, например, в (Акасофу, Чепмен, 1974).

Θ-аврора и унитарная вариация. Более 100 лет тому назад стало известно, что полярные сияния чаще происходят в районе Северного полюса, причем, даже не в районе геомагнитного полюса. Они сосредоточены в так называемом овале полярных сияний, расположенном в районе Северного полярного круга (67° с.ш.). В Канаде овал проходит несколько южнее и приурочен району Канадской магнитной аномалии. В Сибири овал располагается несколько северней 67°, и так же приурочен к местоположению Сибирской магнитной аномалии. Авроральная зона в южном полушарии проходит вдоль побережья Антарктиды, и так же как в северном полушарии, «касается» Антарктической глобальной аномалии (см. рис. 20-14).

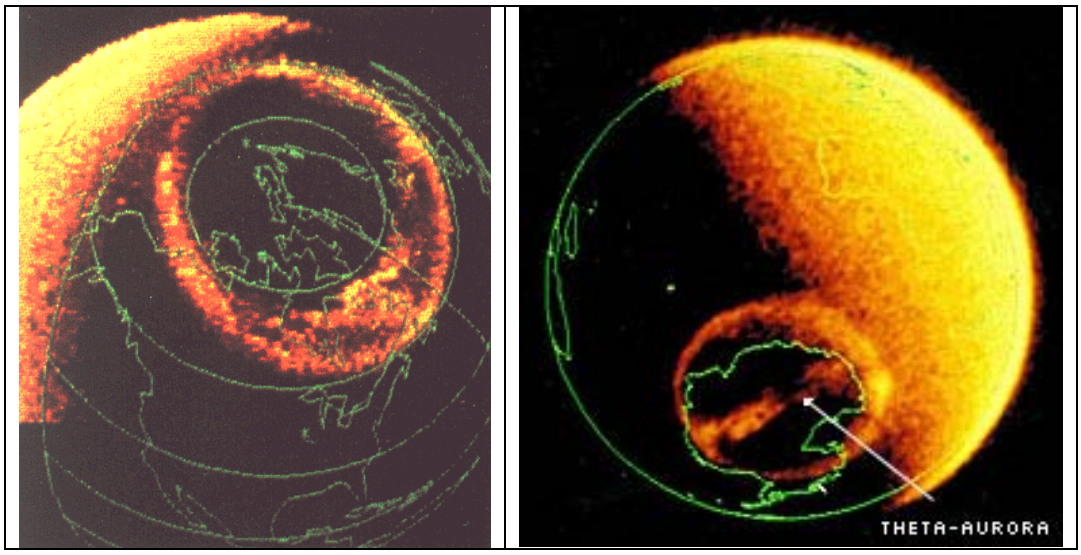


Рис. 20-14. Авроральные зоны в северном и южном полушариях. Яркие светящиеся образования совпадают с Канадской (слева) и Антарктической (справа) глобальными магнитными аномалиями.

До недавнего времени исследователей устраивало объяснение возможной причины появления овала полярных сияний (ПО), предложенное С.И.Акасофу (Акасофу, Чепмен, 1974). Однако к настоящему моменту имеются основания полагать, что результаты наблюдений полярного овала с помощью двух спутников Dynamics Explorer: DE-1 и DE-2, скорее не подтверждают модель Акасофу. Во время проведения эксперимента, спутник DE-1 производил комплекс наблюдений ПО с высоты 3-4 земных радиусов, в то время как спутник DE-2, одновременно с первым, - вел аналогичные наблюдения с высоты 500 – 800 км (рис. 20-15).

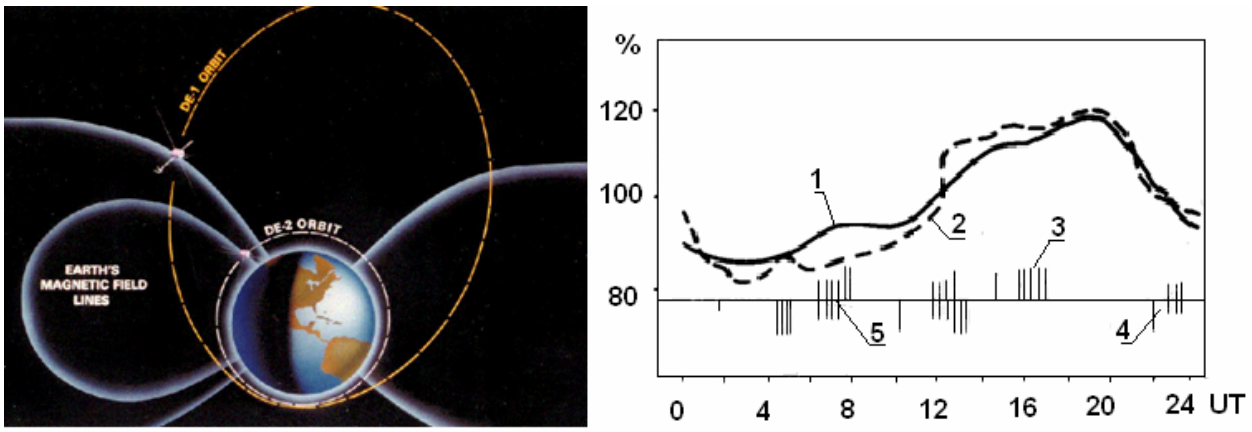


Рис. 20-15. Схема наблюдений спутников DE-1 и DE-2. Унитарная вариация *E* (1), изменение ионосферного потенциала (2) (Марксон, 1982), поведение полярной перемычки (дуги) Θ-авроры: 3 - устойчивая дуга, 4 – дуга отсутствует, 5 – наличие дуги неоднозначно (Кузнецов и др., 1989).

Результаты, по одновременному наблюдению за полярными овалами северного и южного полушарий, полученные в 2001 г. (Østgaard, et al., 2003), подтвердили наши предположения. Как следует из работы (Østgaard, et al., 2003), наблюдения проводились в течение времени от 16 до 20 UT, т.е. соответствовали максимальному значению *E* во время UT-вариации (19 UT). При этом в северном секторе авроральной зоны перемычка Θ-авроры наблюдалась, а в южном – нет. Как можно видеть из рис.20-16, перемычка возникает в южном полярном овале в момент времени, когда на Земле ~ 12 LT. На картинке полдень приходится примерно на 120º E, что соответствует ~ 8 UT. Этот факт ещё раз подтверждает, что атмосферное электрическое поле Земли может быть связано с явлениями, происходящими в авроральных зонах.

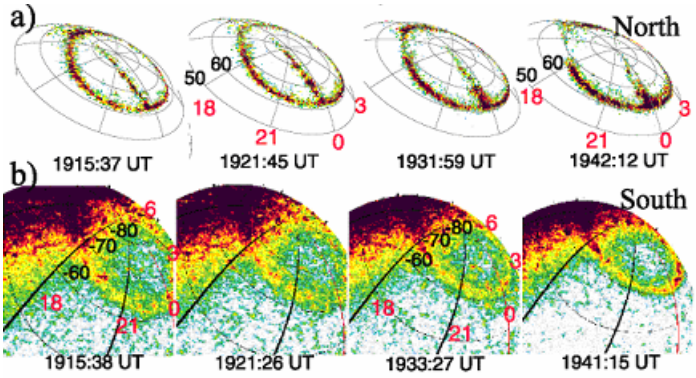


Рис. 20-16. Одновременное наблюдение авроральных зон северного (a) и южного (b) полушарий с помощью ультрафиолетовых (~ 130 нм) камер. Перемычка видна в северной полярной зоне и не наблюдается, - в южной. (Østgaard, et al., 2003).

Модель унитарной вариации. Как отмечалось, обсуждаемая модель АЭП основана на том, что разделение зарядов происходит не столько в грозовом облаке, что очевидно, но и в атмосфере «хорошей погоды». Подтверждением правомерности модели атмосферного электричества могло бы служить объяснение природы Carnegie curve (CC) АЭП, - Universal diurnal variation (UD-variation). Предложим модель UT-вариации АЭП без привлечения механизма, связанного с частотой гроз*, якобы максимальной на Африканском материке. Напомним, что суть Carnegie curve АЭП состоит в том, что величина поля возрастает примерно на 20 % одновременно, на всей Земле, в период

времени, когда в Лондоне 19 часов (UT = 19). Заметим, что в это время Земля ориентирована относительно Солнца таким образом, что полдень приходится в район Канады, точнее, Канадской магнитной аномалии, т.е. области, в которой горизонтальная компонента геомагнитного поля *H* - минимальна. Второй максимум кривой СС приходится на другой минимум величины компоненты *H*, который соответствует другой глобальной магнитной аномалии (ГМА) – Восточно-Сибирской.

* Согласно данным по частоте гроз, представленным на карте, отображенной на сайте: http://flash.ess.washington.edu/TOGA_network_global_maps.htm Африка вовсе не является мировым центром гроз. Частота появления гроз значительно выше в Индонезии и Южной Америке. Постоянный мониторинг данных, приводимых на этом сайте, убедительно показывает, что вообще нет смысла говорить о каком-либо мировом центре гроз.

Нашу модель СС АЭП иллюстрируем рис. 20-17-a, где показана плотность распределения ГКЛ, измеренная с помощью космического аппарата UoSAT, в период с 09.1988 по 05.1992 (Glassmeier et al., 2002). Для удобства представления, карта, показывающая плотность ГКЛ, перевернута таким образом, что северный полюс находится внизу, а восточная часть карты слева, - по ходу вращения Земли. Северное полушарие на рис. 20-17-a выбрано потому, что здесь наблюдается наибольшая долготная анизотропия ГКЛ. Несмотря на то, что в южном полушарии расположена Бразильская (Южно-Атлантическая) магнитная аномалия, в зоне влияния которой регистрируется огромная плотность заряженных частиц. Однако принято считать, что в районе БМА заряженные частицы «высыпаются» из радиационного пояса. Спектр этих частиц значительно «мягче» спектра тех ГКЛ, которые проникают в нижнюю атмосферу и там определяют концентрацию электрических зарядов. Частицы высокой энергии, регистрируемые в районе Бразильской ГМА, участия в притоке зарядов в нижнюю атмосферу не принимают и нами не учитываются. Распределение плотности ГКЛ в области южных полярных широт не имеет такой ярко выраженной анизотропии, как это наблюдается в северных широтах. На этом основании нами используется только северная часть карты. На рис. 20-17-b приведена карта горизонтальной, H-компоненты геомагнитного поля, расположенная аналогично карте рис. 20-17-a. Можно наблюдать пространственную корреляцию: области понижения величины H соответствуют областям, где наблюдается наибольшая концентрация ГКЛ, что очевидно.

Определим шкалу времени в нашей модели. Будем полагать, что ноль часов (0 UT) соответствует 180° меридиану, причем именно тогда, когда здесь полдень по местному времени. В такой шкале 19 UT соответствует полуденному времени в районе Канадской ГМА, региону Земли, в котором в атмосферу попадает максимальное количество ГКЛ, модифицированных солнечным ветром. Так как, когда в Лондоне 19 часов, как показано на рис. 20-17-c, Земля ориентирована таким образом, что линия 10 мкТл H-компоненты геомагнитного поля занимает самые низкие широты, а это означает, что на Землю попадает максимальное количество ГКЛ, обладающих минимально возможной энергией (самая низкая энергия обрезания). Очевидно, что при этом количество заряженных частиц в нижней атмосфере заметно возрастает, что собственно и приводит к увеличению атмосферного электрического поля. На рис. 20-17-c показана унитарная вариация электрического поля. Можно видеть, что изолиния H-компоненты геомагнитного поля 10 мкТл (выделена черным цветом, север – внизу) и UT-вариация атмосферного электрического поля *E* – практически совпадают. Эти факты положены в основу нашей модели.

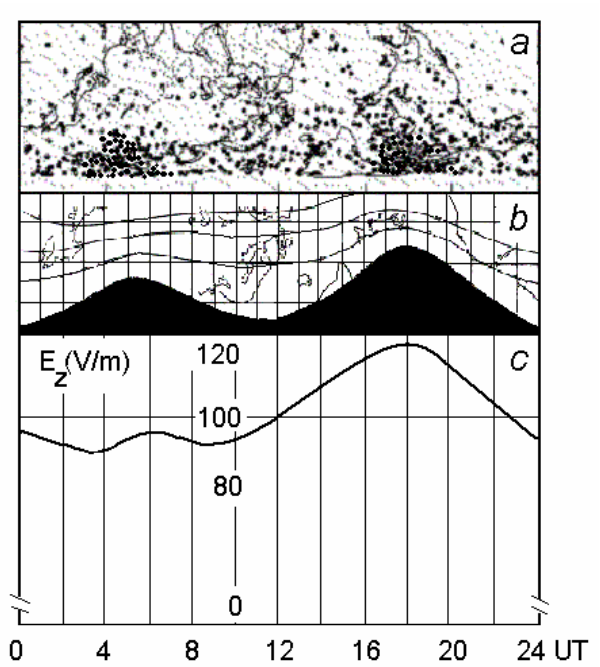


Рис. 20-17: *a* – Распределение интенсивности космических лучей, полученное с помощью космического аппарата UoSAT в период с 09.1988 по 05.1992 (Glassmeier et al., 2002) в северном полушарии (север – внизу); *b* - Изолиния величины H-компоненты геомагнитного поля 10 мкТл (выделена черным цветом, север – внизу); *c* –UT-вариация АЭП.

Надо сказать, что эта идея совсем не нова. Аналогичную мысль высказал много лет тому назад Э. Швейдлер, который писал: « .. время вступления в максимум (19 часов по Гринвичу) совпадает приблизительно с полуднем меридиана (96 º з.д.), проходящего через магнитный полюс северного полушария» (Швейдлер, 1936). Северный магнитный полюс был близок в то время к Канадской глобальной магнитной аномалии.

Выясним, существуют ли экспериментальные факты, касающиеся UT-вариации, свидетельствующие в пользу нашей модели? Действительно, такие факты известны, сошлемся, например, на результаты наблюдений сезонного хода E_Z в Антарктиде, на станции Восток, в течение 1998 г. (Corney, et al., 2003). Результаты, полученные авторами этого сообщения (данные представлены в относительных единицах), приведены на рис. 20-18 (1). Авторы измеряли унитарную вариацию в течение 1998 года спокойного Солнца и отобрали всего 127 дней «хорошей погоды»: зимой (ноябрь, декабрь, январь и февраль) - 44; летом (май, июнь, июль и август) - 33 и 50 - в равноденствие (март, апрель, сентябрь и октябрь). Как и следовало ожидать, электрическое поле в дни равноденствий (equinox) вело себя таким же образом, что и в среднем в году. Максимальные значения поля E_Z были примерно одинаковы и от сезона особенно не зависели. Кривые (рис. 20-18.1) удобнее различать по относительным величинам поля в периоды второго максимума: летом, это 0.9, в дни равноденствия – 0.8, зимой – 0.7.

Рассмотрим модель взаимодействия ГКЛ (на рис. 20-18.2 - показаны стрелками), с магнитным полем Земли. В дипольном геомагнитном поле ГКЛ, модифицированные Солнцем, достигнут Земли преимущественно на её геомагнитных полюсах, где горизонтальная компонента равна нулю. Именно в районах полюсов должна наблюдаться самая высокая концентрация электрических зарядов.

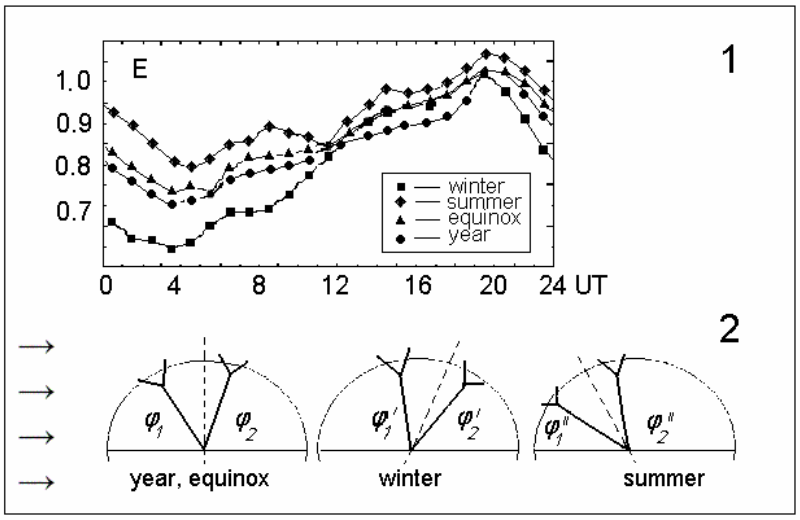


Рис. 20-18. Усредненная величина атмосферного электрического поля (в отн. ед.), зарегистрированная на станции Восток (Антарктида) в течение 1998 г. (Corney, et al., 2003) [1]. Ориентация Земли относительно направления СКЛ (стрелки) в равноденствие, зимой и летом. Углы и «воронки» соответствуют ГМА [2]: Канадская ГМА находится на широте $\varphi_1 \approx 55°$ N, Сибирская - $\varphi_2 \approx 63°$ N.

Четыре глобальных магнитных аномалии Земли оказывают существенное влияние на структуру геомагнитного поля, две из них расположены в северном полушарии: это Канадская и Сибирская магнитные аномалии. Координаты Канадской ГМА: широта $\varphi_1 \approx 55°$ N, долгота $\lambda \approx -100°$; координаты Сибирской аномалии: $\varphi_2 \approx 63°$ N, долгота $\lambda \approx 120°$. Эти ГМА определяют конфигурацию геомагнитного поля в северном полушарии, в частности, - «провал» к югу изолинии Н-компоненты, изображенный в верхней части рис. 20-17. Представим себе схему, в которой высокоэнергичные протоны ГКЛ попадают в атмосферу Земли через ГМА, как своеобразные стоки - «воронки» (рис. 20-18.2). Обозначим широту Канадской ГМА – φ_1, Сибирской – φ_2. Плотность потока частиц ГКЛ, попадающих в геомагнитную «воронку», пропорциональна широте положения ГМА: $\sim cos\ \varphi$, где φ – широта. Повторим, что наибольшее количество ГКЛ попадает в атмосферу Земли в районах полярных широт, где $\varphi \rightarrow 90°$. Пользуясь принятым правилом, оценим соотношение интенсивностей потоков ГКЛ (обозначим его A) в районе Канадской ГМА, соответствующей 19 UT и Сибирской ГМА, соответствующей 7 UT.

Учтем, что положение Земли относительно Солнца в течение года меняется на угол ± 23°. Среднегодовое значение A равно отношению интенсивностей потоков ГКЛ в периоды весеннего и осеннего равноденствий, величина $A \sim cos\ \varphi_1/cos\ \varphi_2 = E = 0.8$, для зимы $A \sim cos\ (\varphi'_1 + 23)/cos\ (\varphi'_2 + 23) = E = 0.7$, и лета $A \sim cos\ (\varphi''_1 - 23)/cos\ (\varphi''_2 - 23) = E = 0.9$, Полученные значения практически совпадают с данными, по отношениям E, приведенными на рис. 20-18.1, что может говорить об адекватности модели.

В поддержку модели можно сослаться на результаты работы (Tinsley, 2000), где показано, что в моменты Форбуш понижения потока ГКЛ синхронно уменьшается и величина E_Z. Этот вопрос подробнее будет рассмотрен ниже.

20. 6. Атмосферное электричество во время геомагнитных бурь.

Форбуш-понижения в АЭП. Магнитные бури и ионосферные возмущения находят отражение в поведении атмосферного электричества «хорошей погоды». Эта проблема интенсивно изучается, однако, она выходит из круга обсуждаемых нами здесь вопросов. Остановимся лишь на эффектах, демонстрирующих влияние на атмосферное электричество - ГКЛ и других заряженных частиц, попадающих в атмосферу Земли во

время геомагнитных бурь. Как отмечалось выше, основной вопрос, рассматриваемый в этой работе, состоит в выяснении причины, почему и каким образом Земля сохраняет свой заряд неизменным? В контексте с этой темой, нас интересует, какое влияние на заряд Земли оказывают заряженные частицы, попадающие в атмосферу. Казалось бы, присутствие таких частиц приводит к дополнительной ионизации, иначе, к увеличению электропроводности σ и, т.к. $E \sim 1/\sigma$, - к уменьшению величины АЭП. И. соответственно, наоборот, - в моменты Форбуш понижений в ГКЛ, АЭП должно было бы возрастать (Rycroft, et al., 2000; Ogawa, 1985).

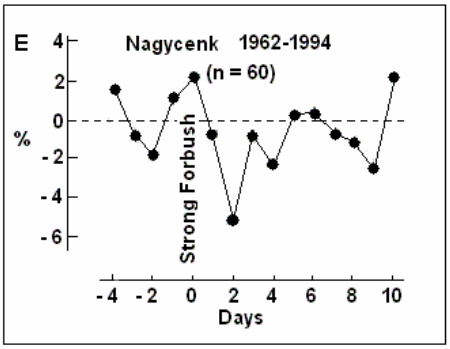


Рис. 20-19. Изменения атмосферного электрического поля во время Форбуш-понижения галактических космических лучей (Märcz, 1997).

Исследованию этого явления посвящена работа (Märcz, 1997), в которой автор в течение 1962-1994 гг. регистрировал поведение АЭП в моменты Форбуш понижений ГКЛ. Наблюдения велись на венгерской обсерватории Nagycenk. Оказалось, что в моменты сильных Форбуш понижений, электрическое поле уменьшалось на ~ 5 - 10 % (рис. 20-19), а затем восстанавливалось до прежнего уровня в течение 5 – 10 дней. Полученные автором результаты отличались от всех предшествующих, но, как можно понять из статьи (Märcz, 1997), исследования проведены очень тщательно и вполне заслуживают доверия. Автор приходит к выводу, что в рамках существующих представлений о глобальном атмосферном электрическом контуре (ГАЭК), объяснить поведение E не удается: «маловероятно, что изменения проводимости и потока солнечных частиц одни могут объяснить глобальные изменения электрического поля». Кроме этого, автор приходит к важному для нашей модели выводу: «электрическое поле может одновременно находиться под влиянием других факторов, которые более эффективны в другом месте в атмосфере, и действуют посредством изменения параметров ГАЭК. Таким образом, реакция АЭП к солнечно-земным событиям не всегда однозначна».

Модель Форбуш-эффекта в АЭП. Основной вопрос, который мы задаем в этой главе, состоит в выяснении физики АЭП, в частности, сохранения величины поля практически постоянной на всей Земле, или переформулировав проблему, выяснении причины, почему и каким образом Земля сохраняет свой заряд неизменным? В контексте с этой темой, нас интересует, какое влияние на заряд Земли оказывают заряженные частицы, попадающие в атмосферу. Казалось бы, присутствие таких частиц приводит к дополнительной ионизации, иначе, к увеличению электропроводности σ и, т.к. $E \sim 1/\sigma$, - к уменьшению величины АЭП. С другой стороны, как следует из нашей модели, ГКЛ вносят в атмосферу Земли электрический заряд, который, разделяясь падающими на Землю каплями, является источником поля E. Таким образом, должно наблюдаться увеличение поля E при увеличении потока ГКЛ.

Наблюдения АЭП проведенные на Камчатке показали, что если Форбуш понижения в ГКЛ выделяются очень наглядно, то эти же эффекты в АЭП наблюдать значительно сложнее (см. рис. 20-20). Дело в том, что на атмосферное электричество, т.е.

на поведение E_Z во времени оказывают процессы, происходящие в т.н. обменном слое атмосферы и, в частности, большую роль играют резкие порывы ветра и другие метеопараметры. Фазу восстановления поля E_Z на Камчатке проследить не всегда удается, т.к. ситуация, когда 5 дней «хорошей погоды» идут подряд, - бывает довольно редко. Тем не менее, как следует из рис. 20-20, понижение величины E_Z синхронно с Форбуш понижением ГКЛ наблюдается достаточно однозначно. Задержка начала понижения величины АЭП в (Märcz, 1997) связана, по всей видимости, со временем осреднения данных.

Детальный анализ совпадений времени начала Форбуш понижения интенсивности ГКЛ и временной зависимости уменьшения интенсивности потока нейтронов с явлениями в АЭП показал, что действительно Форбуш понижение интенсивности потока ГКЛ совпадает по времени с началом понижения величины E_Z. Анализу были подвергнуты данные записи E_Z, с минутным осреднением, полученные на обсерватории Паратунка с 1998 г. по 2006 г.. Сначала, по данным супермониторов Москвы и Магадана отбирались дни, когда происходили Форбуш понижения интенсивности ГКЛ. Затем из данных E_Z выделялись дни «хорошей погоды» для АЭП, совпадающие с датами Форбуш понижений интенсивности ГКЛ, и дни, когда регистратор E_Z работал нормально. Из данных, полученных в течение семи лет регистрации E_Z, на станции Паратунка, таких совпадений оказалось чуть больше 20. Анализ данных приведенных на рис. 20-20 показывает, что уменьшение величины E_Z начинается практически одновременно с началом Форбуш понижения, задержка сигнала E_Z относительно Форбуш понижения не более двух часов. Скорости понижения величин интенсивности потока ГКЛ и АЭП практически совпадают.

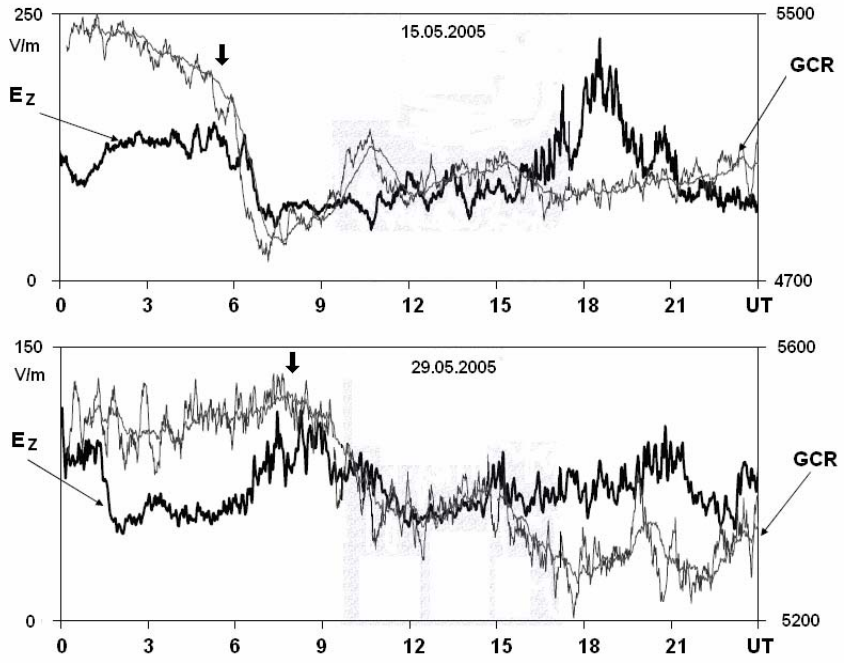


Рис. 20-20. Изменение атмосферного электрического поля *E* в момент Форбуш понижения и восстановление величины *E* в последующие дни (Kuznetsov, Cherneva, 2004).

Несомненный интерес представляет выяснить, насколько связаны понижения E_Z и ГКЛ по амплитуде, т. е, иначе, пропорционально ли изменяется величина E_Z с понижением интенсивности потока ГКЛ? Этот вопрос был специально исследован; отобраны 18 событий, на которых понижения ГКЛ и E_Z фиксировались очень четко. Данные приведены на рис. 20-21-a, где показан усредненный временной ход ГКЛ и E_Z во время Форбуш понижения, рис. 20-21-b показывает, что наблюдается линейная зависимость понижений ГКЛ и АЭП, причем, процент понижения величины E_Z примерно

в 10 раз превышает процент понижения интенсивности ГКЛ. Модель АЭП, в которой предполагается взаимосвязь E_Z с ГКЛ, должна учитывать и находить объяснение этому факту.

Объяснение будем искать в нашей модели АЭП. Вспомним, что в работах (Ermakov et al., 1997; Ермаков, Стожков, 2004) экспериментально установлено, что ионизация атмосферного воздуха космическими лучами q происходит в соответствии с линейным уравнением баланса ионов: $q = \beta N$, а не в состоянии с обычно используемым квадратичным уравнением: $q = \alpha N^2$. Здесь α – коэффициент объемной рекомбинации, β – коэффициент линейной рекомбинации, эти коэффициенты различны по величине и по размерности. Обнаруженная зависимость указывает на то, что в действительности связь между концентрацией ионов в атмосфере и потоком космических лучей является более сильной ($N \sim P$), чем предполагалось ранее ($N \sim P^{1/2}$) (см. рис. 20-21-c). Этот подход укрепляет уверенность в том, что ГКЛ оказывают решающее влияние на АЭП и ток проводимости атмосферы j. В качестве иллюстрации сказанному приведем рис. 20-21-b, на котором можно видеть устойчивую корреляцию между потоком ГКЛ - N и током j (dQ/dt).

Из наблюдений мы получили: изменения E (атмосферное электрическое поле) в момент Фобуш понижений к вариациям P (интенсивность потока КЛ): $dE/E \approx 10\, dP/P$, т.к. $E \sim N$, то $dN/N \approx 10\, dP/P$, иначе $N \sim P$.

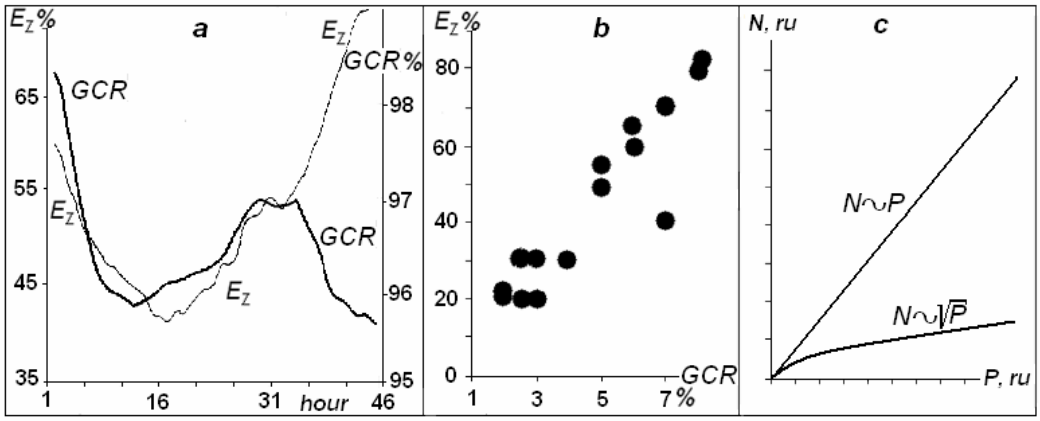


Рис. 20-21. Время Форбуш понижений в ГКЛ и E_Z (из наших наблюдений) - *a*; Соотношение величин понижений - *b*; Зависимости между N и P- *c*.

Обсудим полученный результат в контексте нашей модели. Как отсюда следует, в атмосфере происходят одновременно два процесса: один из них, это возникновение электрического поля за счет разделения заряда падающими каплями, а другой, состоит в том, что присутствующие в атмосфере легкие ионы, не захваченные каплями, являются носителями атмосферного электрического тока j за счет собственной подвижности u: $j = n^+ eu$. В первом процессе тоже «течет ток», обозначим его j_i. Этот «ток» представляет собой перемещение отрицательных зарядов к Земле и положительных – к ионосфере. Будем считать его внутренним током источника. Заметим, что наша модель в высокой степени согласована: внутреннее сопротивление источника равно (или меньше) сопротивлению внешней цепи атмосферного тока. Это условие соответствует, как мы отмечали выше: $I = I_i$ (I - ток утечки, I_i – внутренний ток источника), однако, это совсем не означает, что $j = j_i$, т.е. должно соблюдаться равенство плотностей тока.

В такой ситуации, естественно, возникает вопрос, известно ли что-нибудь о внутреннем токе источника, т.е., иначе, имеются ли данные о наличии «другого тока» в атмосфере, кроме $j = n^+ eu$? Это принципиальный момент нашей модели. Оговоримся, что

современные методы регистрации АЭП и проводимости σ обнаружить I_i не смогут, т.к. тяжелых ионов и заряженных аэрозолей не регистрируют. Принято считать, что ток утечки I, - это дрейф легких ионов в поле E. Модель АЭП окажется правдоподобной в том случае, если удастся выявить ток источника, привлекая любые, в том числе непрямые методы обнаружения. (Ниже мы попытаемся связать ток источника АЭП с токами Шмидта-Бауэра).

Корреляция показаний риометра и величины E.

Известно, что ионосферное поглощение резко возрастает после солнечных вспышек во время магнитных бурь и высыпания заряженных частиц. При этом АЭП понижается, после чего наблюдается увеличение E в течение первых – четвертых суток после максимума ионосферного поглощения. Связь между вариациями вертикальной компоненты атмосферного электричества $E(t)$ и ионосферным поглощением исследована в (Märcz, 1976). Недостатком этих исследований является то, что анализ реакции атмосферного электричества и риометрического поглощения проводился по среднесуточным значениям. Такой подход не позволяет с точностью, меньшей, чем сутки, оценить время запаздывания реакции глобальной атмосферно-электрической цепи на солнечную вспышку.

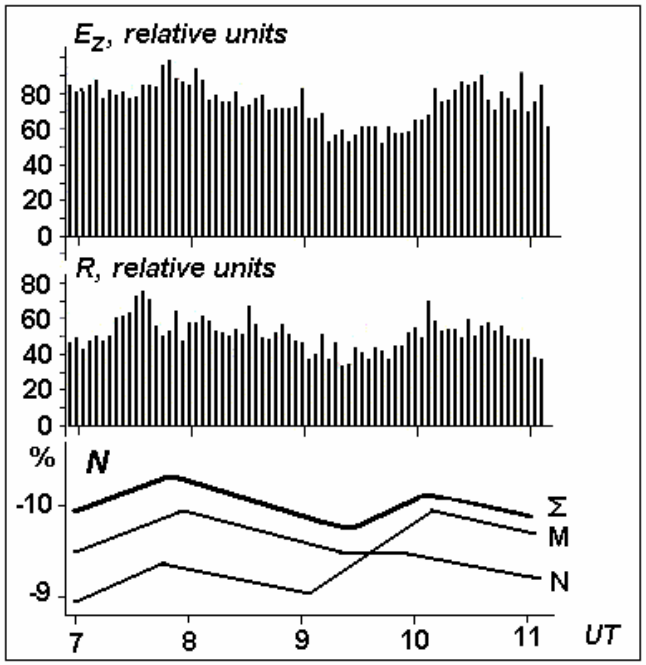


Рис. 20-22. Вариации величины вертикальной компоненты АЭП E_z, поглощения солнечного радиоизлучения R (Кузнецов и др. 1991) и данные нейтронных супермониторов Новосибирска (N), Москвы (M) и сумма обеих мониторов (Σ).

Исследования связи АЭП с риометрическим поглощением проведены (декабрь 1988 - апрель 1989 гг.) в Сибири на среднеширотной станции «Ключи» (Новосибирск). В работе (Кузнецов и др. 1991) обсуждаются обнаруженные случаи корреляции между вариациями величины E и показаниями риометра (R). В течение времени наблюдений E и R, зарегистрировано 19 событий такой корреляции, произошедших в дни повышенной геомагнитной активности. Рисунок 20-22 показывает записи сигналов поля E, поглощения риометра и данные нейтронных супермониторов. В работе оценена нормированная функция взаимной корреляции между центрированными случайными массивами данных

риометра и АЭП, в предположении их стационарности и эргодичности. Максимальная величина функции достигала 0.7, максимум функции сдвинут по времени таким образом, что показания риометра опережают данные по электрическому полю на 10 и более минут. Во время этого измерения 1 декабря проходила достаточно сильная буря, днем раньше (30 ноября в 16 UT) имело место высыпание частиц, т.к. индекс *Dst* = 111 нТл. В день, когда проводились измерения, индекс *Dst* уменьшился и составлял 60-80 нТл. На следующий день (2 декабря) буря практически прекратилась, корреляции *E* и *R* уже не наблюдалось.

При проведении этого цикла наблюдений выделена реакция АЭП на солнечные вспышки (Кузнецов и др. 1991). Сразу после солнечной вспышки величина *E* возрастала примерно на 20%, затем уменьшалась (относительно "нормы") более чем на 25% и затем, восстанавливалась в течение последующих 6-7 суток. Упомянем, что аналогичные исследования проводились и другими группами ученых. Например, одно из первых экспериментальных свидетельств о влиянии магнитосферных возмущений на величину *E* было получено (Freir, 1967) в высокоширотной зоне аномальных возмущений. Детальный анализ проблемы (Бендилет и др., 1985) показал, что знак и величина *E* зависят от местного магнитного времени и расположения станции наблюдений относительно авроральной зоны. В работе (Sao, 1967) исследовалась корреляция градиента потенциала с солнечным излучением на частоте 1 ГГц. Наличие корреляции отмечалось только в полярном регионе и в усредненных суточных данных. На среднеширотной магнитной обсерватории корреляции не обнаружено. На среднеширотной магнитной обсерватории Свидер (Польша) во время главной фазы сильной магнитной бури 30 октября 2003 г. (Dst = 345 нТл) было обнаружено сильное понижение величины АЭП и корреляция этого явления с поглощением космического радиошума риометром, расположенном в Норвегии, в субавроральной зоне (Никифорова и др. 2005). Согласно данным по наземным наблюдениям космических лучей (Белов и др. 2005) в это время происходило сильное Форбуш понижение, доходившее до 25%. Эти факты свидетельствуют в пользу нашей модели АЭП. Перечислим последовательность событий, связывающих АЭП с солнечной вспышкой и следующие за ней события в магнитосфере и атмосфере:

- вспышка на Солнце – УФ в атмосфере, дополнительная ионизация - усиление АЭП - усиление потока плазмы от Солнца - модуляция ГКЛ - Форбуш понижение - уменьшение АЭП - выпадение заряженных частиц из РП и восстановление заряда - восстановление АЭП.

Последовательность наблюдаемых событий подтверждает нашу модель АЭП. В цепи рассуждений остается неясным один вопрос: существует ли стационарный ток источника, направленный «снизу – вверх», компенсирующий атмосферный ток утечки?

20. 7. Молнии и спрайты.

Обсуждая проблему атмосферного электричества и связи его с разрядами молний, нельзя не остановиться на недавно обнаруженном явлении электрических разрядов, аналогичных разрядам молний, но направленных не между облаками, и не с облаков на Землю, а вверх, к ионосфере и электросфере. Эти разряды получили название спрайтов (sprite, в переводе, - эльф). Первая информация о спрайтах относится к 1993 г. С тех пор наблюдается нарастающая лавина результатов их наблюдений. Например, летом 1996 г. 50 специалистов по атмосферному электричеству из США, Японии и Новой Зеландии провели наблюдения на метеостанциях, расположенных в Скалистых горах (США), и зарегистрировали 1127 случаев появления высотных молний. Кроме спрайтов, обнаруженных между 50 и 90 км и обладающих длительностью 0.001 с, похожие явления возникали на больших высотах и, более короткие, чем спрайты. Кроме этого, на существенно меньших высотах обнаружены светящиеся разряды, получившие название Blue Jets (синие струи). Синие струи, в отличие от спрайтов, исходят прямо из верхней части облака. Эти наблюдения были продолжены в 1997 и 1998 гг. с помощью специально

изготовленного прибора, содержащего 10 фотоумножителей, направленных в различные участки неба. Были обнаружены очень короткие спрайты, длительностью не более 30 мкс, следующие через 150 мкс после разряда обычной молнии. Специалисты считают, что возникновение спрайта обязано возбуждению среды мощными радиоволнами, сопровождающими разряд молнии. Не исключено влияние частиц высокой энергии космического излучения на возникновение высотных молний.

Авторы (Sato, Fukunishi, 2003) провели наблюдение (регистрации ОНЧ, 1 – 100 Гц) за частотой появления спрайтов в период с 19.06.01 г. по 20.01.02 г. на двух обсерваториях Syowa в Антарктиде и Onagawa в Японии. Зарегистрировано 715 500 событий. Средняя частота появления спрайтов 720 событий в день. Спрайты локализованы в Северной и Южной Америке, Африке и Юго-восточной Азии.

Как выглядят спрайты и синие струи. Спрайт - оптическое явление в мезосфере, развивающееся над грозовым облаком и достигающее высоты 90 км. Иногда влияние спрайта ощущается значительно выше 90 км, в Е области ионосферы (рис. 20-24). Спрайты, чаще - красные, наиболее яркая часть их - голова (66 - 74 км), выше - тонкие светящиеся линии - волосы. Под головой - темная полоска - воротник (ожерелье), ниже - усы, которые простираются до 40-50 км и меняют цвет от красного, до - голубого (внизу). Спрайты бывают одиночные, однако, - чаще бывают двойные и тройные. В поперечнике они достигают 40 км. Время жизни спрайтов порядка нескольких миллисекунд (Rairden, Mende, 1995), хотя наблюдаются и более короткоживущие разряды. Оптическая энергия спрайта составляет несколько килоджоулей, для серии спрайтов она, соответственно, больше (Sentman, Wescott, 1993; Sentman et al., 1995).

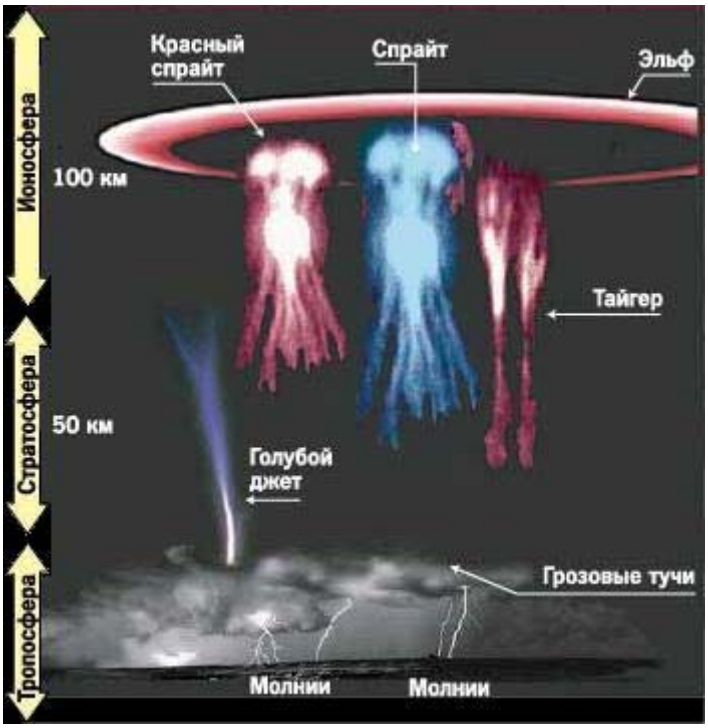


Рис. 20-23. Внешний вид спрайтов и голубых струй.

Синяя струя движется вверх со скоростью примерно 100 км/с, как хорошо сфокусированный пучок синего цвета, от вершины грозового облака до высоты порядка 50 км. Принято считать синие струи аналогом стримера, в виде ряда плазменных волокон (см. рис. 20-24), возникающих при электрическом пробое газового промежутка (Pasko et al., 1996; Sukhorukov et al., 1996). Материнское облако имеет, как правило, на верхней

кромке положительный, а на нижней, - отрицательный заряды (см. рис. 20-24). В верхней части (голове) синей струи то же знак заряда положительный. Считается, что в струе происходит сепарирование зарядов таким образом, чтобы образовалось электрическое поле обратного знака атмосферному электрическому полю. Суммарный заряд синей струи составляет 300-400 кулон, размер по высоте - порядка 20 км, толщина струи порядка одного км, время существования струи около одной секунды.

Спрайты как часть атмосферного электрического контура. Сотрудники лаборатории STAR Стенфордского Университета (научный руководитель U. Inan) считают, что наличие спрайтов изменяет параметры электрического контура верхней атмосферы (Pasko, et al., 1998). Согласно их модели, движущийся вверх спрайт, как бы расположен между двумя "обкладками конденсатора" h_i и h_t, которые движутся вместе со спрайтом (рис. 20-24-a). Атмосферная проводимость $\sigma(h_i)$ увеличивается монотонно с высотой. Время процесса оценивается по формуле: $t = \varepsilon_o/\sigma(h_i)$, где ε_o - электрическая постоянная. Рис. 20-24-b показывает, как искажается атмосферное электрическое поле $E_к$ в присутствии дополнительного заряда в 1000 кулон расположенного на высоте 10 км в свободном пространстве между двумя проводящими пластинами: Землей и ионосферой. Рисунок иллюстрирует распределение поля после разряда: на высоте ниже 50 км, $E < E_к$, а на больших высотах за счет влияния спрайта величина поля оказывается больше начальной $E_к$. Аналогичная ситуация наблюдается и с проводимостью. Кроме этого, в модели спрайта (Pasko, et al., 1998) рассмотрен возможный механизм генерации интенсивных радиоволн в диапазоне килогерц, связанный с разрядом молнии. Спрайт возникает примерно через 2-3 мсек после основного разряда. В зависимости от силы тока основного разряда, изменяющегося от 25 кА до 150 кА, меняется вклад спрайта в общую картину магнитного поля разряда молнии.

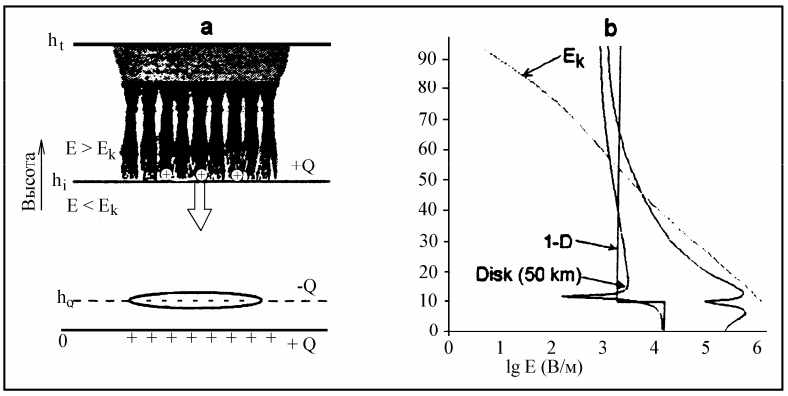


Рис. 20-24. Влияние спрайта на параметры электрического контура «Земля-ионосфера».

Оптические характеристики спрайтов и струй. Зарегистрированное свечение спрайта соответствует спектру возбуждения молекулярного азота N_2 1P в диапазоне длин волн: 650-700 нм и 750, 770 нм. Выявлены все разрешенные переходы молекулярного азота, а также спектры N_2^+. Аналогичная ситуация наблюдалась и при исследовании оптических характеристик синих струй. Здесь, так же как и в случае со спрайтами, основное излучение с длиной волны 391 нм соответствует возбуждению линий 1N и 2P молекулярного азота и иона азота N_2^+ (Hampton et al., 1996; Mende et al., 1995; Yukhimuk et al., 1998). Таким образом, различия в цвете между спрайтами и струями состоит в различии энергии электронов, участвующих в возбуждении свечения этих явлений.

Спрайты и источники низкочастотных радиоволн. Спрайты связаны с источниками радиоволн, сопутствующих разряду молнии. Эти выводы базируются на серии экспериментов, проводимых различными группами физиков в различное время года, в

различных районах США. Наблюдения за электромагнитным излучением, сопровождавшим спрайты, велось с помощью вертикально установленной антенны в виде токовой петли общей площадью 1.7 кв. м. Регистрировалась магнитная компонента колебаний в частотном диапазоне 24 кГц с помощью радиоприемника. Одновременно с борта самолета регистрировались спрайты и интенсивности световых вспышек молний (в кА). (Inan et al., 1995; Inan et al., 1996; Pasko et al., 1998). Природа возбуждения и распространения естественных электромагнитных импульсов в диапазоне единиц Гц - десятков килогерц распространяющихся в резонаторе Земля-ионосфера, применительно к проблеме выяснения роли электромагнитного излучения в физике спрайтов, изучалась в (Nickolaenko, Hayakawa, 1998). Авторы показали, что на расстояниях от источника до приемника 1, 5, 10, 15 и 20 тыс. км, спектры сигналов в частотном диапазоне выше 40 Гц заметно различаются. На частотах т.н. Шумановского резонанса (4-20 Гц) эти различия не столь значительны. Изучалось изменение величины и формы импульса вертикального электрического поля на тех же расстояниях. Эти данные использовались при интерпретации явления спрайтов и струй.

Шаровая молния. Литература, касающаяся различных моделей шаровой молнии (ШМ) огромна. Авторы работ, посвященных этой проблеме, предложили колоссальное количество всевозможных вариантов моделей и идей. Среди множества работ, опубликованных за последние годы, можно отметить широкое разнообразие вариантов внутреннего устройства шаровой молнии: от самых нелепых (Торчигин, 2003), до вполне правдоподобных (Аланян, 2002; Григорян, 2002; Натяганов, 2003). Недавно появилось сообщение, что шаровую молнию устойчиво получают в результате импульсного электрического разряда в воде (Егоров и др. 2004). Этой проблемой занимались многие известные физики, в том числе и Нобелевский лауреат П.Л. Капица (1955), Б.В.Войцеховский (1974), Б.М. Смирнов (1988), С. Сингер (1973) и др. Однако все авторы работ, особенно опубликованных в последнее время, признают, что наиболее адекватная модель шаровой молнии предложена Стахановым (1973, 1996).

Рис.20 -25. Линейная (слева) и шаровая молнии.

Преобладающее большинство авторов разнообразных идей, касающихся природы ШМ полагали её как объект электрический, состоящий из низкотемпературной плазмы, однако мало кто из них рассматривал физику ШМ в контексте природы атмосферного электричества и, более того, как один из её элементов. Автором книги предложена модель шаровой молнии на многочастичной квантовой запутанности (сайт: http://www.vvkuz.ru/).

20. 8. Вариации E при изменении параметров геофизической среды.

Поле E_Z и грозы.

- Неоднократные наблюдения АЭП показывают, что во время гроз его величина – уменьшается и даже меняет знак, в то время принято считать, что гроза – источник атмосферного электричества. В работе (Франк-Каменецкий и др. 2006) показано, что вклад грозовых разрядов в АЭП ничтожен и не превышает 0.1 %. Обнаружено, что увеличение числа грозовых разрядов ведет к уменьшению величины АЭП.
- Ежедневное количество гроз в целом, и их распределение по поверхности Земли значительно изменяется. Это говорит о том, что мирового центра гроз не существует. Можно выделить три региона грозовой активности (по убыванию интенсивности): 1 – Индонезийский, 2 – Бразильский, 3 – Африканский. Кроме этого, большое количество гроз происходит и в экваториальных областях мирового океана.
- Итак, изменения количества гроз в году антикоррелирует с изменениями АЭП, в то время как, ещё А.Л. Чижевским и многими другими показано, что многолетний ход кривой частоты гроз и ход кривой числа солнечных пятен совпадают достаточно хорошо. Например, в качестве иллюстрации приведем таблицу 2, в которой сравниваются числа Вольфа - *W* с годовым количеством гроз на Горном Алтае – *N* (Дмитриев и др., 2002).

Таблица 2.

годы:	**1956**	1964	**1968**	1976	**1979**	1987	**1990**	1998
W	142.6	27.6	91.4	36.5	114.0	41.3	118.9	28.6
N	340	218	341	270	349	184	231	147
k = N/W	2.38	7.89	3.73	7.39	3.06	4.45	1.95	5.13

Из таблицы следует, что в годы максимума солнечной активности, отношение числа гроз (*N*) к числу Вольфа (*W*) *k* принимает значения: *k* (max) = 2.7 ±1, в годы минимума *k* (min) = 6.2 ± 1.5. Видно, что всегда: $N \sim W$, и никогда не наблюдается: $N \sim 1/W$. Отношения $\boldsymbol{W}/W$ = 142.6/27.6 = 5.16, $\boldsymbol{N}/N$ = 349/147 = 2.37. (Жирным цветом выделены годы солнечной активности). Зависимость интенсивности ГКЛ и чисел Вольфа от времени: $I(t) \sim 1/W(t)$, хорошо известна. Имеется достаточно много доказательств зависимости: $E(t) \sim I(t)$. Эти факты противоречат модели грозового источника АЭП.

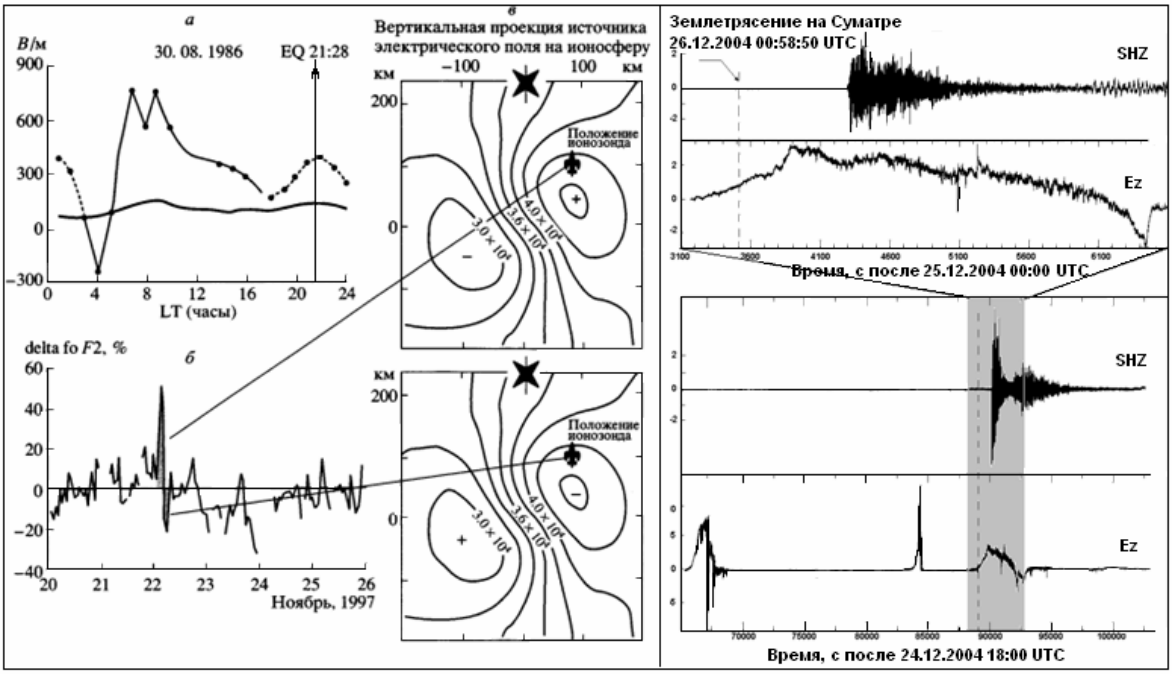


Рис. 20-26. Слева: (*а*): Вариация электрического поля с изменением знака поля перед землетрясением в Карпатах 30.08.1986. (M = 7.0). (*б*): Пример ионосферного предвестника (девиация критической частоты foF2) перед землетрясением в Каусете (Аргентина) 23.11. 1997 (M = 7.8). (*в*): модельные представления девиации критической частоты в ионосфере foF2 (Пулинец и др., 2004). Справа: Вариация электрического поля Ez во время, перед и после землетрясения (SHZ) на Суматре 26.12.2004 (M = 8.3) (Roder, et al. 2005).

Примеры возможной связи между АЭП и землетрясениями. В сейсмически опасных районах Земли при наблюдении суточного хода величины атмосферного электрического поля, незадолго перед землетрясениями, регистрировалось значительное понижение величины *E*, либо даже смена его знака. О.П. Руленко (2000, 2001) выделяет два типа аномалий *E*, возникающих перед землетрясением. К первому типу относятся аномалии, имеющие бухтообразную отрицательную форму, ко второму, – форму пакета колебаний, с некоторым набором частот.

Датчик АЭП, установленный на сейсмостанции Uper Tiber Valley (Тоскания, Италия) зарегистрировал заметные изменения вертикальной компоненты поля перед, во время и после крупнейшего землетрясения на Суматре (26.12.2004). Эти данные, насколько известно, не были подтверждены в других пунктах наблюдения АЭП. В частности, на Камчатской обсерватории Паратунка, в этот день были условия «хорошей погоды», однако подобного явления (рис. 20-26, справа) - зарегистрировано не было.

Вариации E в эпицентре землетрясения. Измерения атмосферного электрического поля проводились на сейсмостанции "Акташ" в ноябре 2003 г. примерно через месяц после сильного (с магнитудой 7.5, по оценке ГС СОРАН) Чуйского землетрясения, произошедшего на юге Горного Алтая на территории Кош-Агачского района 27 сентября 2003 г. в 11час. 33 мин. по Гринвичу. Погодные условия во время измерения *E* были далеки от - нормальных. Кроме этого, из-за ограниченной длины кабеля, датчик поля был установлен очень близко к зданию станции, недалеко от датчика находились высокие деревья, что также могло оказывать влияние на измерения (для нормальной работы электрометр рекомендуется устанавливать на открытой ровной местности). Низкая температура воздуха (в особенности ночью) и большой ее суточный перепад приводили к периодическим отказам датчика - за весь период измерений достоверная запись вариации электрического поля получена только для двух землетрясений 5 ноября.

Основная проблема при идентификации сигналов, генерируемых при землетрясении в различных геофизических полях, состоит в доказательстве того, что датчики не регистрируют собственные механические колебания при толчке, т.е. не работают как сейсмографы. В нашем случае таким доказательством в определенной степени может быть отсутствие сигналов в *E* во время достаточно сильных сигналов в акустике, например, видимые за 10-13 мин. до землетрясения, хотя сильный инфразвуковой сигнал не обязательно должен сопровождаться значительными механическими колебаниями почвы, а значит и электрометра. Но, с другой стороны, датчик "*E*" не реагировал на заведомо сильные вибрации, возникающие при передвижении по территории станции автомобиля. Еще одним фактором является существенное различие спектров акустических сигналов от землетрясения и спектров помех (скорее всего связанных с перемещениями сотрудников по территории станции).

В спектрах акустических сигналов от землетрясения, большая часть энергии лежит в высокочастотной области, в то время как в спектрах помех, – в низкочастотной. При большей чувствительности электрометра на высоких частотах это может приводить к селективности воздействия. Однако спектры сигнала *E*, вычисленные для временных интервалов, охватывающих период землетрясения и вне его, представляют собой спектр

"белого" шума и различаются только амплитудой во всей полосе частот (больше 5 Гц). Отметим также, что электрометр подобного типа использовался нами при изучении вариаций атмосферного электрического поля, возникающих во время работы мощных виброисточников, и не показал заметной зависимости от механического воздействия на него в ближней зоне сейсмовибраторов (Кузнецов и др. 1999).

Изложенное выше позволяет предположить, что наблюдаемые во время землетрясений сигналы в электрическом поле представляют собой действительные вариации электрического поля. Более детальный анализ позволяет выделить сдвиг примерно на 1/3 интервала дискретизации, который связан с задержкой между последовательно опрашиваемыми каналами АЦП и равный 6 мс для датчиков "P" и "E".

Синхронные по времени вариации электрического поля *E* и инфразвука *P* позволяют предположить, что сигнал *E* во время землетрясения может быть генерирован при колебании во время толчка электрических зарядов в районе сейсмостанции (при этом ожидается, что колебания будут синфазны на значительной площади).

Вариации E в окрестности сейсмовибратора. Измерения вертикальной составляющей атмосферного электрического поля вблизи работающего сейсмовибратора проводились сотрудниками Новосибирской обсерватории «Ключи» с помощью датчика поля струнного типа, с порогом чувствительности порядка 1 В/м. Датчик предназначен для регулярных обсерваторских наблюдений больших изменений электрического поля, что ограничило его применение лишь незначительными расстояниями от сейсмовибратора (первые сотни метров). В некоторых случаях использовался электрометр с чувствительностью порядка 1 мВ/м, реализованный в виде приемника с вертикальной штыревой антенной длиной около 30 см (Кузнецов и др. 1999).

Возмущения электрического поля на частоте сейсмовибратора (полезный сигнал) обнаружены как при работе электромеханических вибраторов, так и вибратора с пневматическим приводом. Последнее указывает на геофизическое происхождение этих возмущений, а не на связь его с работой сейсмовибратора как технического устройства.

В июне 1998 г. измерения электрического поля были выполнены двумя электрометрами в свип-режиме сейсмовибратора ЦВ-100 на расстоянии около 700 м. Оба электрометра зарегистрировали единственную моду с практически нулевым запаздыванием. Это позволяет предположить, что возмущения электрического поля не связаны с акустическими или сейсмическими колебаниями в окрестности датчиков, а возбуждаются процессами, происходящими вблизи сейсмовибратора.

АЭП во время полного Солнечного затмения. На карте рис. 20-27 виден, окрашенный синим цветом, след Луны на поверхности Земли и выделены области регистрации затмения в Новосибирске. Анализ данных АЭП по затмению, приведенных на рис. 20-28 показывает изменение атмосферного электрического поля и приземной температуры на геофизической обсерватории Ключи в Новосибирске. Видно, что температура возрастала перед затмением и с его началом стала падать, достигнув минимума в момент полного солнечного затмения (средняя линия из трех вертикальных). АЭП резко уменьшилось в начале процесса, и затем стала возрастать, причем максимальная скорость возрастания АЭП приходится на момент полного затмения. Температура после окончания затмения понижалась, и в момент этого понижения - АЭП продолжало возрастать.

- Изменение в АЭП начинаются несколько раньше, чем собственно - начало затмения. В самом начале процесса АЭП уменьшается, а затем начинает возрастать, причем возрастание продолжается после окончания затмения. Заметим, что примерно такая же, как в нашем случае картина, - наблюдалась группой В.В. Адушкина (2007) в момент

регистрации АЭП затмения 2006 г. Правда, в том случае, АЭП суммарно, скорее понижалось, чем повышалось, как в нашем случае. Возможно, дело в том, что, в отличие от нашего случая, там регистрировалось не полное, а частичное затмение.

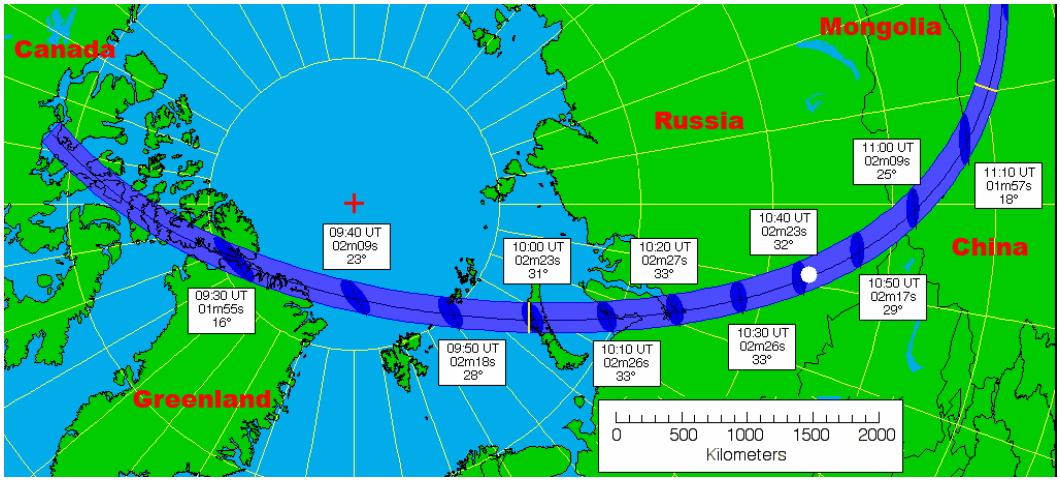


Рис. 20-27. Карта Солнечного затмения 01.08.2008. Большая белая точка показывает время максимальной фазы затмения в Новосибирске. Лини ограничивают зону регистрируемого эффекта.

Рис. 20-28 . Данные и модель изменения температуры поверхности, АЭП и ***∂E/∂t***.

- Температура поверхности Земли четко отслеживает временной ход затмения. Похолоданию, происходящему на поверхности Земли, - соответствует, в целом, скорее возрастание величины АЭП, несмотря на весьма заметное уменьшение его в начале процесса.
- Кривая АЭП, в отличие от ионосферы, концентрации озона и упоминаемой нами температуры - не повторяет треугольную форму фазы затмения. На первом этапе – этапе незначительного повышения температуры перед затмением, АЭП – уменьшается. На третьем этапе, после затмения, когда температура падает, величина АЭП – ещё растет. В момент затмения форма кривой АЭП скорее напоминает интеграл от «положительного» треугольника температуры. Можно видеть корреляцию, по крайней мере, на первом и

третьем этапах: АЭП находится в противофазе с температурой, - немного отставая от неё по времени.

Принято считать, что текущий в атмосфере ток складывается из тока проводимости j и тока смещения $\varepsilon_o \partial E/\partial t$. Обычно, при выполнении условия: $t >> \tau$, где t - время процесса, а $\tau = \varepsilon_o / \sigma_e$ - время релаксации атмосферы ($\tau \approx 10^3$сек) – током смещения пренебрегают. В случае наблюдения солнечного затмения условие $t >> \tau$ не выполняется и, по-видимому, необходимо учитывать ток смещения, тем более что во время затмения нет очевидной причины для изменений тока проводимости j: $E \sim \sigma(j - \varepsilon_o \partial E/\partial t)$, где σ – проводимость среды. Как известно, ток смещения возникает в конденсаторе «ионосфера – Земля» в моменты его зарядки и разрядки и обеспечивает замкнутость цепей любых непостоянных токов, что соответствует модели АЭП.

Суть нашей идеи состоит в следующем: Наблюдение вариации температуры в момент затмения позволяет представить изменение температуры нижнего слоя атмосферы в момент затмения в виде нормального распределения: $T \sim T_o - t\ exp\ (-t)^2$, T_o - начальная температура, t - время. Из многих наблюдений известно, что $E_Z \sim 1/T$. Тогда: $\partial E/\partial t \sim - \partial T/\partial t \times 1/T^2$. Полученная зависимость $E_Z \sim \sigma(j - \varepsilon_o \partial E/\partial t)$ по форме очень близка к кривой $E(t)$ зарегистрированной в АЭП (рис. 20-28) в момент солнечного затмения. Здесь, как отмечалось многими авторами, максимальная скорость изменения E_Z приходится на максимальное уменьшение температуры T, что соответствует фазе полного затмения. Это может означать, что в момент солнечного затмения наши приборы зарегистрировали изменение E_Z, вызванное током смещения: $\varepsilon_o \partial E/\partial t$. Не полное соответствие этой кривой наблюдаемой величине E_Z означает, что искажение может быть связано с наличием некоторого изменения тока проводимости.

Перемещение пятна затмения размером примерно в 100 км происходит, в районе Новосибирска за 2.5 минуты. Опережение начала уменьшения величины Ez относительно начала уменьшения температуры составляет $\Delta t \approx 20$ минут (см. на графике dE/dt рис. 20-28). Можно считать, что электрометр начинает регистрировать изменения АЭП, происходящие на расстоянии от датчика поля около 800 км. Этот результат согласуется с нашими измерениями дальнодействия АЭП, полученными при исследовании влияния на АЭП приближающегося циклона. В случае солнечного затмения в Новосибирске величина дальнодействия оказалась примерно в два раза меньше, чем в случае циклонов на Камчатке.

Вариации E при приближении циклона. Влияние циклонов на величину вертикальной компоненты АЭП E_Z исследовано в обсерватории Паратунка (ИКИР, Камчатка) (Кузнецов и др., 2007). Циклоны регистрировались по электромагнитному излучению грозовых разрядов с помощью ОНЧ пеленгатора, разработанного в ИКИР, а так же по спутниковым данным.

Максимальное расстояние до грозовых очагов, регистрируемое пеленгатором, достигает четырех тысяч километров. Авторами приведены азимутальные распределения источников ОНЧ излучения и распределения эпицентров циклонов, определяемых на основе синоптических карт гидрометеослужбы Камчатки. Показаны азимутальные перемещения грозовых источников, находящихся в прилегающих к Камчатке областях. Мониторинг E_Z проводился с применением прибора «Поле-2». Показано, что величина E_Z понижается синхронно с атмосферным давлением по мере приближения циклонов к обсерватории. Получена оценка величины электрического заряда циклона (5 000 Кл), максимального понижения атмосферного давления в центре циклона (от 770 до 745 мм. рт. ст.) и др. Показано, что АЭП реагирует на циклон на расстоянии большем 1.5 тыс. км.

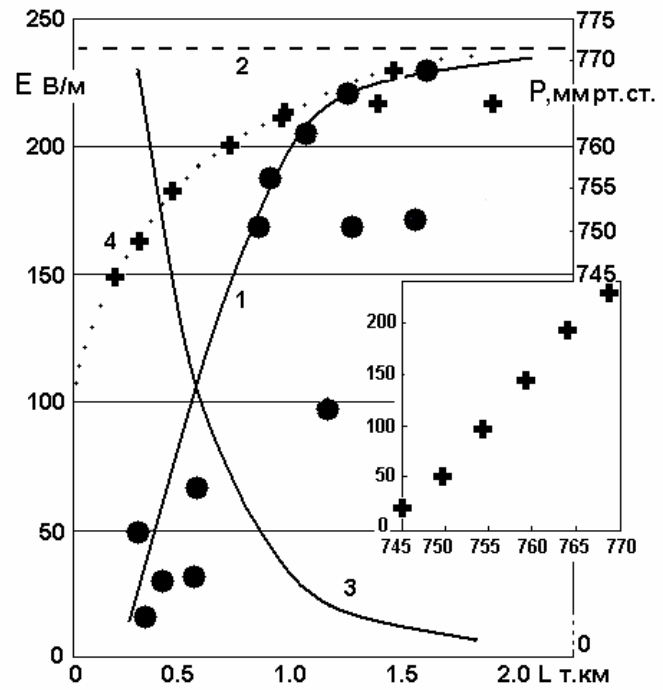


Рис.20-29. Эффект циклона в АЭП. Кривая 1 и точки - величина АЭП в Паратунке; прерывистая линия 2 - величина АЭП (E_Z) в отсутствие циклонов; 3 - электрическое поле циклонов; 4 (крестики) - изменение атмосферного давления (P, мм. рт. ст.) при приближении циклонов. На вставке: зависимость E_Z от P.

Эксперимент по активному воздействию струи водяного пара на АЭП. Эксперимент проводился в районе действующей Мутновской электростанции (Камчатка) на двух скважинах теплоэнергетических вод – парогидротерм. Измерения вертикальной компоненты АЭП E_z производились с помощью трех электрических флюксметров «Градиент М3», датчика электрической проводимости воздуха «Электропроводность-2», системы оцифровки и записи сигнала на цифровой носитель. Датчик электрической проводимости выполнен в виде двойного аспирационного измерительного конденсатора. Датчик состоит из цилиндрической обкладки, внутренней собирающей обкладки, входной трубы и аэрозольной защиты. На обкладки подается напряжение и измеряется ток. Один конденсатор измеряет проводимость положительных легких ионов, другой – отрицательных. Диапазон измерений каждого конденсатора составляет ± 25 фСм $м^{-1}$.

Один из датчиков АЭП «Градиент М3» устанавливался в непосредственной близости от сопла скважины на верхней площадке металлического кожуха, другие располагались на расстоянии 20 и 40 м от скважины. Прибор «Электропроводность-2», система оцифровки данных и компьютер размещалась в 20 м от скважины. Таким образом, наибольшее удаление электрометра от скважины достигало 40 м, что ограничивалось длиной измерительного кабеля (20 м). Предполагалось, что чем выше выброс пара, тем на больших расстояниях скажется его влияние на АЭП, но при открытии скважины стало очевидным, что это удаление было выбрано недостаточно. Высота струи первой скважины превысила 150 м. Расход пароводяной смеси на первой скважине 115 кг/сек с 22% содержанием пара, а расход во второй скважине - 14-15 кг/сек чистого пара (100%), без примеси воды. В момент открытия первой скважины процентное отношение пара в ходе эксперимента повышалось, затем скважина резко вышла на основные свои характеристики, и расход и, соответственно, водность струи пара, увеличились. В этот момент на аппаратуру обрушилась огромная масса воды, и эксперимент пришлось прекратить. В статье мы используем только ту часть записей, в которой количество воды в

пароводяной смеси понижалось. Струя пара во второй скважине была практически сухой. Это даёт возможность сравнить результаты воздействия на АЭП как сухого, так и влажного водяного пара, а так же условно, конечно, считать эксперимент с сухой скважиной как бы продолжением наблюдений, проведенных на первой скважине, содержащей 78% воды.

Данные эксперимента приведены на рис. 23-20, на котором представлена фотография струи пара, а также данные по изменению во времени: величины АЭП на расстояниях 20 и 40 м и данные измерения электропроводности на расстоянии 20 м от скважины. Данные регистрации АЭП полученные с датчиков, установленных в непосредственной близости от выходной трубы не приводятся из-за их малой информативности.

Анализ результатов эксперимента, представленных на рис. 23-30, показывает, что изменения электропроводности λ_+ и λ_- практически всегда совпадают по времени с временными вариациями поля E, что служит подтверждением нашей модели, основанной на идее Френкеля при использовании её в свободной атмосфере. В заключение отметим, что активные эксперименты по воздействию на атмосферное электрическое поле струи пара-водяной смеси из термальной скважины в районе Мутновской гидротермальной электростанции Камчатки приводят к заметным изменениям АЭП. Сухой водный пар, выброшенный в атмосферу, - вызывает возрастание величины поля E. В то время как выброс воды в атмосферу и последующее её дробление, - привносит отрицательный заряд, что приводит к уменьшению поля E и даже к изменению его полярности.

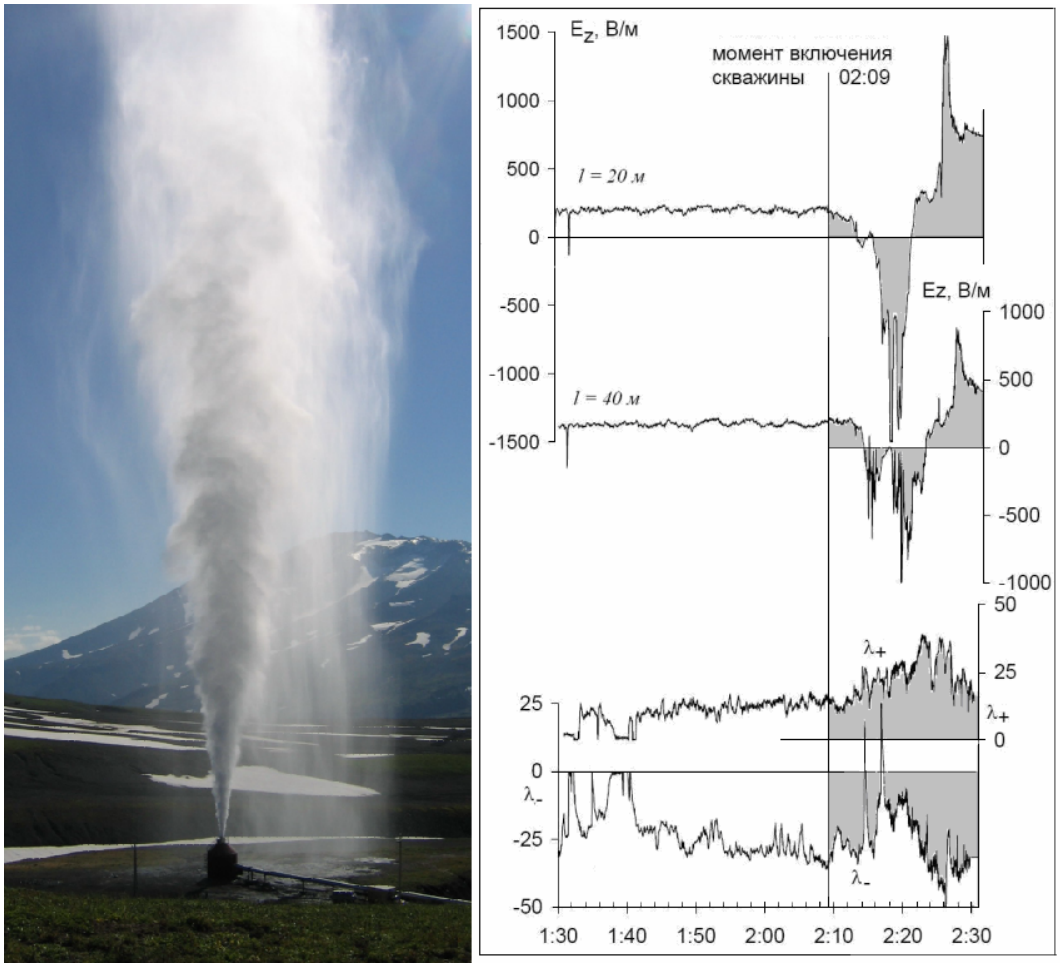


Рис. 20-30. Струя пара из термальной скважины на поле Мутновской станции. Результат измерений E_Z, λ_+ и λ_- (Кузнецов и др. 2007, 2008).

23. 9. Существуют ли «токи Шмидта-Бауэра»?

Мы отмечали, что ни заряженные отрицательные аэрозоли, ни «тяжелые» ионы, - не регистрируются аппаратурой, предназначенной для измерения АЭП и проводимости атмосферы. Постулированный нами внутренний «ток» источника АЭП представляет собой сумму падающих на Землю отрицательно заряженных тяжелых ионов и капель, и подъем положительно заряженных ионов гидроксония ($H_5O^+_2$ и H_3O^+) восходящими потоками воздуха в верхние слои атмосферы, вплоть до D-слоя ионосферы. Движение заряженных частиц положительных в одном направлении, а отрицательных - в другом, это, собственно, и есть ток - внутренний ток источника. Очевидно, что этот ток не может быть обнаружен стандартной аппаратурой.

Естественно, возникает вопрос, если это ток источника, то где же он должен «протекать»? В каком регионе Земли? Как отмечалось, ГКЛ в основном попадают на Землю в полярных регионах. Там должна быть максимальная концентрация зарядов. По-видимому, там должны быть и токи источника, причем направление тока должно быть противоположным току утечки: снизу-вверх. Известно ли что-нибудь о таких токах? Вполне возможно, что «ток», требующийся согласно модели, есть ни что иное, как тот самый, уже давно забытый ток Шмидта-Бауэра, который вызывал огромный интерес у физиков более 100 лет тому назад (Швейдлер, 1936). Так как наблюдения велись с помощью аппаратуры, предназначенной для измерения атмосферного тока *j*, токи Шмидта-Бауэра никогда не были обнаружены экспериментально. Наличие на Земле таких вертикальных токов в атмосфере, решало бы ещё одну важную проблему физики Земли - проблему потенциальности источника генерации геомагнитного поля, с одной стороны, и, с другой, служило бы поддержкой нашей модели АЭП.

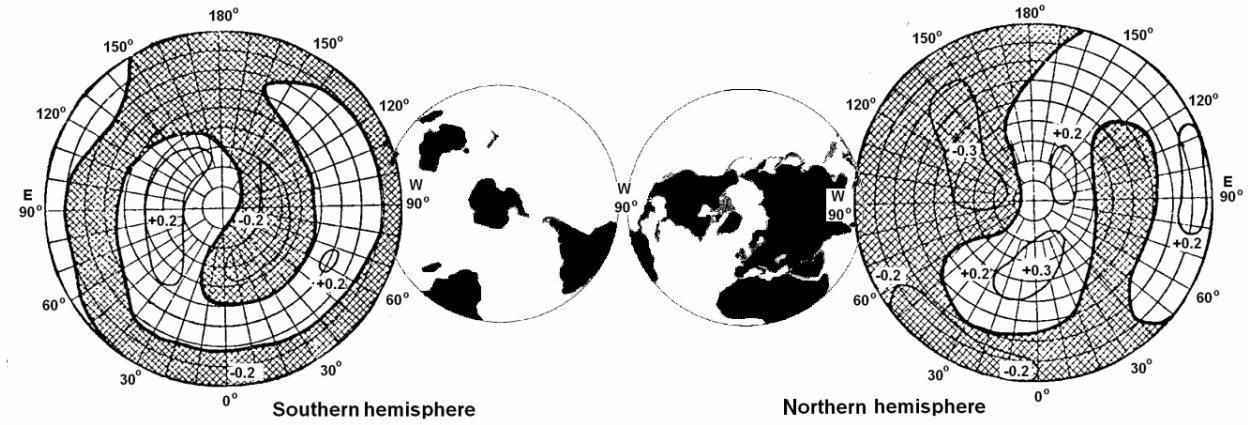


Рис. 20-31 Токи Шмидта-Бауэра (Швейдлер, 1936) в северном и южном полушариях. В районах полюсов – токи положительные (направлены вверх), в экваториальной зоне – токи отрицательны (направлены вниз). На внутренней вставке – соответствующее расположение материков.

В чем же состоит природа токов Шмидта-Бауэра? Напомним, что А. Шмидт, анализируя результаты наблюдений геомагнитных данных 1885 г., обнаружил, что, если интегрировать величины Н-компонент геомагнитного поля по замкнутой кривой на поверхности Земли, то интеграл оказывается не равным нулю. Это может означать только то, что внутри этого контура имеется вертикальный ток, плотность которого (по оценкам Шмидта) в 10 000 раз больше плотности тока *j*. Вычисления Шмидта по материалам, полученным на сети станций, местами недостаточно густой, признали не вполне надёжными. Однако, Л.А. Бауэр, опираясь на значительно более плотную сеть магнитных станций и на более точные наблюдения, повторил расчеты Шмидта для данных 1897, 1904, 1908, 1920 гг. Практически во всех случаях он находил подтверждение результата Шмидта. Проведенные им оценки погрешностей измерения поля и его интерполяции

показали, что даже при отклонении ошибок в одном направлении во всех пунктах измерения и при примитивном линейном методе интерполяции, не получается и половины среднего значения циркуляции поля, что, в частности, послужило основанием для Швейдлера (1936) высказаться в пользу реальности данного явления.

В результате расчетов, проведенных Шмидтом и Бауэром (ШБ), было обнаружено, что в полярных регионах "ток" действительно направлен вверх (как и следует из нашей модели), в то время как «ток» экваториального пояса в целом имеет противоположную направленность. Согласно модели, этот «ток» обязан интенсивному испарению в районе экватора с выносом восходящих потоков большого количества отрицательно заряженных водных аэрозолей.

Расчеты показали, что плотность обнаруженного таким методом "тока" на 4 порядка превышает плотность атмосферных токов проводимости. Кроме этого, оказалось, что не потенциальная часть поля присутствует не только в постоянном, но и в переменном геомагнитном поле, т.е. в суточных S_q-вариациях (Бенькова, 1941). В частности, Беньковой было показано, что не потенциальная часть S_q-вариаций достигает 1/5 всего поля вариаций, а плотность переменных “токов”, которые ее создают, на 2-3 порядка превышает плотность токов проводимости атмосферы. Эти данные так же не противоречат нашей модели АЭП.

Токи, текущие в атмосфере Земли, известны:
- Плотность тока ионов в районах с ясной погодой составляет $2\text{-}3\cdot10^{-16}$ А/см^2
- Плотность тока, обусловленного переносом зарядов на каплях дождя, града, снега, при спокойных ливнях составляет 10^{-11}-10^{-10} А/см^2
- Плотность тока, обусловленного переносом зарядов на каплях дождя, града, снега, при грозовых ливнях и граде составляет до 10^{-8}-10^{-10} А/см^2
- Сила тока в молнии - до 500 кА, (с наибольшей вероятностью - в диапазоне 20-40 кА). Напряжение в молнии составляет до 10^9В, длина молнии достигает 10 км, диаметр канала молнии достигает 20 см.

Отметим, что плотность тока ШБ примерно равна плотности тока дождя.

Сравним величины электрических зарядов в атмосфере Земли:
- Средний заряд грозового облака 50 кулон.
- Заряд циклона, по нашим оценкам, достигает $Q = 5\cdot10^3$ Кл. Площадь его 100×100 км^2 = 10^{10} м^2. (Кузнецов и др. 2007)
- Заряд Земли как шара радиусом R обладающим полем E = 100 В/м: $Q_1 = \varepsilon_o R^2_E E = 5.7\cdot10^5$ кулон, R_E – радиус Земли ε_o – электрическая постоянная.
- Заряд слоя положительных ионов, толщиной 1 км, на высоте 85 км: $Q_2 = NShe = 10^4$см$^{-3}$ $\times5\cdot10^{18}$ см$^2\times10^5$ $\times1.6\cdot10^{-19}$ Кл = 10^9 Кл, где N - концентрация зарядов, S - площадь поверхности Земли, h - толщина слоя, e - заряд электрона.
- Заряд, переносимый к Земле током дождя в течение одних суток на территории равной примерно 0.1% от общей поверхности Земли: $Q_3 = j\,S\,kt = 10^{-10}$ А/см$^2\times5\cdot10^{18}$ см$^2\times10^{-3}\times1$ сутки ($\approx 10^5$ с) = $5\cdot10^{10}$ Кл. Здесь: j – плотность тока дождя, k – доля поверхности Земли, занятой дождем, t - время зарядки Земли дождем.
- Заряд конденсатора «Земля-ионосфера»: $Q_4 = CU$, где C - ёмкость конденсатора Земля-ионосфера (электросфера) $C = 4\pi\varepsilon_o\Delta R_E/R_E^2 = 5\cdot10^{-2}$ ф. ΔR_E – высота ионосферы. U – потенциал ионосферы U = 300 000 В. $Q_4 = CU = 5\cdot10^{-2}$ ф$\times3\cdot10^5$ В = $1.5\cdot10^4$ Кл.

Сравнение величин зарядов Q_1 и Q_4, имеющих непосредственное отношение к АЭП, с величинами зарядов слоя положительных ионов (ионов гидроксония) Q_2 и зарядов дождевого облака Q_3, показывает, что электрический заряд атмосферы значительно (более чем на 4 порядка) превышает заряд, приписываемый АЭП.

Если природа токов АЭП известна, это дрейф легких ионов, то о природе токов ШБ этого сказать нельзя. Выше мы отмечали, что токи ШБ по величине идентичны токам дождя. Примем, что ток дождя и есть ток ШБ, и в дальнейшем будем считать это истиной. Известно, что дождевые капли заряжены отрицательно и падают вниз. Это означает направление тока вверх, что относится к полярным регионам. Следуя этой логике, в экваториальных регионах, так как там ток направлен вниз, а носителем заряда могут быть только капли воды, должен происходить перенос отрицательно заряженных водных аэрозолей вверх. Выясним, каким образом может быть реализована эта схема.

Давно известно, что при испарении воды в гравитационном поле происходит разделение зарядов. Этот процесс ответственен за возникновение электрических вспышек и молний в атмосфере. В динамике таких процессов явно формируются кулоновские динамические аттракторы, фокусирующие электрическое поле и заряд. Образование двойного слоя на поверхности раздела фаз является общим свойством (и не только воды и газа). На экваторе происходит интенсивное испарение, ионизация и разделение зарядов.

При этом происходит диссоциация воды на ионы водорода и гидроксила. Свободный ион H^+ не способен к самостоятельному существованию и гидратируется молекулой воды с образованием иона гидроксония: $H^+ + H_2O \longrightarrow H_3O^+$. Суммарная реакция представляет собой переход протона от одной молекулы к другой и образование ионов гидроксония и гидроксила: $H_2O + H_2O \longrightarrow H_3O^+ + OH^-$. Гидроксоний – летучий газ быстро поднимается в атмосфере до высоты 85 км и по неясной причине - здесь накапливается (рис. 20-2). Гидроксил коагулирует на себя пары воды, превращается в водный аэрозоль, который поднимается восходящим потоком нагретого воздуха. Именно этот процесс является током ШБ, направленным вниз. Как известно, на экваторе происходит основное образование облаков, которые переносятся ветрами в более холодные районы Земли и выливаются дождем.

Наши наблюдения за изменением полярности АЭП, проведенные на Камчатке в районе термальных полей вулкана Мутновский, подтверждают эту идею. Нами было показано, что если из термальной скважины выбрасывается пар с большим содержанием конденсированной воды, то величина АЭП уменьшается и может изменить свою полярность. Если из скважины выбрасывается сухой водный пар, то величина АЭП значительно возрастает (рис. 20-30).

Сравним электрическую энергию, запасенную в конденсаторе «Земля-ионосфера» с энергией атмосферы. Электрическая энергия $W \approx C \cdot Q$.

- Энергия атмосферного электрического поля $W_1 = 3 \cdot 10^4$ Дж, слоя ионов $W_2 = 5 \cdot 10^7$ Дж, заряда дождя $W_3 = 2 \cdot 10^9$ джоулей. Энергия конденсатора $W_4 = 5 \cdot 10^2$ Дж.

Полученные значения величин сравним с энергией атмосферы. Внутренняя энергия всей атмосферы порядка 10^{23} Дж, потенциальная несколько меньше, а кинетическая - на два порядка меньше: 10^{21} Дж, то есть составляет менее 1% потенциальной энергии. Видно, что электрическая энергия атмосферы ничтожна по сравнению с энергией кинетической.

Приведенные выше оценки показывают, что на Земле должно наблюдаться изменение токов ШБ в зависимости от вариаций климата при соблюдении общего условия равенства текущих токов вверх и вниз. Токи должны изменяться и при смене сезонов зима-лето и при изменении температуры. Вероятно, изучая изменения данных магнитных обсерваторий за последние пол века, можно будет обнаружить тенденцию изменения токов ШБ, вызванных современным трендом глобального потепления.

Остается выяснить как, в рамках этой модели, должны изменяться токи ШБ: возрастать или уменьшаться? Очевидно, что сумма токов восходящих должна быть равна токам нисходящим. Как было показано автором, величина АЭП синхронно уменьшается с увеличением температуры. При увеличении температуры скорость конденсации паров воды уменьшается, а скорость испарения растет. Это должно приводить к тому, что фазовый переход «испарение» становится более эффективным, иначе большее количество

воды испаряется, образуется большее количество разделенных зарядов и токи ШБ должны бы возрастать. Такая ситуация, если она подтвердится, может говорить, что токи ШБ не имеют непосредственного отношения к атмосферному электрическому току (*J*), хотя, с другой стороны, именно восходящий поток приводит к возникновению положительно заряженного слоя ионов гидроксония. Собственно, наличие положительного заряда в этом слое и отрицательного – на поверхности Земли и является причиной появления АЭП и тока *J*. По модели АЭП заряженные частицы выше облачности, т.е. выше действия токов ШБ обеспечиваются ионизацией воздуха галактическими космическими лучами.

23. 10. Электрическая нейтральность Земли. Обсудим вопрос об электрической нейтральности Земли и других небесных тел. Вопрос можно переформулировать таким образом: является ли Земли отрицательным электродом - своеобразным «катодом» в космосе? Или она в космосе – электрически нейтральна? К сожалению, в данном случае мы не имеем возможности обратиться к опыту по АЭП на других планетах, как это было в случае с геомагнетизмом. Из космических наблюдений известно, что в атмосфере Венеры спускаемыми аппаратами наблюдались явления типа грозовых. Известно, что на Юпитере имеется ионосфера, но есть ли там АЭП – не известно. Одно ясно, что если АЭП – это «продукт» электрических поляризационных свойств воды, то и поля, аналогичного земному, - там нет.

Согласно нашей модели АЭП, так же как радиальное поле F-слоя в ядре Земли, - это поле двойного электрического слоя (ДЭС). Среди большого количества определений этого понятия, на первом месте стоит следующее: «Двойной электрический слой**,** два весьма близких друг к другу слоя электрических зарядов разного знака, но с одинаковой поверхностной плотностью, возникающие на границе раздела двух фаз». АЭП, как и поле F-слоя обязаны разделению электрических зарядов в поле тяготения. Причины ионизации различные: ионизация космическими лучами - в первом случае, и высокая температура – во втором. Электрическое поле ограничивается границами раздела двух фаз, именно так, как это следует из определения ДЭС. В нашей модели отрицательный «электрод» АЭП – проводящая поверхность Земли, положительный – слой положительных ионов гидроксония. За пределами ДЭС – поле отсутствует, обеспечивая электрическую нейтральность Земли. Ионосфера, расположенная выше этого слоя – электрически нейтральна. Конечно, в ней, при движении проводящей среды в геомагнитном поле, электрические поля возникают, но они, естественно, потерю зарядов Земли не вызывают. Т.о. наша модель отвечает на поставленный вопрос, почему Земля свой электрический заряд сохраняет (Швейдлер, 1936). Можно ли распространить этот вывод на другие космические объекты, в частности, на Солнце, которое «разбрасывается» протонами, сказать не могу. Честно говоря, этот вопрос, так же как вопрос об электрическом заряде элементарных частиц (Ахиезер, Рекало, 1974) выходит из круга проблем физики Земли. Для того чтобы рассмотреть вопрос о величине «остаточного заряда» Земли, планет и звезд и, возможно, связанного с ним следствия – не ошибаемся ли мы в связи с этим в оценке масс небесных тел, пока нет достаточных оснований. (По крайней мере, в рамках обсуждаемой здесь модели).

Обсуждение модели. Основное отличие нашей модели атмосферного электричества от общепринятых представлений о сущности АЭП, состоит в том, что грозы, которые без сомнения оказывают влияние на поле *E*, - не являются главным его источником. При этом исчезает одно из противоречий АЭП, состоящее в том, что атмосферное электричество хорошей погоды связано с грозовой деятельностью облаков, т.е. с тем фактором, который в исследованиях АЭП исключался как аномальный. Вторым важным моментом модели является логичное обоснование постоянства величины АЭП. Оно обязано двум факторам: стабильности среднегодовой температуры поверхности Земли и стабильности потока

ГКЛ, которые доставляют Земле электрический заряд. Этот фактор очевиден, так как стабильность среднегодовой температуры определяет стабильное соотношение между скоростями испарения и конденсации, что, в свою очередь, обеспечивает стабильность процесса образования и роста аэрозолей. Третьим важным моментом новой модели является то, что в атмосфере был «обнаружен» положительно заряженный слой ионов гидроксония – второй «электрод» конденсатора Земля-ионосфера.

Вернемся к причинам разработки принципиально новой модели АЭП и её основным положениям. Они заключаются в том, что:

- Неоднократные наблюдения АЭП показывают, что во время гроз его величина – уменьшается, в то время принято считать, что гроза – источник атмосферного электричества.
- В формировании тока утечки j принимают участие только легкие ионы. Именно они определяют характер профиля зависимости E от высоты. Изменение концентрации и соотношения легких ионов различного знака фиксируется измерительными приборами. Тяжелые ионы и мелкодисперсный аэрозоль - не принимают участие в формировании регистрируемого приборами тока утечки. Эти частицы несут на себе преимущественно отрицательный заряд. Они осаждаются на земную поверхность и поддерживают постоянным отрицательный заряд Земли, который и формирует в атмосфере «хорошей погоды» поле E = 130 В/м.
- Максимальная концентрация электрических зарядов, производимых космическими лучами, приходится на высоты тропопаузы. Именно здесь происходит процесс разделения зарядов наиболее эффективно. Когда зарядов много и влажность атмосферы возрастает, на этих высотах конденсируются и коагулируют большие водяные капли. Образуется облачность, интенсивность которой коррелирует с интенсивностью космических лучей.
- В атмосферу Земли ГКЛ поступают преимущественно в полярных широтах. Заметную роль в их распределении по поверхности Земли играет особенности геомагнитного поля, в частности, глобальные магнитные аномалии, в зоне влияния которых горизонтальная компонента поля меньше, в то время как модуль поля выше, чем в зоне, где влияние аномалий не сказывается. Из наблюдений на спутниках известно, что самое большое количество частиц высокой энергии попадают на Землю в зоне влияния Бразильской аномалии. Казалось бы, наблюдается противоречие, т.к. эта аномалия заметного влияния на АЭП не оказывает. Противоречия здесь нет, т.к. в зону влияния Бразильской аномалии попадают частицы из радиационного пояса, энергия которых значительно ниже энергии ГКЛ. Можно сказать, что ГКЛ Бразильскую аномалию «не замечают», в то время как влияние глобальных магнитных аномалий: Канадской и Сибирской проявляется в таком уникальном свойстве АЭП как UT-вариация.
- Наличие UT-вариации во всех оболочках Земли от поверхности до мезосферы, ионосферы и магнитосферы является реальным результатом солнечно-земных связей. В предлагаемой модели АЭП связь геооболочек реализуется на Земле без участия сомнительного «мирового источника гроз».
- Эксперименты по регистрации падающих слоев аэрозолей и расчеты «токовых» систем в полярных областях (токи Шмидта-Бауэра) свидетельствуют в пользу предлагаемой модели АЭП.

Литература

Аланакян Ю.Р. Водородная шаровая молния. ДАН 2002. Т. 385. № 6. С. 747-749.
Апсен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П. и др. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука. 1988. 150 с.
Бендилет О.И., Чернышева С.П., Шефтель В.М. Вариации атмосферного электрического поля в высокоширотной зоне во время магнитных возмущений. Геомагнетизм и Аэрономия. 1985. Т. 25. С. 628-632.

Беспалов П.А., Чугунов Ю.В. Вращение плазмосферы и природа атмосферного электричества. ДАН. 1994. Т. 337. № 4. С. 467-469.
Брагин Ю.А., Коненко А.Ф. и др. О связи напряженности электрического поля в атмосфере с солнечными вспышками и геомагнитными явлениями. Вопросы исследования нижней ионосферы. Новосибирск. 1972. С. 135-139.
Вернов С.Н., Савенко И.А., Шеврин И.И. и др. Внешний радиационный пояс Земли на высоте 320 км. ДАН СССР. 1961. Т. 140 N.4. С. 787-790.
Войцеховский Б.В., Войцеховский Б.Б. Природа шаровой молнии. ДАН СССР. 1974. Т. 218. № 1. С. 77-80.
Герасименко В.И. Электрические и метеорологические поля нижней тропосферы. В кн. Атмосферное электричество. Л. Гидрометеоиздат. 1976. С. 25-31.
Гирс С.П., Шварц Я.М. Вопросы начальной стадии электризации капель. В кн. Атмосферное электричество. Л. Гидрометеоиздат. 1976. С 127-129.
Гончаренко А.Н., Копвиллем У.Х., Никитин А.Ю. Особенности изменения вертикальной компоненты электрического поля атмосферы над океаном. Изв. АН. Физика атм. и океана. 1992. Т. 28. № 12. С.1216-1218.
Григорян С.С. О механизме возникновения шаровой молнии. ДАН. 2002. Т. 385. № 6. С. 750-753.
Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д. Демонстрация шаровой молнии в лаборатории. УФН. 2004. Т. 174. №. 1. С. 107-109.
Иманкулов А.Ч., Струминский В.И., Татаринов С.П., Токтомышев С.Ж. О возможности прогнозирования землетрясений по измерениям напряженности электрического поля атмосферы. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН. 2000. С. 119-121.
Имянитов И.М., Чубарина Е.В. Электричество свободной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 1965. 240 с.
Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.И. Электричество облаков. Л.: Гидрометеоиздат. 1971. 94 с.
Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества. УФН 1962. Т. 76. № 4. С. 593-641.
Капица П.Л. О природе шаровой молнии. ДАН СССР. 1955. Т. 101. № 2. С. 245-248.
Качурин Л.Г., Бекряев В.И. Исследование процесса электризации кристаллизующейся воды. ДАН СССР. 1960. Т. 130. № 1. С. 57-60.
Колясников Ю.А. Проблемы атмосферного электричества. Препринт. Магадан. СВКНИИ ДВО. 1992. 30 с.
Кунин В.Н. Экспериментальные исследования лабораторного аналога шаровой молнии. Тезисы конференции по атмосферному электричеству. Владимир. 2003.
Кузнецов В.В. Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности. Новосибирск. ИГиГ. 1985. 72 с.
Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Нестерова И.И., Поздеева М.С. Унитарная вариация ионосферных параметров. Препринт ИГиГ. Новосибирск. 1988. 30 с.
Кузнецов В.В. и др. Физика Земли. Новый взгляд на некоторые проблемы. Новосибирск: Наука. 1989. 128 с.
Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск. ИГиГ. 1990. 216 с.
Кузнецов В.В., Павлов А.А., Павлов А.Ф. Результаты наблюдений атмосферного электрического поля на равнинной среднеширотной обсерватории «Ключи» (Новосибирск). Новосибирск. ОИГГиМ. 1991. Препринт № 14. 13 с.
Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Нестерова Г.В., Нестерова И.И. Унитарная вариация foF2 и солнечная активность. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. № 2. С. 107-111.
Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. и др. Исследование геофизических возмущений при вибросейсмическом зондировании. Геология и геофизика. 1999. Т. 40 № 3. С. 442-456.

Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Дружин Г.Н. О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки. ДАН 2007. Т. 412. № 4, С. 547-551.
Кузнецов В.В. Чернева Н.В., Бабаханов И.Ю. "Исследования эффектов влияния искусственного облака на величину атмосферного электрического поля" - ФАО. 2007. Т. 43, № 2, С. 237-242.
Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Бабаханов И.Ю. "Эксперименты по активному воздействию струи водяного пара на атмосферное электрическое поле" ФАО. 2008.
Кузнецов В.В., Чернева Н.В. Исследование Форбуш-понижений и эффектов терминатора в атмосферном электрическом поле на обсерватории «Паратунка» (Камчатка). Вестник КРАУНЦ. 2008. Вып. 11. № 1. С. 89-97.
Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле во время полного солнечного затмения 2008 г. ДАН 2010 Т. 435. № 1.
Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газо-жидкостных системах. Новосибирск. Наука. 1984. 301 с.
Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Физматлит. 2001. 732 с.
Марков М.Н., Мустель Е.П. Пространственно-временные эффекты солнечно - земных связей в тропосфере и термосфере. Астрономический журнал. 1983. Т. 60. С. 417-421.
Марксон Р. Атмосферное электричество и проблемы связи между солнечной активностью и погодой. Солнечно-земные связи, погода и климат. М.: Мир. 1982. С. 242-264.
Моргунов В.А. Пространственные неоднородности электрического поля как фактор лито-ионосферных связей. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН. 2000. С. 106-113.
Натяганов В.Л. Электрокапиллярно-вихревая модель шаровой молнии. ДАН. 2003. Т. 390. № 6. С. 769-772.
Парамонов Н.А. Об унитарной вариации градиента атмосферного электрического потенциала. ДАН СССР. 1950. Т. 70. N 1. С. 37.
Плоткин В.В., Нестерова И.И., Израйлева Н.И. Унитарная вариация foF2 как характеристика глобального состояния ионосферы. Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. N 5. С. 195-199.
Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы. УФН. 1998. Т. 168. № 5. С. 582-589.
Пулинец С.А., Лю И.Я., Сафронова И.А. Интерпретация результатов статистического анализа вариаций критической частоты foF2 перед землетрясениями по данным ионосферной станции Чунг-ли (Тайвань). Геомагнетизм и Аэрономия. 2004. Т. 44. № 1. С. 113-118.
Рише Л.Е. Концептуальная схема электрической машины Земли. ДАН. 1997. Т. 356. № 4. С. 538-540.
Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. Киев: Наукова Думка. 1981.
Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы. Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57-68.
Руленко О.П. Некоторые особенности проявления аномалий электрического поля в приземной атмосфере перед землетрясениями. Сб. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2001. С.75-81.
Сингер С. Природа шаровой молнии. М.: Мир. 1973. 240 с.
Смирнов Б.М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука. 1988.
Стаханов И.П. О природе шаровой молнии. Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. № 3. С. 193-196.
Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Научный мир. 1996. 264 с.
Степанов С.И., Егоров А.И., Шабанов Г.Д. Долгоживущие светящиеся плазмоиды, возникающие при электрическом разряде во влажном воздухе. Тезисы конференции по атмосферному электричеству. Владимир. 2003.

Струминский В.И., Татаринов С.П. Струнный электростатический флюксметр. Труды II Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: 1984. 86 с.
Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука. 1966. 623 с.
Тверской П.Н. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоиздат. 1949. 252 с.
Торчигин В.П. О природе шаровой молнии. ДАН. 2003. Т. 389. № 1. С. 41-44.
Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 5. М.: Мир. 1966.
Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. и др. Пылевая плазма. УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495-544.
Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. Л-М. Гостехиздат. 1949. 155 с.
Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 345 с.
Фуров Д.В. Получение и параметры долгоживущих плазменных образований в свободной атмосфере. Тезисы конференции по атмосферному электричеству. Владимир. 2003.
Швейдлер Э. Сохранение электрического заряда Земли. М, Л.: ОТЛ. 1936. 75 с.

Carlson B.E., Inan U.S. A novel technique for remote of thunderstorm electric field via Kerr effect and sky polarization. Geoph. Res. Lett. 2008. V. 35, L22806, doi 1029/2008 GL035922. .
Frank L.A., Craven J.D., Burch J.L., Winningham J.D. Polar views of the Earth's aurora with Dynamics Explorer. Geoph. Res. Lett. 1982. V. 9. N. 9. 1001-1004.
Frank L.A. et al., The Theta Aurora. J. Geoph. Res. 1986. V. 91. 3177-3224.
Freir G.D. Auroral effects on the Earth electric field. J. Geophys. Res. 1967. V. 66. P. 2695-2702.
Hampton D.L., Heavner M.J., Wescott E.M., Sentman D.D. Optical spectral characteristics of sprites. Geoph. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 89-92.
Hays P.B., Roble R.G. A Quasi-Static Model of Global Atmospheric Electricity. 1. The Lower Atmosphere. J. Geoph. Res. 1979. V. 84. N. A7. P. 3291-3305.
Inan U.S., Bell T.F., Pasko V.P., Sentman D.D., Wescott E.M., Lyons W.A. VLF signatures of ionospheric disturbances associated with sprites. Geoph. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 3461-3464.
Inan U.S., Slingeland A., Pasko V.P., Rodriges J.V. VLF and LF signatures of mesospheric/lower ionospheric response to lighting discharges. J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 5219-5238.
Kane, R.P. Particle precipitation in the ionospheric F-2 region at location in vicinity of the south atlantic magnetic anomaly. Ann. Geophys. 1982. V.38. N. 6. P. 841-848.
Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I., Pozdeeva M.S. Universal diurnal variation of F2-layer critical frequency // J. Geomagn. Geoelectr. 1990. V. 42. N 10. P. 1237.
Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I., Izraileva N.I. Universal Diurnal Variation of F_2-Layer Critical Frequency as Characteristic of Global Ionosphere Condition. J. Geomagn. Geoelectr. 1993. V. 45. 1175-1179.
Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Khomutov S.Y. Acoustic, electromagnetic and ionospheric disturbances during the vibroseismic sounding. Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 2017-2020.
Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Khomutov S.Y. et al. Powerful seismovibrators as a possible source of acoustic and electromagnetic disturbances. Phys. Chem. Earth (A). 2000. V. 25. # 3. P.325-328.
Märcz F. Links between atmospheric electricity and ionospheric absorption due to extraterrestrial influences . J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 4566-4570.
Märcz F. Short-term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases. J. Atm. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59. N. 9. P. 975-982.
Mende S.B., Rairden R.L., Swenson G.R. Sprite spectra; N_2 1 PG band identification. Geoph. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 2633-2636.
Nickolaenko A.P., Hayakawa M. Natural electromagnetic pulses in the ELF range. Geoph. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 3103-3106.

Mareev E.A., Israelsson S., Knudsen E., et al. Studies of an artificially generated electrode effect at ground level. Ann. Geophysical. 1996. V. 14. P. 1095-1101.
Ogawa T. Fair-weather electricity // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 5951-5960.
Østgaard N., Mende S.B., Frey H.U., et al. Observation of non-conjugate theta aurora. Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. NO 21. 2125, doi: 10.1029/2003GL017914.
Oyama, K.I., Schlegel K. Anomalous electron temperatures above the South American Magnetic Field Anomaly. Plan. Space Sci. 1984. V. 32. N. 12. P. 1513-1522.
Pasko V.T., Inan U.S., Bell T.F. Blue jets produced by quasi-electrostatic pre-discharge thundercloud fields. Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 301-304.
Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F., Reising S.C. Mechanism of ELF radiation from sprites. Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 3493-3496.
Pinto, Ir. O., Gonzalez W.D. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a review. J. Atmos. Terr. Phys. 1989. V.51. P. 351-365.
Pinto, Ir., O., W. D. Gonzalez, I.R.C. Pinto, et al. The South Atlantic Magnetic Anomaly: three decades of research. J. Atmos. Terr. Phys. 1992. V. 54. P. 1129-1134.
Rairgen R.L., Mende S.B. Time resolved sprite imagery. Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 3465-3468.
Roble R.G., Hays P.B. A Quasi-Static Model of Global Atmospheric Electricity. 2. Elecrtical coupling between the upper and lower atmosphere. J. Geoph. Res. 1979. V. 84. P. 7247-7256.
Roble R.G. On Solar-Terrestrial relationships in atmospheric electricity. J. Geophys. Res. 1985. V. 90. D4. P. 6000-6012.
Roder H., Braun T., Schuhmann W, et al. Great Sumatra earthquake registers on electrostatic sensor. Eos, Trans. AGU, 2005, V. 86, No 45. P. 445-460.
Rycroft M.J., Israelsson S., Price C. The global electric circuit, solar activity and climate change // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.2000. V. 62. P. 1563-1576.
Sato M., Fukunishi H. Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events. Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. NO. 16. 1859, doi:10.1029/2003GL017291.
Sao K. Correlation between solar activity and the atmospheric potential gradient at the Earth's surface in the polar regions. J. Atmos. Terr. Phys. 1967. V. 29. P. 213-215.
Sentman D.D., Wescott E.M. Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft. Geoph. Res. Lett. 1993. V. 20. P. 2857-2860.
Sentman D.D., Wescott E.M., Osborn D.L., Hampton D.L., Heavner M.J. Preliminary results from the Sprite-94 campaign: red sprite. Geoph. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 1205-1208.
Sukhorukov A.I., Mishin E.V., Stubbe P. On blue jet dynamics. Geoph. Res. Lett. 1996. V. 23. P. 1625-1628.
Yukhimuk V., Roussel-Dupre R.A., Symbalisty E.M.D. Optical characteristics of Blue Jets produced by runaway air breakdown, simulation results. Geoph. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 3289-3292.
Zadorozhny A.M., Tyutin A.A. Universal diurnal variation of mesospheric electric fields. Adv. Space Res. 1997. V. 20. P. 2177-2180.

Глава. 21. Уровень естественной радиации на Земле.

В главе 21 обсуждаются: Проблема радиационного фона Земли; Земля в потоке космических лучей. Повышенный фон радиации в особых регионах Земли. Рост уровня радиации при уменьшении модуля геомагнитного поля. Изменения радиационного фона Земли в прошлом и настоящем. Роль радиации в изменениях климата и эволюции жизни.

21. 1. Радиационный фон.

Радиационный фон Земли формируют природные и антропогенные ионизирующие излучения, источниками которых являются не только космические, но и разнообразные земные явления - ядерные взрывы, выбросы предприятий атомной энергетики, отработанное ядерное топливо и др. Избежать радиоактивного облучения невозможно. Жизнь на Земле возникла и развивается в условиях постоянного облучения. Радиационный фон Земли складывается из следующих компонентов:

- космическое излучение;
- излучение от находящихся в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды природных радионуклидов;
- излучение от искусственных (техногенных) радионуклидов.

Облучение может быть внешним и внутренним. Внешнее облучение обусловлено источниками, расположенными вне тела человека (космическое излучение, наземные источники). Внутреннее облучение осуществляют радионуклиды, находящиеся в теле человека. За счёт космического излучения большинство населения получает дозу 35 мбэр в год (1 мбэр = 10^{-3} бэр). Такую же дозу (35 мбэр/год) человек получает от внешних земных источников естественного происхождения. Доза внутреннего облучения от естественных источников составляет в среднем 135 мбэр/год (3/4 этой дозы даёт не имеющий вкуса и запаха тяжёлый радиоактивный газ радон и продукты его распада). Таким образом, суммарная доза внешнего и внутреннего облучения человека от естественных источников радиации в среднем равна около 200 мбэр/год.

В результате деятельности человека в непосредственно окружающей его среде появились дополнительные источники радиации, в том числе естественные радионуклиды, извлекаемые в больших количествах из недр Земли вместе с углём, газом, нефтью, минеральными удобрениями, сырьём для строительных материалов. Вклад искусственных источников излучений в создании суммарной годовой дозы облучения человека иллюстрируется следующим списком (первая строка этого списка – уже обсуждавшийся выше суммарный вклад от естественных радиоактивных источников):

	мбэр/год
Естественный радиационный фон	200
Стройматериалы	140
Медицинские исследования	140
Бытовые предметы	4
Ядерные испытания	2.5
Полёты в самолётах	0.5
Атомная энергетика	0.2
Телевизоры и мониторы	0.1
Общая доза	500

21. 2. Космические лучи.

Космические лучи - элементарные частицы и ядра атомов, родившиеся и ускоренные до высоких энергий во Вселенной.

Физика космических лучей изучает:

- процессы, приводящие к возникновению и ускорению космических лучей;
- частицы космических лучей, их природу и свойства;
- явления, вызванные частицами космических лучей в космическом пространстве, атмосфере Земли и планет.

Изучение потоков высокоэнергетичных заряженных и нейтральных частиц, попадающих в магнитосферу Земли из космического пространства (первичные лучи), а также потоков вторичных частиц, родившихся в ядерных реакциях в верхних слоях земной атмосферы, - является важнейшими экспериментальными задачами.

Космические лучи являются составляющей естественной радиации (фоновой радиации) на поверхности земли и в атмосфере.

До развития ускорительной техники космические лучи служили единственным источником элементарных частиц высокой энергии. Так, позитрон и мюон были впервые найдены в космических лучах.

Химический спектр космических лучей в пересчете энергии на нуклон более чем на 94 % состоит из протонов, ещё на 4 % — из ядер гелия (альфа-частиц). Есть также ядра других элементов, но их доля значительно меньше. В пересчете энергии на частицу доля протонов составляет около 35 %, доля тяжёлых ядер соответственно больше.

Традиционно частицы, наблюдаемые в КЛ, делят на следующие группы: L, M, H, VH (соответственно, легкие, средние, тяжелые и сверхтяжелые). Химический состав первичного космического излучения отличается от состава звёзд и межзвёздного газа высоким (в несколько тысяч раз) содержанием ядер группы L (литий, бериллий, бор). Данное явление объясняется тем, что частицы КЛ под воздействием галактического магнитного поля хаотически блуждают в пространстве около 7 млн. лет, прежде чем достигнуть Земли. За это время ядра группы VH могут неупруго провзаимодействовать с протонами межзвёздного газа и расколоться на более легкие фракции. Данное предположение подтверждается тем, что КЛ обладают очень *высокой степенью изотропии*.

Потоки высокоэнергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве.

В околоземном космическом пространстве (ОКП) различают несколько типов космических лучей. К стационарным принято относить галактические космические лучи (ГКЛ), частицы альбедо и радиационный пояс. К нестационарным — солнечные космические лучи (СКЛ).

Галактические космические лучи (ГКЛ).

Галактические космические лучи (ГКЛ) состоят из ядер различных химических элементов с кинетической энергией E более нескольких десятков МэВ/нуклон, а также электронов и позитронов с $E > 10$ МэВ. Эти частицы приходят в межпланетное пространство из межзвёздной среды. Источником этих частиц являются сверхновые звезды нашей Галактики. Возможно, однако, что в области $E < 100$ МэВ/нуклон частицы образуются за счет ускорения в межпланетной среде частиц солнечного ветра и межзвездного газа. Дифференциальный энергетический спектр ГКЛ носит степенной характер.

Вторичные частицы в магнитосфере Земли: частицы альбедо, радиационный пояс.

Внутри магнитосферы, как и в любом дипольном поле, есть области, недоступные для частиц с кинетической энергией E, меньше критической. Те же частицы с энергией E

< $E_{кр}$, которые все-таки уже там находятся, не могут эти области покинуть. Эти запрещённые области магнитосферы называются зонами захвата. В зонах захвата дипольного (квазидипольного) поля Земли действительно удерживаются значительные потоки захваченных частиц (прежде всего, протонов и электронов).

В околоземном пространстве можно выделить две торообразные области, расположенные в экваториальной плоскости примерно на расстоянии от 300 км (в зоне Бразильской магнитной аномалии - БМА) до 6000 км (внутренний радиационный пояс земли - РПЗ) и от 12000 км до 40000 км (внешний РПЗ). Основным наполнением внутреннего пояса являются протоны с высокими энергиями от 1 до 1000 МэВ, а внешнего — электроны.

Максимум интенсивности протонов низких энергий расположен на расстояниях $L \sim$ 3 радиусов Земли от её центра. Электроны малых энергий заполняют всю область захвата. Для них нет разделения на внутренний и внешний пояса. Поток протонов во внутреннем поясе довольно устойчив во времени. Процесс взаимодействия ядер первичного космического излучения с атмосферой сопровождается возникновением нейтронов. Поток нейтронов, идущий от Земли (нейтроны альбедо), беспрепятственно проходит сквозь магнитное поле Земли. Поскольку нейтроны нестабильны (среднее время распада ~ 900 с), часть из них распадается в зонах, недоступных для заряженных частиц малых энергий. Таким образом, продукты распада нейтронов (протоны и электроны) рождаются прямо в зонах захвата. В зависимости от энергии и pitch-углов эти протоны и электроны могут либо оказаться захваченными, либо покинуть эту область.

Частицы альбедо - это вторичные частицы, отраженные от атмосферы Земли. Нейтроны альбедо обеспечивают радиационный пояс протонами с энергией до 10^3 МэВ и электронами с энергией до нескольких МэВ.

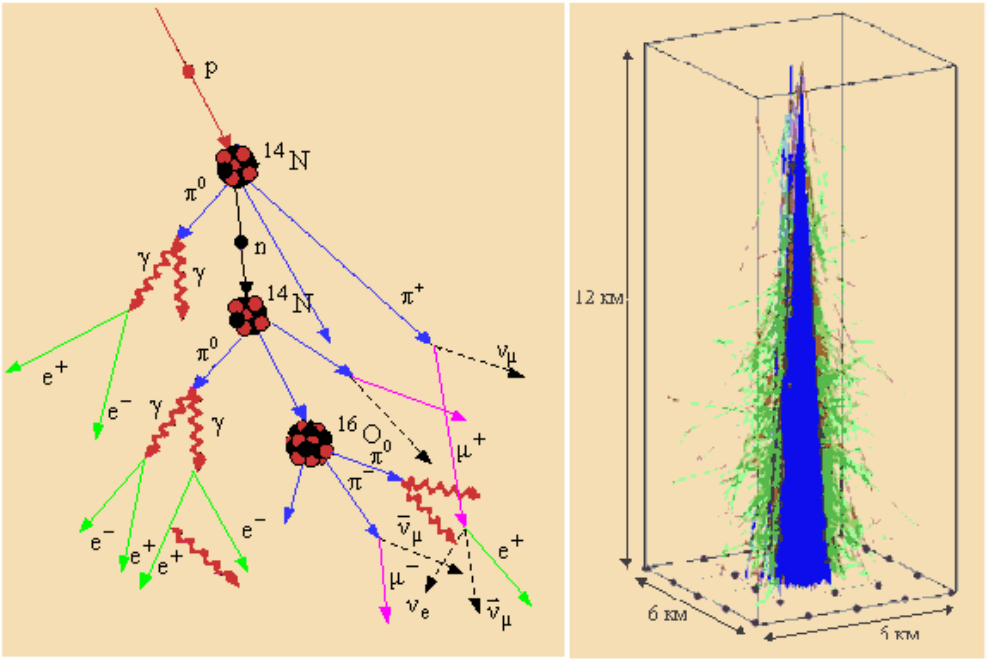


Рис. 21-1. Схема взаимодействия протона космических лучей с атомами азота и кислорода атмосферы. Атмосферный ливень космических лучей (справа).

Солнечные космические лучи.

Солнечными космическими лучами (СКЛ) называются энергичные заряженные частицы — электроны, протоны и ядра, — инжектированные Солнцем в межпланетное пространство. Энергия СКЛ простирается от нескольких кэВ до нескольких ГэВ. В

нижней части этого диапазона СКЛ граничат с протонами высокоскоростных потоков солнечного ветра. Частицы СКЛ появляются вследствие солнечных вспышек.

Космические лучи ультравысоких энергий.

Энергия некоторых частиц превышает Предел Грайзена-Зацепина-Кузьмина - теоретический предел энергии для космических лучей 6×10^{19} эВ. Несколько десятков таких частиц за год было зарегистрировано обсерваторией AGASA. Эти наблюдения ещё не имеют достаточно обоснованного научного объяснения.

Регистрация космических лучей.

Долгое время после открытия космических лучей, методы их регистрации не отличались от методов регистрации частиц в ускорителях, чаще всего - газоразрядные счётчики или ядерные фотографические эмульсии, поднимаемые в стратосферу, или в космическое пространство. Но данный метод не позволяет вести систематические наблюдения частиц с высокой энергией, так как они появляются достаточно редко, а пространство, в котором такой счётчик может вести наблюдения, ограничено его размерами.

Современные обсерватории работают на других принципах. Когда частица высокой энергии входит в атмосферу она, взаимодействуя с атомами воздуха на первых 100 г/см², рождает целый шквал частиц, в основном пионов и мюонов, которые в свою очередь рождают другие частицы, и так далее. Образуется конус из частиц, который называют ливнем. Такие частицы двигаются со скоростью превышающей скорость света в воздухе, благодаря чему возникает черенковское свечение, регистрируемое телескопами. Такая методика позволяет следить за областями неба площадью в сотни квадратных километров.

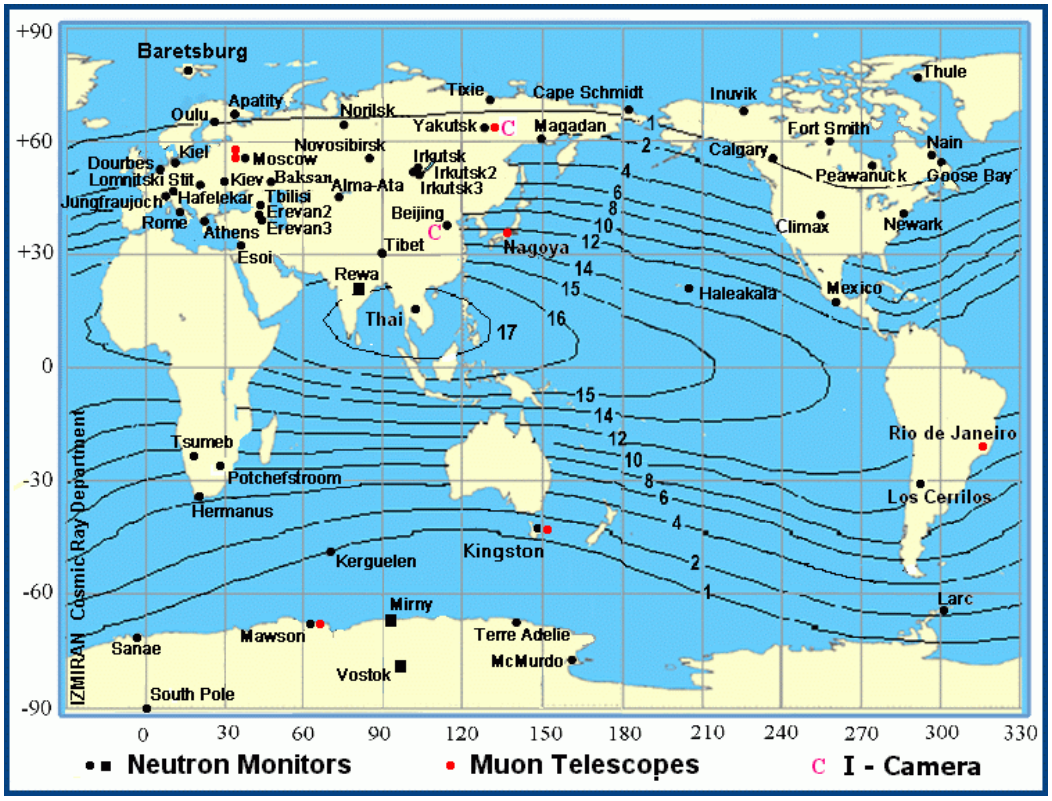


Рис. 21-2. Станции регистрации космических лучей.

21. 3. Естественный радиационный фон.

Космическое пространство пронизано заряженными частицами разного происхождения: галактическим излучением, корпускулярным излучением Солнца и захваченными частицами, удерживаемыми на околоземных орбитах магнитным полем Земли. Галактическое излучение состоит главным образом из протонов с небольшим количеством ионов гелия и более тяжелых металлов, а также электронов, фотонов, нейтронов. Энергетический спектр космических лучей простирается до огромных энергий — свыше 10^{20} эВ/нуклон. Корпускулярное излучение Солнца по составу близко к галактическому, но имеет заметный временной ход и ограничено более низкими энергиями частиц — до $5 \cdot 10^{10}$ эВ/нуклон. Эмиссия излучения протекает непрерывно и отражает 11-летний цикл солнечной активности.

Первичные космические лучи в результате процессов ионизации и ядерных взаимодействий быстро теряют свою энергию и практически исчезают на высоте около 20 км. Образуется вторичное излучение, интенсивность которого падает по мере снижения в атмосфере. Мощность дозы, поглощаемой воздухом на уровне моря в средних широтах, составляет 32 нГр/ч (с высотой она удваивается через каждые 1.5 тыс. м); для людей это соответствует средней мощности эквивалентной дозы 355 мкЗв/ч.

Естественный радиационный фон есть неотъемлемый фактор окружающей среды, оказывающий существенное воздействие на жизнедеятельность человека. Эволюционное развитие показывает, что в условиях естественного фона обеспечиваются оптимальные условия для жизнедеятельности человека, животных, растений. Поэтому при оценке опасности, обусловленной ионизирующим излучением, крайне важно знать характер и уровни облучения от различных источников.

Естественное фоновое облучение человека обусловливается внешним и внутренним облучением. Внешнее облучение создается за счет воздействия на организм ионизирующих излучений от внешних, по отношению к человеку, источников излучения, а внутреннее - за счет воздействия на организм ионизирующих излучений радиоактивных нуклидов, находящихся внутри организма.

Космические излучения и изотопы земной коры создают естественный радиационный фон, который характерен для каждой местности. Различают первичное и вторичное космическое излучение.

Первичное космическое излучение представляет собой поток частиц, попадающих в земную атмосферу из межзвездного пространства, солнечной системы. Оно состоит из протонов (примерно 90 %) и альфа-частиц (около 10 %). В меньших количествах присутствуют нейтроны, электроны, ядра легких элементов. Большая часть первичного космического излучения возникает в пределах нашей Галактики. Энергия частиц первичного излучения достигает 10^{12}–10^{14} МэВ. Кроме того, при солнечных вспышках возникает солнечное космическое излучение, которое приводит к увеличению дозы облучения на поверхности Земли.

Вторичное космическое излучение образуется в результате взаимодействия частиц первичного космического излучения с ядрами атомов, входящих в состав воздуха. Оно содержит практически все известные в настоящее время элементарные частицы. У поверхности Земли оно состоит в основном из фотонов, электронов и позитронов с энергией до 100 МэВ.

Мощность космических лучей, достигающих земной поверхности, зависит от географической широты и высоты над уровнем моря. Изменение мощности космических лучей в зависимости от географической широты обусловлено тем, что Земля похожа на гигантский магнит. Поэтому космические лучи, будучи заряженными частицами, отклоняются от экватора и собираются вместе в виде своеобразных воронок в области полюсов Земли. Области вблизи экватора, находящиеся на уровне моря, получают наименьшую дозу космического излучения, примерно равную 0,35 мЗв/год. На широте 50° доза космического излучения составляет 0,5 мЗв/год. Это обусловлено тем, что толстый

слой атмосферы, содержащий воздух и пары воды, разрушая, замедляя и останавливая движение многих быстрых заряженных частиц, двигающихся из космоса. С ростом высоты над уровнем моря мощность эквивалентной дозы космического излучения увеличивается. Например, на высоте 4500 м доза облучения из космоса составляет 3 мЗв/год, а на вершине пика Эвереста (8848 м над уровнем моря), соответствующий показатель равен 8 мЗв/год.

Фон радиоактивный**,** естественный радиационный фон, ионизирующие излучения, источниками которых являются космические лучи и естественно распределённые в природе радионуклиды. Космические лучи представляют собой поток частиц высоких энергий, приходящих на Землю из мирового пространства. Естественные радионуклиды принадлежат к сильно рассеянным элементам и повсеместно присутствуют в окружающей среде, а также в животных и растительных организмах. Фоновому облучению подвергаются все живые организмы Земли, в том числе человек (средние значения годовых доз облучения человека представлены в табл.). В зависимости от высоты над уровнем моря и содержания радионуклидов в окружающей среде Радиоактивный фон колеблется в значительных пределах. В отдельных районах с высоким содержанием природных радионуклидов он может достигать 1000 *мрад/год* и больше. Жизнь на Земле возникла и развивалась в условиях воздействия ионизирующих излучений. Биологическое значение радиоактивного фона, однако, окончательно ещё не выяснено. Считают, что часть наследственных изменений – *мутаций* у животных и растений связана с радиоактивным фоном.

Фоновое нейтронное излучение атмосферы.

Космический эксперимент «БТН-Нейтрон» на Российском сегменте МКС заключался в исследовании фонового нейтронного излучения Земли. С 2001 по 2007 годы в ИКИ РАН проводились работы по разработке и созданию аппаратуры БТН-М1 для реализации научного эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту Российского сегмента МКС.

Целями этого эксперимента являются:

- исследование вторичного нейтронного излучения верхней атмосферы Земли под воздействием энергичных заряженных частиц в магнитосфере,
- исследование нейтронной компоненты солнечных вспышек,
- исследование нейтронной компоненты радиационного фона на борту МКС.

Особенностью проведения эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту МКС является возможность синхронных измерений нейтронного излучения Марса в российском эксперименте ХЕНД на борту автоматической межпланетной станции НАСА «Марс Одиссей». Совместная обработка данных измерений с двух приборов на орбитах вокруг Земли и Марса создает уникальную возможность для стереоскопических измерений потоков нейтронов от солнечных вспышек с различных точек Солнечной системы. При этом возникает возможность сравнения вариаций радиационной обстановки на различных фазах солнечного цикла, и также сравнение радиационных условий на околоземных и межпланетных космических аппаратах.

По результатам измерений аппаратурой БТН-М1 построены карты нейтронного и гамма-излучения верхней атмосферы Земли на орбите МКС (пример карты излучения эпитепловых нейтронов представлен на рис. 12-3).

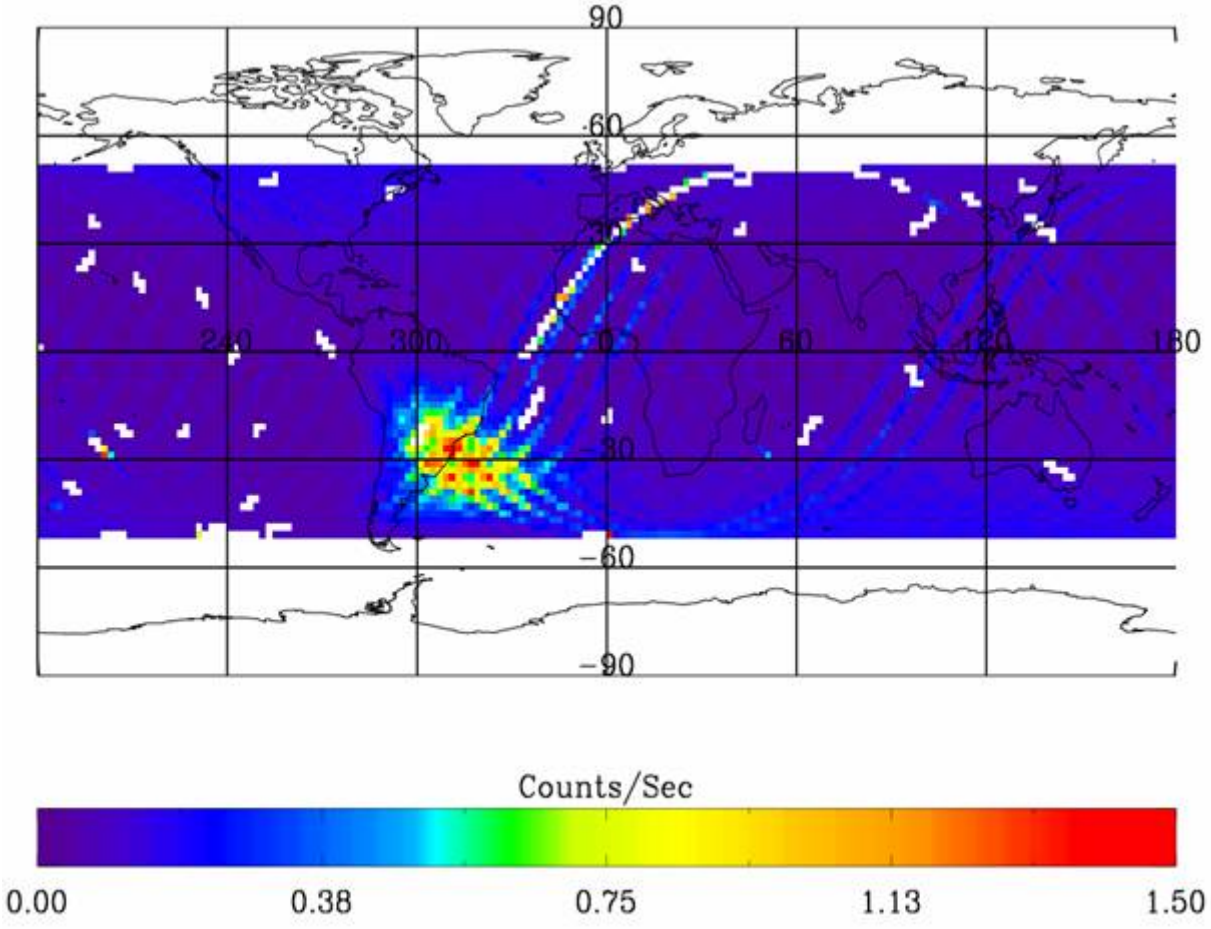


Рис.21-3. Карта излучения эпитепловых нейтронов на орбите МКС по данным эксперимента «БТН-Нейтрон».

На карте хорошо видно увеличение скорости счета нейтронов на высоких широтах и также в области Южно-Атлантической (Бразильской) Магнитной аномалии. В этих районах происходит увеличение потока энергичных заряженных частиц в верхней атмосфере Земли, что приводит в возрастанию вторичного нейтронного излучения.

21. 4. Радиационный пояс Земли.

Внутри магнитосферы, как и в любом дипольном поле, есть области, недоступные для частиц с кинетической энергией E, меньше критической. Те же частицы с энергией $E < E_{кр}$, которые все-таки уже там находятся, не могут эти области покинуть. Эти запрещенные области магнитосферы называются зонами захвата. В зонах захвата дипольного (квазидипольного) поля Земли действительно удерживаются значительные потоки захваченных частиц (прежде всего, протонов и электронов). Радиационный пояс Земли (РПЗ) в западной литературе обычно называется *поясом Ван-Аллена*. РПЗ был открыт американскими и советскими учеными в 1957—1958 годах и представляет собой в первом приближении тороид, в котором выделяется две области:

- внутренний радиационный пояс на высоте ~ 4000 км, состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ;
- внешний радиационный пояс на высоте ~ 17 000 км, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.

Зависимость положения нижней границы радиационного пояса — долготная. Над Атлантикой возрастание интенсивности начинается на высоте 500 км, а над Индонезией на высоте 1300 км. Если те же графики построить в зависимости от магнитной индукции

B, то все измерения уложатся на одну кривую, что еще раз подтверждает магнитную природу захвата.

Между внутренним и внешним радиационными поясами имеется щель, расположенная в интервале от 2 до 3 радиусов Земли. Потоки частиц во внешнем поясе больше, чем во внутреннем. Различен и состав частиц: во внутреннем поясе протоны и электроны, во внешнем — электроны. Применение неэкранированных детекторов существенно расширило сведения о радиационных поясах. Были обнаружены электроны и протоны с энергией несколько десятков и сот килоэлектронвольт соответственно. Эти частицы имеют существенно иное, по сравнению с проникающими, пространственное распределение.

Максимум интенсивности протонов низких энергий расположен на расстояниях L~3 от центра Земли. Малоэнергичные электроны заполняют всю область захвата. Для них нет разделения на внутренний и внешний пояса. Частицы с энергией десятки кэВ непривычно относить к космическим лучам, однако радиационные пояса представляют собой единое явление и должны изучаться в комплексе с частицами всех энергий. Поток протонов во внутреннем поясе довольно устойчив во времени. Первые эксперименты показали, что электроны высокой энергии (E >1-5 МэВ) сосредоточены во внешнем поясе. Электроны с энергией меньше 1 МэВ заполняют почти всю магнитосферу. Внутренний пояс очень стабилен, тогда как внешний испытывает резкие колебания.

Благодаря наличию сильного магнитного поля, планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) также обладают сильными радиационными поясами, напоминающими внешний радиационный пояс Земли.

Радиоизлучение радиационного пояса Юпитера впервые было обнаружено в 1955 г., однако природа излучения тогда оставалась непонятной. Непосредственные измерения в радиационном поясе Юпитера впервые были проведены КА Пионер-10, прошедшим через его наиболее плотную область в 1973 г.

Открытие радиационного пояса.

В настоящее время считается общепризнанным, что автором открытия радиационных поясов Земли является американский физик из университета штата Айова Джеймс Ван Аллен. Эта точка зрения была изложена в статье главного редактора журнала «Тайм» (май 1959 г.). Из нее следовало, что это открытие Ван Аллена, сделанное на основе измерений на спутниках «Эксплорер-1» и «Эксплорер-3», было логическим завершением результатов его ранних экспериментов на геофизических ракетах, в то время, когда «...ни один из трех тяжелых русских спутников не передал сообщений об излучении Ван Аллена. Одно из объяснений состоит в том, что русские перехитрили сами себя, отказавшись сообщить внешнему миру, как нужно интерпретировать сигналы с их спутников. Поскольку только нижние части орбит спутников проходили над советской территорией, русские ученые никогда не получали данных с больших высот. Если какой-то из советских спутников и имел запоминающее устройство, то оно не работало. Другое предположение состоит в том, что гейгеровские счетчики перегружались вблизи апогея излучением Ван Аллена и русские ученые не знали, как объяснить это необычное поведение. Собака, запущенная на втором спутнике, умерла примерно через неделю, но русские не сообщили, было ли это вызвано воздействием излучения. Вполне возможно, что они этого не знали».

Хорошо известно, что значит такого рода публикация в «Тайме» да еще с красочным портретом героя статьи на первой странице обложки! И поэтому представляется совершенно естественным, что после этого мировая пресса стала связывать открытие только с именем американского физика, и на страницах замелькали новые термины: «излучение Ван Аллена», «пояса Ван Аллена»...

Надо отдать должное самому автору открытия, быстро разобравшемуся в сложившейся ситуации: «Я выражаю существенное несогласие с разделом статьи относительно неудач советских исследователей по обнаружению захваченного излучения. По моему представлению, наша работа со спутником «Эксплорер-1» действительно обеспечила основное открытие, и я сделал первое публичное сообщение на объединенной сессии Американского Физического Общества и Национальной Академии наук США 1 мая 1958 г. Двумя неделями позже был успешно запущен советский «Спутник-3», и он обеспечил существенное подтверждение наших ранних результатов».

Итак, в начале августа 1958 г. было установлено, что в окрестности Земли присутствуют интенсивные, захваченные геомагнитным полем, потоки протонов, - с энергией порядка 100 МэВ (С. Н. Вернов) и электронов, - с энергиями в десятки кэВ (В. И. Красовский, Дж. Ван Аллен). Эти выводы вполне укладывались в рамки теорий того времени. До открытия явления, позже названного «радиационным поясом Земли», оставалось сделать еще один шаг - доказать, что заряженные частицы, «накопленные» в геомагнитном поле, могут дрейфовать в азимутальном направлении. Эта возможность обсуждалась еще в 1946 г. при разработке зеркальной магнитной ловушки и считалась проблематичной из-за предполагаемого образования пространственного заряда от разделяющихся при дрейфе электронов и ионов. Доказать существование дрейфа заряженных частиц могли только эксперименты с инжекцией заряженных частиц в геомагнитную ловушку. Ими стали высотные ядерные взрывы, проведенные США в августе — сентябре 1958 г.

Структура радиационного пояса.

Радиационные пояса принято разделять на внутренний и внешний, хотя это разделение носит весьма условный характер. **Внутренний** пояс расположен в экваториальных широтах, и его нижняя граница находится на различной высоте над разными районами Земли. Например, *над Южной Америкой пояс проходит лишь на высоте всего* 200-300 км, в то время как над Австралией — на высоте 1600 км. Максимальная концентрация протонов во внутреннем поясе (а он составлен в основном этими частицами) наблюдается на высоте около 3000 км. Энергии протонов здесь лежат в пределах 20-800 МэВ. Число протонов с этими энергиями значительно уменьшается при росте расстояния от Земли и при его сокращении. Из-за своей огромной проникающей способности протоны представляют значительную опасность для экипажей космических кораблей, достигающих значительных высот. Энергия электронов внутреннего пояса, как правило, бывает порядка 100 кэВ, а максимальная их концентрация наблюдается на высотах около 3400 км от земной поверхности.

Границы **внешнего** радиационного пояса принято считать находящимися на расстояниях 19 тыс. и 45 тыс. км от Земли. Здесь преобладают протоны с энергиями до нескольких сотен кэВ и электроны с энергиями от 40 до 100 кэВ.

Существующие теории объясняют появление частиц в радиационных поясах их дрейфом из «хвоста» магнитосферы во внешний пояс во время магнитных бурь под действием электрического поля и медленной диффузией частиц в магнитную ловушку при небольших вариациях магнитного поля. Процессы, приводящие к тому, что частицы покидают радиационные пояса, до сих пор остаются неясными. Лишь одна причина этого явления пока точно установлена - столкновение с частицами атмосферы. Остается надеяться, что дальнейшие исследования позволят ответить и на этот вопрос.

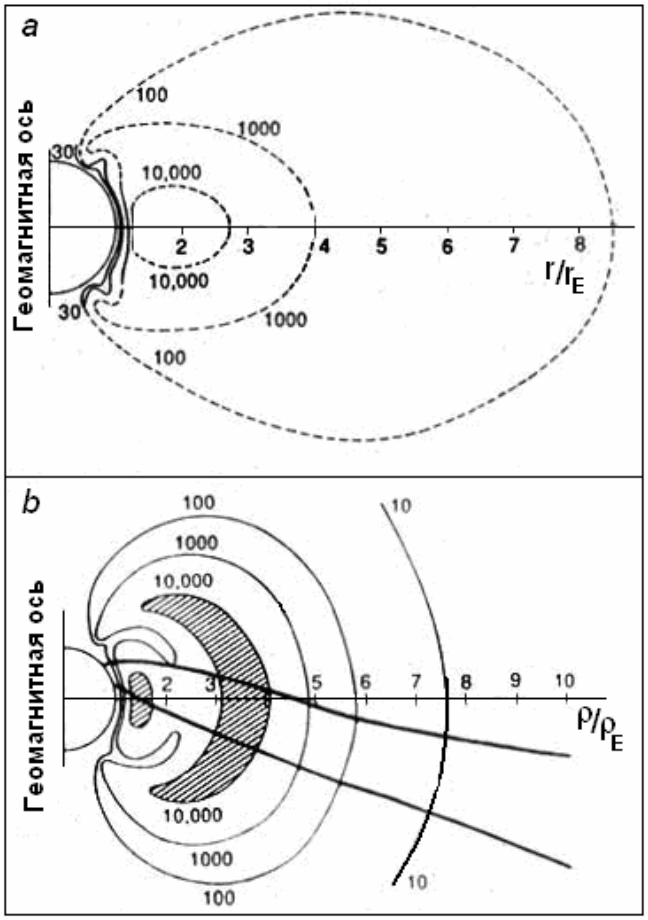


Рис. 21- 4. Схема строения радиационных поясов, предложенная Дж. Ван Алленом:
а) к началу 1959 г. (до анализа результатов с КА, запускавшихся к Луне). Единый пояс содержит максимум интенсивности на расстоянии двух радиусов Земли от ее центра плоскости экватора;
б) к середине 1959 г. (после анализа результатов с КА «Пионер-1, -2, -3, -4» и с III советского ИСЗ). В двух радиационных поясах максимумы находятся на удалении радиуса 1,5 земных (внутренний протонный) и 3,5 (внешний электронный). Цифры у контуров постоянной интенсивности характеризуют скорость учета экранированного счетчика Гейгера (в имп./с). Нанесена траектория удаления от Земли и возврата к ней КА «Пионер-3

Радиационные пояса других планет. Интерес к радиационным поясам вновь возник через 11 лет после их прямой регистрации при пролетах КА «Пионер-10, -11» и «Вояджер-1, -2» через магнитосферы планет-гигантов Солнечной системы: Юпитера (1973, 1974, 1979 гг.), Сатурна (1977, 1981 гг.), Урана (1986 г.) и Нептуна (1989 г.). Исследования показали, что их радиационные пояса во многом схожи с земными. Более энергичные захваченные частицы были обнаружены в их внутренних поясах и менее энергичные частицы — во внешних. Открыты и значительные отличия радиационных поясов планет-гигантов от земных.

Например, пояса Юпитера - оказались более сплюснутыми в плоскости экватора, - по сравнению с земными, - из-за быстрого вращения планеты вокруг своей оси.

Радиационные пояса Сатурна - оказались подобными земным. Из-за сильного наклона осей вращения Урана и оси его магнитного диполя к плоскости Земли меридиональные сечения его поясов, по-видимому, почти перпендикулярны плоскости

эклиптики. Радиационные пояса Нептуна во многом сходны с поясами Земли. Получается, что даже при столь различных удалениях от Солнца планет-гигантов их пояса формируются, по-видимому, одинаковыми источниками.

Изложенная здесь история исследования радиационного окружения Земли позволяет ответить на вопрос о приоритетах их первооткрывателей словами Дж. Ван Аллена из его письма в журнал «Тайм» 1959 г.: «...вклады американских и советских исследователей в понимании огромной радиационной области перемежались за последние 15 месяцев». Два радиационных пояса под названиями «внутренний протонный» и «внешний электронный», по-прежнему фигурируют в литературе несмотря на то, что в 1962 г. было установлено, что плотность энергии захваченных электронов во внутреннем поясе намного выше, чем протонов, а во внешнем, соответственно, наоборот.

Широкомасштабные исследования радиационных поясов в начале 60-х годов имели, кроме научного, и политическое значение. Трудно представить, до какого предела могло бы возрасти радиационное загрязнение земной магнитосферы, если бы ядерные взрывы в «безвоздушном пространстве» над плотной атмосферой продолжалось по-прежнему без

21. 5. Бразильская магнитная аномалия (БМА) - магнитная аномалия Земли в южном полушарии, у берегов Бразилии и Южной Африки (Бразильская и Кейптаунская аномалии, которые часто объединяются в Южно-Атлантическую аномалия (ЮАА)).

В физике космических лучей БМА играет очень важную роль, влияя на потоки высокоэнергетичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. *Из всех магнитных аномалий Земли наиболее значительное влияние на потоки частиц* (космических лучей) *оказывает БМА.* В этой области величина магнитного поля на уровне моря такая, как на высоте 1000 км вне аномалий. Поскольку БМА отрицательна и располагается на низких широтах, в этом районе происходит не только опускание зеркальных точек частиц, но и провисание дрейфовых оболочек к Земле. Радиальные градиенты потоков частиц на $L < 2$, соответствующих этой аномалии, очень велики (крутая внутренняя кромка РП), и указанное провисание дрейфовых оболочек приводит к значительному росту потоков частиц, связанному с увеличением L при переходе от границ к центру аномалии (на заданной высоте). В отличие от отрицательных магнитных аномалий на более высоких широтах (Кейптаунской и Беринговой), Бразильская аномалия оказывает сильное влияние на потоки частиц в гораздо более широком диапазоне питч-углов, практически полностью опустошая оболочки с $L < 1.1$ в течение одного дрейфового периода.

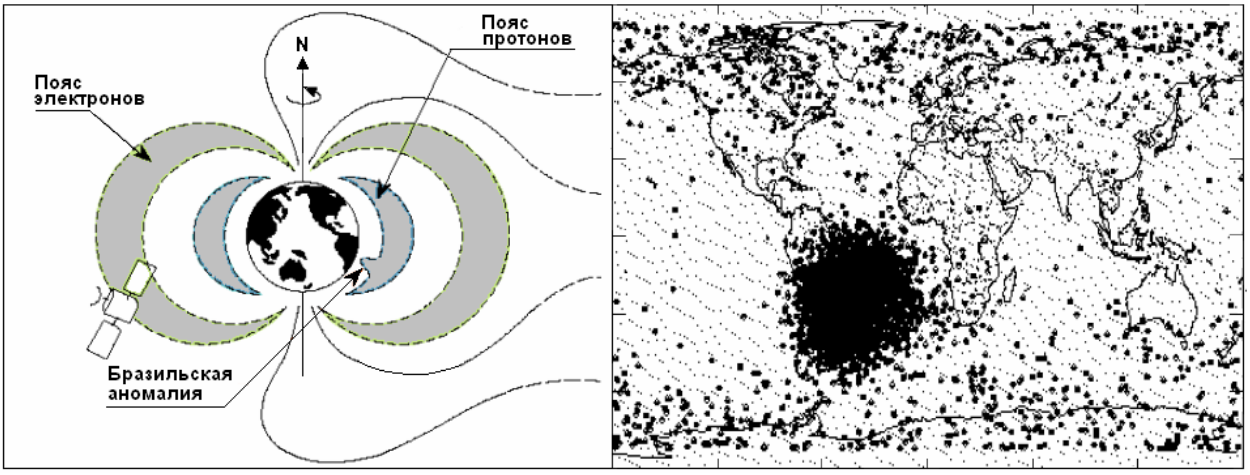


Рис. 21-5. Слева - радиационные пояса Земли. Особенность строения внутреннего пояса в районе Бразильской магнитной аномалии. Справа - выпадение заряженных частиц, регистрируемых космическим аппаратом UoSAT.

Обратим внимание на распределение интенсивности космических лучей, полученное с помощью космического аппарата UoSAT в период с 09.1988 по 05.1992. Спутник зафиксировал значительное увеличение концентрации космических частиц в районе Бразильской (Южно-Атлантической – SAA) магнитной аномалии (рис. 12-5 справа). Этот эффект хорошо изучен, повышение уровня радиации связывается с тем, что горизонтальная компонента геомагнитного поля в районе SAA ниже, относительно среднего поля на экваторе, примерно, в 1.5 – 2 раза. Эта особенность позволяет протонам внутреннего радиационного пояса «проваливаться» в образовавшуюся «воронку» (рис. 12-5 слева) и попадать в атмосферу Земли, что должно было бы приводить к возрастанию радиационного фона на поверхности Земли. По-видимому, это действительно, так, - известно, что в Бразилии неподалеку от г. Посус-ди-Калдас (в 200 км к северу от г. Сан-Пауло, в центре SAA) на небольшой необитаемой возвышенности зарегистрирован уровень радиации порядка 250 - 300 мЗв/год. Информация об этом встречается во многих источниках, однако, ни в одном из них не объясняется причина повышения уровня радиации. Возможно, причина такого повышения уровня радиации заключается именно в локальном уменьшении магнитного поля в этом регионе примерно в два раза. Насколько достоверна эта идея, пока судить ещё рано. Очевидно только то, что если на Земле модуль геомагнитного поля понизится вдвое, радиационный фон вырастет значительно больше.

21. 6. Земля в потоке космических лучей.

По космическим масштабам Земля расположена очень близко от Солнца. Многие специалисты считают, что она вообще находится в области солнечной короны. Потоки направленных от Солнца заряженных частиц солнечного ветра с энергий от 1 эВ до 100 и более МэВ на Землю не попадают, т.к. отклоняются её магнитосферой (см. рис. 21-6).

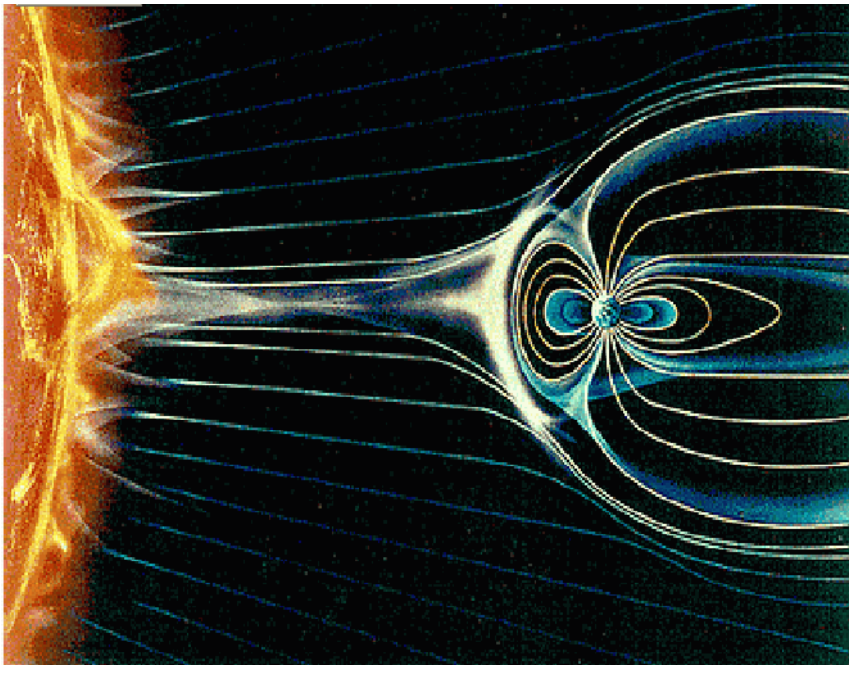


Рис. 21-6. Солнечно–земные связи. Магнитосфера Земли – защитная оболочка от солнечного ветра. Радиационные пояса.

Преодолев отклоняющее действие магнитосферы, в атмосферу Земли способны проникнуть только галактические космические лучи (ГКЛ), обладающие энергией, большей т.н. «энергии обрезания». Для различных широт эта энергия различается,

оставаясь в целом по Земле на уровне ~ 10 ГэВ. Частицы (протоны и мезоны) обладающие столь большой энергией, тем не менее, поверхности Земли не достигают, тормозясь в её атмосфере, рассеиваясь на ядрах атомов воздуха, генерируя жесткое излучение и приводя к рождению элементарных частиц, в основном π-мезонов. Мезоны распадаются с образованием мюонной и нейтринной компонент. Образующиеся при этих процессах мюоны и медленные нейтроны, регистрируются на Земле нейтронными мониторами ГКЛ.

Не вызывает сомнения, что поток солнечных космических лучей достигая Земли вызывал бы несовместимую с жизнью радиационную обстановку. К счастью для Земли, она защищена от солнечного ветра своеобразным магнитосферным «зонтом» (рис. 21-6). Представим себе, что по какой-то причине этот «зонт» порвался. На Землю, при этом, обрушится вся сила «дождя» солнечного ветра. Мало того, при этом произойдет разрушение радиационных поясов Земли и на Землю, дополнительно к «дождю», попадут ещё и «брызги» от разрушенных радиационных поясов, своеобразных «резервуаров» - накопителей того же «дождя».

Потоки частиц в окрестности Земли. Поток протонов (ионов) солнечного ветра (СВ) обладающих энергией E = 1 – 100 эВ на подходе к магнитосфере Земли равен j_o ~ (10 – 100)·10^8 см$^{-2}$ с$^{-1}$. Поток ионов с энергией 100 эВ: j = 10^8 см$^{-2}$ с$^{-1}$. Суммарный поток протонов СКЛ (E > 10 МэВ) в течение 19 цикла (1954-64) составил 7.2 10^{10} см$^{-2}$.
Плотность потока протонов СВ (на орбите Земли) 2.4·10^8 см$^{-2}$ с$^{-1}$. Плотность потока кинетической энергии - 0.3 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$. Плотность потока ГКЛ: 1 частица см$^{-2}$ с$^{-1}$, средняя плотность энергии частиц 1 эВ/см^3. Уменьшение плотности потока ГКЛ на 30 % приводит к увеличению концентрации стратосферного аэрозоля в 100 раз (Vanhellemont et al., 2002).
Энергия ГКЛ, проходящих сквозь магнитосферу и попадающих в атмосферу Земли определяется величиной т.н. геомагнитного обрезания. При этом частицы ГКЛ падающие вертикально на экватор, обладают энергией $E \geq$ 1.5 10^{10} эВ, на геомагнитную широту 51º $E \geq$ 2.5 10^9 эВ. Интенсивность ГКЛ на экваторе меньше, чем в полярных широтах, это т.н. широтный эффект. В радиационных поясах: для частиц с энергией E > 30 МэВ поток 10^3 см$^{-2}$ с$^{-1}$; для частиц E > 1 МэВ, поток 10^5 см$^{-2}$ с$^{-1}$

Радиация. Основные понятия. Дозы. Доза излучения определяется в зивертах, один зиверт равен 1 Дж/кг = 10^4 эрг/г = 10^2 бэр. Поглощенная доза (D) ранее определялась в радах, теперь – в греях (1 рад = 100 эрг/г = 0.01 грей = 2.388 10^{-6} кал/г). При поглощенной дозе D = 0.01 Гр (1 рад) происходит нарушение жизнедеятельности клеток. Принято считать D_o, как дозу, снижающую число выживших клеток в е раз. Для большинства делящихся клеток D_o = (1.2 – 2) Гр. 1 Гр = 10^4 эрг/г. Удельные энергии одного зиверта и одного грея - равны.

В состав первичного космического излучения входят протоны высоких энергий и ядра некоторых легких элементов. Их взаимодействие с ядрами атомов, присутствующих в атмосфере Земли, приводит к образованию ядер новых легких элементов, мюонов, нейтронов, рентгеновского и γ - излучения. Это так называемое вторичное космическое излучение достигает поверхности Земли.
Радиационный фон Земли складывается из:
- Космическое излучение составляет - 410 мкЗв;
- γ - излучение ^{40}К – 150 мкЗв;
- радионуклиды ториевого и уранового рядов – 160 и 100 мкЗв;
- космогенные нуклиды: ^{3}H, ^{7}Be, ^{14}C, ^{22}Na – 15 мкЗв.
Космическое излучение, величина которого ограничивается присутствием магнитосферы, составляет значительную часть радиационного фона.

Эффекты воздействия ионизирующего излучения на живой организм разделяют на две категории: соматические, которые возникают в организме человека, непосредственно

подвергшегося облучению, и генетические, проявляющиеся у его потомков. Получающиеся в процессе радиолиза воды свободные радикалы и окислители, обладая высокой химической активностью, вступают в химические реакции с молекулами белка и других структурных элементов биологической ткани, что приводит к изменению биохимических процессов в организме. В результате нарушаются обменные процессы, замедляется и прекращается рост тканей, возникают новые химические соединения, не свойственные организму. Это приводит к нарушению жизнедеятельности организма в целом. Генетические последствия облучения человека ионизирующей радиацией проявляются в виде хромосомных повреждений, генных мутаций, приводя к изменениям в фенотипе человека. Степень изменений зависит от важности вовлеченных в мутагенез генов, масштабов нарушений и характера наследования возникших мутаций. Авторы (Forster, et al. 2002), исследуя мтДНК людей, проживающих в условиях природного повышенного радиационного фона, показали, что воздействие ионизирующей радиации ускоряет механизм эволюционных мтДНК мутаций.

Степень воздействия поглощенного ионизирующего излучения зависит от того, каким типом излучения обусловлена доза. При одинаковой поглощенной дозе α - излучение гораздо опаснее β - или γ - излучений. Дозу следует умножать на коэффициент, отражающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. Пересчитанную таким образом дозу называют эффективной дозой. Единица эффективной дозы – 1 зиверт. Согласно принятым в нашей стране нормам, предельно-допустимая доза для жителей России равна 5 мЗв/год (Бердоносов, Сапожников, 2001).

Доза, которая приводит к гибели половины пораженного населения в течение 60 дней, именуется дозой ЛД50 (летальная доза, 50-процентное поражение). Для взрослого человека доза составляет ~ 4 Зв (Самнер и др., 1999).

Для млекопитающих и, в частности, человека, есть данные, что удвоение частоты самопроизвольных, спонтанных мутаций находится в диапазоне 0,5-2,5 Зв (Гуськов, 2003).

Статистически достоверные риски для лейкемии и сулидных опухолей, установленные у людей, переживших атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, обнаружены с уровня доз выше 60 мЗв. (Герасимова и др., 2001).

Рост уровня радиации при уменьшении модуля геомагнитного поля.

Построим ориентировочную, феноменологическую зависимость радиационной дозы D от величины модуля геомагнитного поля B. Очевидно, что в момент инверсии (экскурса), когда модуль поля значительно уменьшается, величина корпускулярного потока, попадающего на Землю, возрастает, иначе, увеличивается уровень радиации Земли. В целях упрощения оценок, будем полагать, что приходящая на Землю радиация (в зивертах) биологическими объектами, обитающими на Земле, полностью поглощается, при этом поглощенная доза (в греях) точно равна уровню радиации (в зивертах). Такое допущение, в частности, означает, что радиационный фон ГКЛ* (равный на поверхности Земли ~ $0.5 \cdot 10^{-3}$ Зв) эквивалентен дозе (~ $0.5 \cdot 10^{-3}$ Гр). Основанием к такому допущению служит то обстоятельство, что один зиверт, и один грей, - оба равны 10^4 эрг/г.

При построении зависимости: «радиационная доза – модуль геомагнитного поля» учтем величины общепринятых значений дозы. Будем считать, приближенно, что при уменьшении модуля геомагнитного поля в 100 раз, радиационная доза возрастает, по крайней мере, не менее чем в 100 раз. В действительности, увеличение дозы может быть даже больше. Докажем это утверждение. Энергия частиц, отклоняемых геомагнитным полем E примерно пропорциональна величине геомагнитного поля B: $E \sim B$. На заряженную частицу, попадающую в магнитное поле, как известно, действует сила Лоренца $F = Z\,evB$, равная центробежной силе mv^2/R, иначе: $mv = Z\,evR$. Переходя к более удобным единицам, получаем: $E = 300\,ZBR$, где: E – энергия частицы в МэВ, Z – заряд

частицы, B – индукция магнитного поля в Тл, R – радиус кривизны траектории частицы в м, e – заряд электрона, v – скорость частицы, m – её масса.

В наших оценках радиационного фона во время экскурсов и инверсий мы исходим из того, что с разрушением магнитосферы Земли будет происходить разрушение ее радиационных поясов и высыпание накопленных в них частиц. Учитывая эти обстоятельства, построим ориентировочную, феноменологическую зависимость радиационной дозы от величины модуля геомагнитного поля B. Энергия частиц, отклоняемых от попадания на Землю геомагнитным полем E (энергия обрезания) - примерно пропорциональна величине модуля геомагнитного поля B: $E \sim B$. На заряженную частицу, попадающую в магнитное поле, как известно, действует сила Лоренца $F = Z\,evB$, равная центробежной силе mv^2/R, иначе: $mv = Z\,evR$. Если E – энергия частицы в МэВ, Z – заряд частицы, B – индукция магнитного поля в Тл, R – радиус кривизны траектории частицы в м, e – заряд электрона, v – скорость частицы, m – её масса, то получаем: $E = 300\,ZBR$.

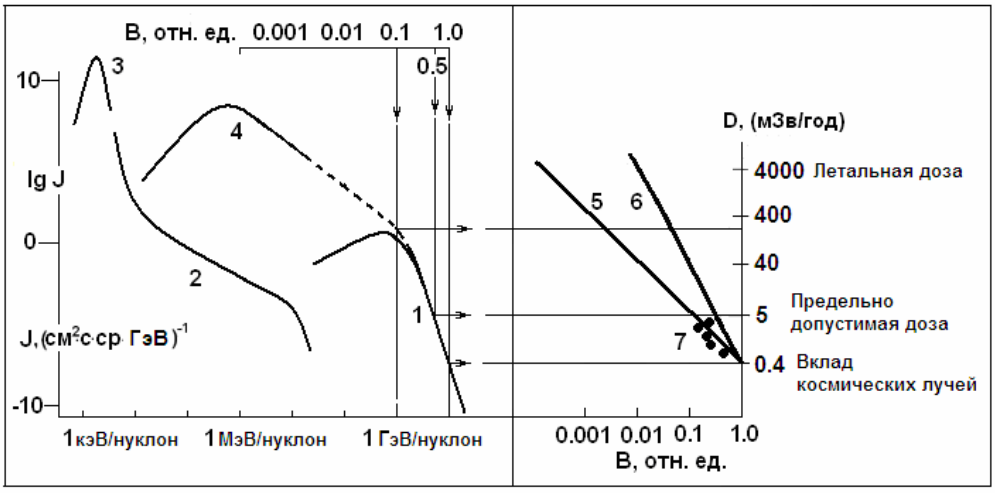


Рис. 21-7. Плотность потока КЛ, J (слева), и наведенная ими на поверхности Земли доза D (справа), в зависимости от энергии КЛ E : 1 – галактические; 2 – солнечные; 3 – солнечный ветер; 4 - частицы из радиационного пояса. Шкала вверху: величина модуля геомагнитного поля (модуль современного поля $B = 1$), соответствующая энергии обрезания КЛ с энергией E. ($B = 1$ соответствует $E = 10$ ГэВ). Справа - увеличение радиационной дозы на Земле (D) при уменьшении модуля поля (B)

Принято считать поток КЛ величиной фрактальной. Это означает, что число частиц потока КЛ N, обладающих энергией E: $N_{(E)} \sim E^{-d}$, где $1 < d < 2$, d – фрактальная размерность. И чем меньше величина магнитной индукции, тем частицы меньшей энергии способны преодолевать защитную магнитную оболочку Земли: $E \sim B$. Это соответствует тому, что плотность потока КЛ, попадающего на Землю, возрастает при уменьшении модуля ГМП. Доза ионизирующего излучения D на поверхности Земли определяется плотностью потока частиц J, коэффициентом передачи энергии L и временем действия ионизирующего излучения t: $D = J\,Lt$. Очевидно, что, если параметры Lt – не меняются, то плотность потока $J \sim N_{(E)}$, следовательно, и $D \sim N_{(E)}$. Поскольку $N_{(E)} \sim E^{-d}$, и $E = 300\,ZBR$, то $D \sim B^{-d}$. Эта зависимость показывает, что уменьшение величины интенсивности геомагнитного поля B приводит к росту дозы ионизирующего излучения D. Речь идет пока только об эффекте уменьшения отклонения заряженных частиц при уменьшении величины магнитной индукции Земли. Если учесть, что во время экскурсов и инверсий будут разрушаться радиационные пояса, то поток заряженных частиц на Землю возрастет ещё больше, что приведет к ещё большему возрастанию D. Фрактальная размерность d,

согласно нашей модели, может меняться от 1 до 2. При этом радиационная доза D, в зависимости от величины B, может меняться от $D \sim B^{-1}$ (линия 5 на рис.) до $D \sim B^{-2}$ (линия 6). На этом рисунке, на шкале $lg\ D$ отмечены три характерных значения дозы: 0.4 мЗв/год – вклад галактического космического излучения, 5 мЗв/год – предельно-допустимая доза для жителей России, ~ 4 Зв – летальная доза, 50-процентное поражение населения.

21. 7. Бериллий-10.

Анализируя пробы льда, учёные стремятся выяснить, какое количество радиоактивного бериллия-10 содержалось в атмосфере в разное время. Бериллий-10 возникает под воздействием космических высокоэнергетических частиц, бомбардирующих атмосферу Земли. В периоды повышенной активности Солнца, когда на его поверхности образуется большее, нежели обычно, количество пятен, магнитное поле светила защищает Землю от этих частиц, так что бериллий-10 образуется в меньших количествах.

Многие ученые считают, что изотопы бериллия ^{10}Be и ^{7}Be образуются не в недрах Земли, а в атмосфере – в результате воздействия космических лучей на ядра азота и кислорода. Незначительные примеси этих изотопов обнаружены в дожде, снеге, воздухе, в метеоритах и морских отложениях.

Однако если собрать воедино весь ^{10}Be, находящийся в атмосфере, водных бассейнах, почве и на дне океана, то получится довольно внушительная цифра – около 800 т.

Изотоп ^{10}Be (период полураспада $2{,}5 \cdot 10^{6}$ лет) представляет исключительный интерес для геохимии и ядерной метеорологии. Рождаясь в атмосфере, на высоте примерно 25 км, атомы ^{10}Be вместе с осадками попадают в океан и оседают на дне. Зная концентрацию ^{10}Be во взятой со дна пробе и период полураспада этого изотопа, можно вычислить возраст любого слоя на дне океана.

Бериллий-10 аккумулируется также в морских илах и ископаемых костях (кости сорбируют бериллий из природных вод). В связи с этим возникло предположение о возможности определения возраста органических остатков по ^{10}Be. Дело в том, что довольно широко освоенный радиоуглеродный метод непригоден для определения возраста образцов в интервале $10^{5}...10^{8}$ лет (из-за большой разницы между периодами полураспада ^{14}C и долгоживущих изотопов ^{40}K, ^{82}Rb, ^{232}Th, ^{235}U и ^{238}U). Изотоп ^{10}Be как раз «заполняет» этот разрыв.

Непрерывные астрономические наблюдения солнечных пятен ведутся с момента изобретения телескопа, т.е. с начала семнадцатого столетия. Для определения интенсивности появления солнечных пятен в предшествующую эпоху группа геофизиков из университета Улу (Финляндия) и Института аэрономии им. Макса Планка (Германия) под руководством Ильи Усоскина разработала физическую модель, позволяющую оценить количество пятен на Солнце в различные эпохи по содержанию изотопа бериллия в пробах льда, взятых в Антарктике и в Гренландии.

Исследовалось содержание изотопа бериллий-10, образующегося в атмосфере Земли под действием бомбардирующих ее высокоэнергетичных заряженных частиц. При росте солнечной активности рост интенсивности собственного магнитного поля Солнце приводит к уменьшению интенсивности космических лучей, и количество образующегося бериллия-10 снижается.

Результаты исследования оказались весьма впечатляющими. По мнению Майкла Локвуда из Лаборатории Резерфорда-Эпплтона, и раньше имелись свидетельства того, что в наши дни бериллий-10 образуется в атмосфере в значительно меньших количествах, чем прежде, однако корреляция между количеством бериллия и числом солнечных пятен оказалась поразительной. "Мы живем в момент, когда Солнце ведет себя крайне необычно", - утверждает он.

Новые данные также в определенной степени противоречат расхожим представлениям о связи солнечной активности и процессов глобального потепления. Результаты исследования, проведенного группой Усоскина, могут быть восприняты как подтверждение того, что потепление на Земле, наблюдаемое на протяжении последнего столетия, может быть связано с изменениями солнечного излучения. Связь между изменениями активности магнитного поля Солнца и климатическими процессами на Земле остается по-прежнему неясной.

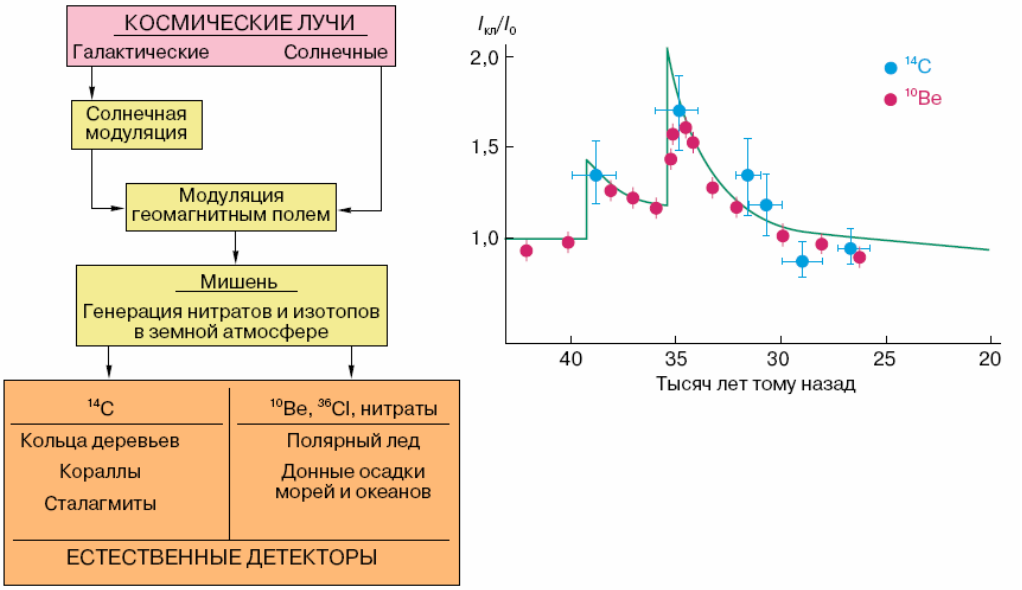


Рис. 21-8. Принцип работы естественных детекторов космических лучей. Космогенный след взрыва Сверхновой звезды в атмосферном радиоуглероде и ^{10}Be, $I_{кл}/I_o$ – относительная интенсивность космических лучей (Кочаров, 1996).

21. 8. Изменения радиационного фона Земли в прошлом.

Обратим внимание на данные, полученные рядом авторов по изучению временного распределения концентрацией изотопа ^{10}Be в осадочных породах. Рисунок 12-9 (Aldahan, Possnert, 2003, - с увеличением масштаба) демонстрирует связь между геомагнитными экскурсами и концентрацией изотопа ^{10}Be. В работах (Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank et al., 1997) показано, что этот изотоп является индикатором интенсивности галактических космических лучей, достигнувших поверхности Земли и оставивших «следы» в осадках. Использование именно этого изотопа (^{10}Be) связано с тем, что его концентрация в породах земной коры очень мала и появление этого изотопа полностью определяется интенсивностью космических лучей, т.к. ^{10}Be получается при бомбардировке ГКЛ атомов атмосферного азота.

Способность галактических космических лучей (ГКЛ) «пробить» толщу атмосферы и достигнуть земной поверхности зависит от их энергии, величины геомагнитного поля Земли и широты «точки приема ГКЛ», т.к. вектор модуля поля изменяется в зависимости от географической (магнитной) широты места, в котором регистрируются «следы» ГКЛ. Например, для современного значения величины геомагнитного поля, в области экватора энергия частиц должна быть порядка (и более) 14 ГэВ, на широте 40° энергия частиц попадающих на Землю снижается до 4 ГэВ, а на широте 60° - 0.5 ГэВ и т. д. (эффект геомагнитного обрезания). Очевидно, что энергия и плотность потока ГКЛ, которые могут достигнуть поверхности Земли, может возрасти неоднократно в том случае, если на некотором пространстве земной поверхности величина геомагнитного поля окажется практически равной нулю. Принято считать, что в результате ядерной реакции протонов ГКЛ с атомами азота атмосферы образуется очень редкий в литосфере изотоп ^{10}Be. Его

наличие свидетельствует о присутствии ГКЛ, а его концентрация пропорциональна плотности потока.

Отношение изотопов [^{10}Be]/[^{7}Be + ^{9}Be + ^{10}Be] = 0.028 (Aldahan, Possnert, 2003) показывает, что ГКЛ проникали сквозь атмосферу и попадали в почву. ГКЛ проходят толщу вещества атмосферы 5 г/см^2 и после этого средняя концентрация частиц ГКЛ составляет 0.2 см$^{-3}$. Таким образом, наличие повышенной концентрации ^{10}Be может быть индикатором того, что в определенное время, в определенном пространстве Земли, геомагнитное поле имело существенно меньшую величину, чем обычно. Известно, что увеличение концентрации изотопа ^{10}Be в осадочных породах совпадает по времени с прохождением экскурсов и инверсий (Raisbeck et al., 1985; Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank et al., 1997).

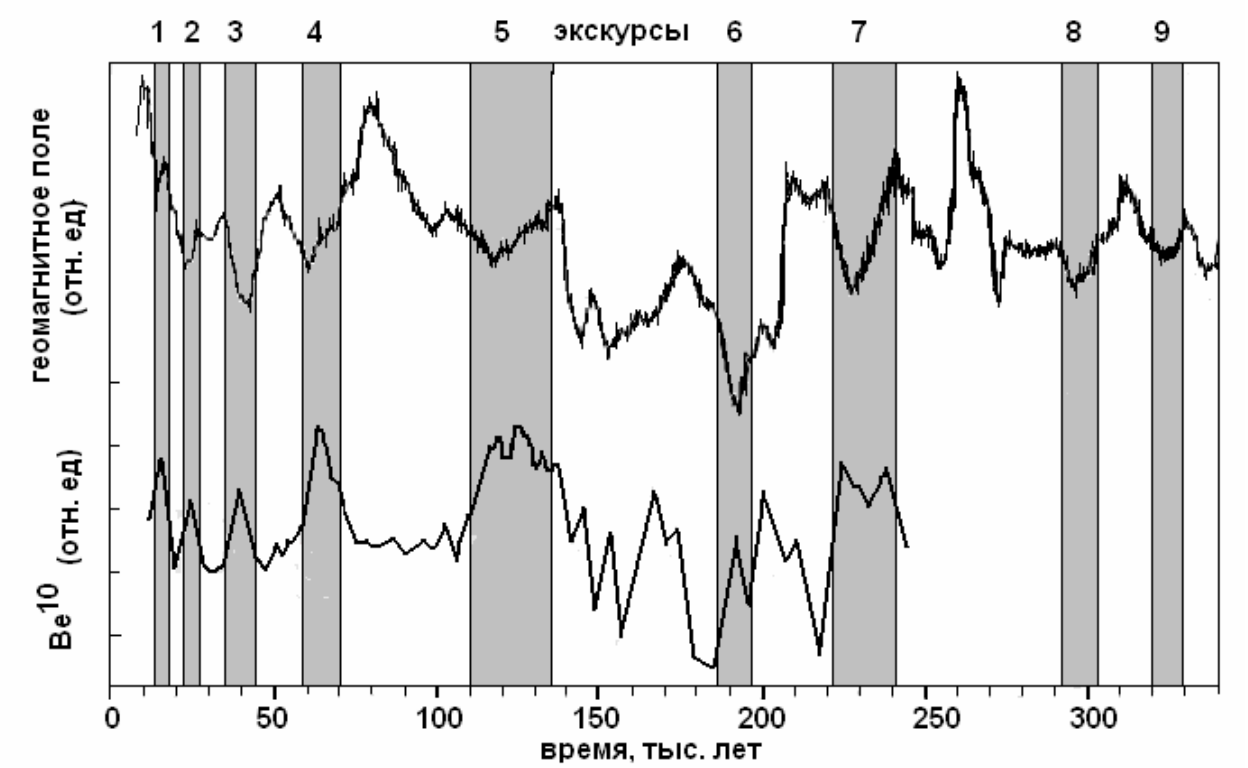


Рис. 21-9. Интенсивность геомагнитного поля и концентрация изотопа ^{10}Be в осадках. Вертикальные полосы – понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (8); Biwa – III (9).

21. 9. Радиация и климат.

Возможная связь между изменениями климата и вековыми вариациями геомагнитного поля обсуждается уже много лет. Обычно рассматривается корреляция между изменениями климата и вековыми вариациями магнитного поля Земли, инверсиями и экскурсами. При экскурсах, в отличие от инверсий, после смены полярности геомагнитное поле вскоре ее восстанавливает. Общепризнанной является связь глобальных климатических изменений с экскурсами геомагнитного поля, но выводы различны. Широко известна концепция (Christl et al., 2004), в которой космические лучи рассматриваются, как ответственные за ионизацию атомов атмосферы, и поэтому в период экскурса, сопровождающегося уменьшением интенсивности поля и, как следствие, усилением проникающего в атмосферу потока космических лучей, должно развиваться похолодание за счет интенсивного образования облаков, имеющих высокое альбедо. Согласно этой гипотезе, периоды потепления должны совпадать с минимальными

потоками космических лучей, и наоборот, что и характеризует некоторые экскурсы хрона Брюнес. Наряду с этим подтвержденными являются факты потеплений (Svensmark, 2007; Guskova et al., 2007), совпадающих с экскурсами Лашамп и Гетенбург.

Связь между инверсиями магнитного поля Земли и биологической эволюцией обсуждалась ранее. Предложенные способы влияния инверсий на эволюцию жизни включали увеличение уровня мутаций из-за повышенного уровня радиации в эти периоды и изменений климата, приводивших к вымиранию фауны. Близкое совпадение по времени оледенений с этапами быстрого массового вымирания и одновременного или последующего расцвета различных групп организмов обсуждается в работе (Салоп, 1977), где эффективная мутагенная жесткая радиация от вспышек Сверхновых рассматривается, как непременное условие эволюции. Автор (Tsacas, 1984) считал, что инверсии и экскурсы приводят к мутациям регуляторных генов, чем объясняется отсутствие переходных форм, в то же время многие виды исчезают из-за усиления генетической нагрузки и экстремальных условий окружающей среды. Многие авторы обнаруживают временную корреляцию резких изменений климата с революционными событиями в эволюции фауны и человека, принимая, что климатические потепления и похолодания вызывали исчезновение одних видов и способствовали появлению новых, лучше адаптированных. Однако стресс от изменений в окружающей среде не дает механизма, согласно которому он мог бы оказывать селективное давление на предка человека, существующего в то время, и приводить к появлению нового семейства или вида (Behrensmeyer, 2006). До настоящего времени утверждалось, что достаточное экранирование от космического излучения, как первичного, так и вторичного обеспечивает атмосфера, и, если бы даже вся Земля подверглась воздействию такого же потока космических лучей, как её высокоширотная область, биологический эффект был бы незначительным. Однако авторы работы (Белишева, Гак, 2002) представили экспериментальные данные, свидетельствующие о значении вариаций космических лучей для состояния биосистем. Исследования проводились в приполярной области, где минимальная величина горизонтальной компоненты геомагнитного поля не противодействует проникновению космического излучения в атмосферу, и во время интенсивной вспышечной активности Солнца у поверхности Земли резко увеличивается радиационный уровень, по разным событиям величина увеличения достигает нескольких порядков (Grieβmeier et al., 2005). Экспериментами на клеточных культурах была показана сопряженность феномена массового слияния клеток с вариациями космических лучей, и авторы делают вывод, что возрастание потока космических лучей может радикально менять свойства живых объектов, инициируя в них процессы реорганизации генетического материала, что, по мнению авторов, может иметь отношение к механизмам эволюции. Оценкой связи плотности атмосферы с величиной уровня радиации (Grieβmeier et al., 2005) на поверхности планеты во время солнечных вспышек, доказано, что плотность земной атмосферы позволяет ожидать биологических эффектов вторичной радиации от проникающего космического излучения во время мощных протонных событий, когда более половины площади земной поверхности подвергается воздействию излучения. В такой ситуации необходимо выяснить, насколько правомерны оценки, касающиеся роли космического излучения в изменениях климата и эволюции жизни во время экскурсов и инверсий геомагнитного поля.

Наиболее интересные и достоверные результаты по изменению климата были получены при бурении ледников Антарктиды и Гренландии. Авторы (Petit et al., 1999), при анализе кернов льда этих ледников, обнаружили, что за предыдущие 420 тыс. лет на Земле произошло четыре цикла, в течение которых температура поверхности Земли четырежды сначала плавно, за время, примерно, 100 тыс. лет, уменьшалась, а затем довольно резко возрастала. Синхронно возрастал и уменьшался объем ледников на Земле. Максимальная концентрация пылевых частиц в кернах льда наблюдалась в слоях,

соответствующих периодам похолодания (рис. 21-10), причем, оказалось, что чем выше концентрация пыли, тем ниже температура. Таких данных опубликовано довольно много, но ни в тексте статей, ни на рисунках, невозможно определить, какой процесс происходит раньше: увеличение концентрации пыли предшествует похолоданию, или наоборот? Нам не встречались так же работы, в которых оценивался бы коэффициент корреляции этих зависимостей. Поэтому, оцифровав данные по вариациям температуры и содержания пыли с интервалами между отсчетами, равными 1 тыс. лет, мы рассчитали функцию их взаимной корреляции и получили, что максимального значения -0.56 она достигает при нулевом временном сдвиге и 95 %-ном доверительном интервале (-0.62,-0.49). Это позволяет сделать вывод о том, что с высокой степенью значимости температура и концентрация пыли в кернах льда менялись практически одновременно и в противофазе. Ход временных вариаций температуры, концентрации пыли и модуля геомагнитного поля показан на рис. 12-10. Видно, что экскурсы сопровождаются минимальными значениями интенсивности поля и повышенными концентрациями космогенного нуклида ^{10}Be в слоях льда и осадочных пород. Об этом говорят и другие авторы, указывая на почти двукратное возрастание потока космических лучей при 10%-ном уменьшении интенсивности геомагнитного поля (Christl et al., 2004). Из рис. 21-10 видно, что в периоды экскурсов 1, 5, 7, 8 и 9 происходит уменьшение концентрации пыли и потепление, в периоды экскурсов 3, 4, 6 концентрация пыли была незначительной, и происходило похолодание, что позволило нам предположить, что экскурсы начинались в разных экологических условиях.

Обнаруженные нами корреляции вынуждают рассматривать два возможных варианта: 1) похолодание на Земле вызвало пылевые бури, но тогда геомагнитное поле и концентрация ^{10}Be в эту модель «не вписываются» и 2) периодические мощные извержения вулканов и супервулканов привели к заселению стратосферы пылью, которая экранировала солнечное излучение, что привело к похолоданию. Во время экскурса, когда интенсивность геомагнитного поля понижалась, проникающие космические лучи разрушали пылевой слой в стратосфере, что привело к осаждению пыли и быстрому потеплению. Соответственно, если экскурс начинался в условиях прозрачной стратосферы, то развивался сценарий формирования облаков, роста альбедо и похолодания. В настоящее время достаточно сложно оценить, насколько правдоподобны 1-ый и 2-ой варианты. Первый следует из теории Миланковича и в настоящее время считается предпочтительным. Однако теория Миланковича не находит объяснения многим известным фактам, в частности, очень быстрым изменениям климата, как потеплениям, так и похолоданиям. Поэтому мы рассмотрим альтернативный, второй вариант. Однако, для того, чтобы этот вариант имел необходимые основания, следует доказать, что в периоды экскурсов и инверсий значительно возрастал уровень радиации.

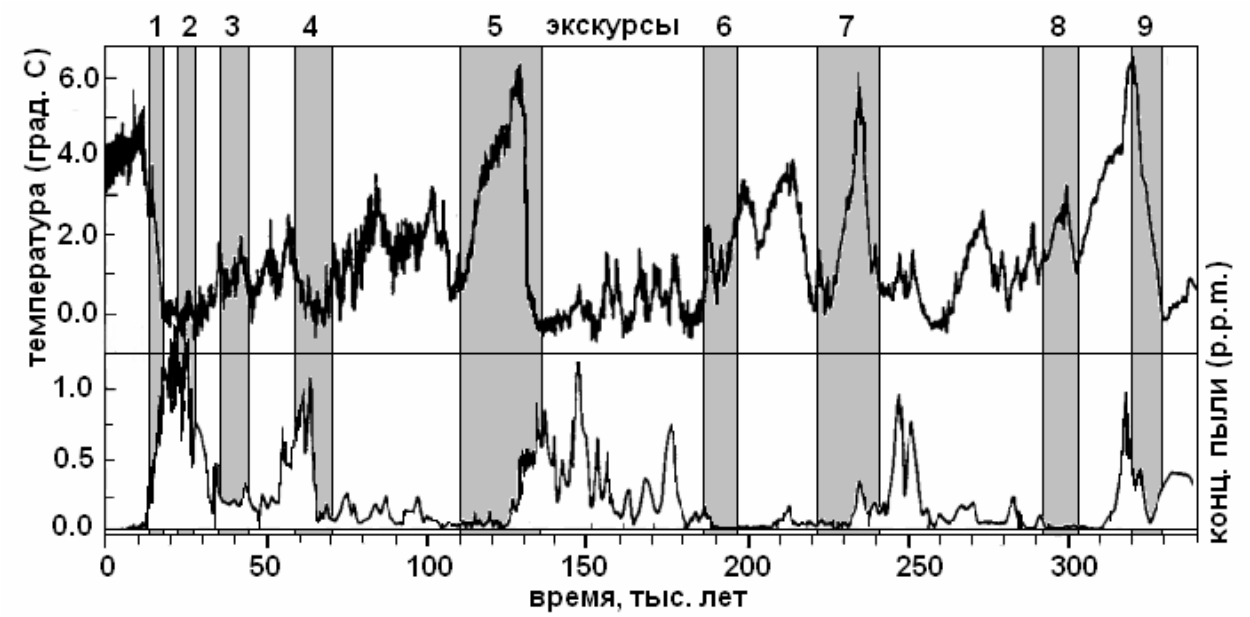


Рис. 21-10. Изменение температуры поверхности Земли и относительной концентрации пыли во льду. Вертикальные полосы – понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (8); Biwa – III (9).

21. 10. Радиация и жизнь.

Рассмотрим, как изменение экологических условий, а именно, повышение уровня радиации и изменение климата, в периоды инверсий и экскурсов отразилось в эволюции жизни и, особенно, эволюции человека. Антропологи и генетики согласны в том, что все известные виды гоминид возникли в Африке. Антропологи (Wood, 2002) аргументируют этот вывод тем, что возраст неафриканских находок ископаемых останков гоминид не превышает 2 млн. лет. Тогда как в Африке найдены останки, имеющие возраст около 6 - 7 млн. лет. Генетические исследования эволюционной истории человечества так же указывают на Африку, как на место зарождения человека (Кузнецов, 2008).

Установленные даты в эволюции человека сопоставлены с возрастом экскурсов и инверсий геомагнитного поля:

Экскурсы и инверсии	млн. лет	События в эволюции человека
Моно Лэйк	0.03-0.04	исчезновение Неандертальцев
Лашамп	0.05	мутация гена *FOXP2*, отвечающего за речь
Блэйк	0.1	общий предок современного человека (по Y-хромосоме)
Ямайка	0.23	общий предок современного человека (по мтДНК)
Император, Биг лост	0.5	разделение линий человека и неандертальцев
Матуяма - Брюнес	0.8	возраст предка человека по бета-глобину
Реньон	2.1- 2.2	появление *Homo erectus*
Гаусс - Матуяма	2.4 - 2.8	мутации, обеспечившие появление *Homo erectus*
Гильберт - Гаусс	3.5	разделение линии человека на грацильную и массивную
Эпоха 5 - Гильберт	5	разделение линий человека и шимпанзе
Эпоха 6 - эпоха 5	7.2	отделение линии гориллы от линии человека

Следует пояснить некоторые табличные сведения. Так, две мутации, обнаруженные у всех обследованных современных людей, произошли во время инверсии Гаусс-Матуяма, они предшествовали увеличению объема мозга у предков человека и появлению *Homo erectus* (Кузнецов, 2008) Одна инактивировала ген, кодирующий наработку сахарозы на поверхности клетки, причем у неандертальцев эта мутация отсутствует, а вторая - ген миозина, в результате которой произошло значительное уменьшение объема и силы мощных жевательных мускулов, характерных для человекообразных обезьян. По мнению авторов, были ликвидированы анатомические ограничения роста объема черепной коробки, и, как следствие, произошло трехкратное увеличение объема головного мозга представителей линии *Homo*. Творческие способности человека, как считают авторы, имеют биологическую причину в виде мутации гена FOXP2, который, как обнаружено (Klein, 2003; Evans et al., 2005), отвечает за речевые способности человека, его коммуникабельность, и у неандертальцев эта мутация отсутствует.

Эволюционные события в африканской и европейской фауне, ссылки в (Кузнецов, 2008) синхронны событиям в эволюции человека.

События в эволюции африканской и европейской фауны	Время, млн. л.
Разделение слонов на африканских и азиатских (мтДНК)	5.0 (6.0)
Разделение мтДНК линий мамонта и азиатского слона	4.0
Разделение африканских слонов на два вида	2.6
Разделение семейства африканской коровьей антилопы на виды	5.0, 0.5, 0.4, 0.2, 0.13
Разделение европейских зябликов на группы	0.06
Разделение европейских голубых сорок на два вида	0.070
Разделение африканской *Pediculus humanus* на два вида	0.070

В качестве примера можно привести и обнаруженную палеонтологами замену больше половины африканской фауны. На фоне оледенения в северном полушарии в интервале 2.8 до 2.5 млн. лет назад в Африке зафиксировано сильное похолодание, а, начиная с 2.5 млн. лет, происходит резкое увеличение разнообразия фауны, в том числе и представителей линии *Homo* (Кузнецов, 2008). На геомагнитной шкале дата 2.5 млн. лет соответствует инверсии Гаусс-Матуяма.

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что в периоды экскурсов и инверсий геомагнитное поле значительно уменьшается и космическое излучение проникает в атмосферу, меняя оптические свойства стратосферы и вызывая глобальные изменения климата, и также значительно увеличивая радиационный фон на поверхности Земли. Увеличение радиации в эти периоды оказывается достаточным для того, чтобы иметь биологические эффекты. Доминирующее воздействие роста радиационного фона на эволюцию жизни, мы попытались объяснить на основе теории дрейфа магнитных полюсов Земли во время инверсий и экскурсов (Kuznetsov, 1999). В этой работе показано, что в период инверсий и экскурсов магнитные аномалии остаются источниками магнитного поля, поскольку в моменты инверсий величина поля значительно понижается, но никогда не бывает равной нулю, при этом величина остаточного поля не равномерна по земной поверхности: она заметно выше в областях магнитных аномалий. Так, анализ данных (Кузнецов, 2008) показал, что уменьшение модуля поля в момент инверсии Матуяма-Брюнес и предшествующего ей экскурса Хурамильо, было различным для различных регионов. Пробы брались в районах расположения базальтов, излившихся на

дно океанов вблизи Индонезии (0º, 160ºE) и западного берега Африки (0º, 20ºW). В первом случае уменьшение модуля поля было не более чем десятикратным от его нормальной величины, а во втором понижение модуля было большим, - не менее чем тридцатикратным. Эти данные подтверждаются другими аналогичными наблюдениями. Так, показано, что в момент этой инверсии в базальтах, излившихся в районе острова Борнео (7ºN, 122ºE), модуль поля уменьшился, примерно, в 5 - 7 раз. Аналогичное по величине уменьшение было зафиксировано вблизи побережья Калифорнии, в то время как, значительное понижение модуля было зарегистрировано вблизи западного побережья Африки, где было обнаружено уменьшение модуля геомагнитного поля в периоды инверсии Матуяма-Брюнес и экскурса Хурамильо не менее чем в сто раз. Приведенные результаты соответствуют нашему утверждению, что понижение величины геомагнитного поля в моменты инверсий и экскурсов неодинаково в различных регионах, и что этот эффект связан с расположением глобальных магнитных аномалий. Все они, кроме Бразильской аномалии, располагаются в приполярных регионах, обеспечивая для близлежащих территорий в период протекания инверсий и экскурсов защитные свойства магнитного поля. Нашу концепцию подтверждает так же полученная в (Clement, 2004) широтная зависимость длительности периода инверсии Матуяма-Брюнес: оказывается, что чем ближе к экватору точки определений, тем короче время смены полярности. Из вышесказанного можно сделать такой вывод. Поскольку Африка и Европа удалены от глобальных магнитных аномалий, то на эти континенты во время инверсий и экскурсов не распространяются защитные свойства магнитного поля аномалий. В этих регионах воздействие факторов, связанных с вариациями поля проявляется с наибольшей силой, а именно, максимальное падение интенсивности геомагнитного поля обеспечивает наибольший рост космического излучения, проникающего в атмосферу, который в свою очередь генерирует в этих регионах радиационный уровень выше, чем остальных.

21. 11. Современный уровень радиации.

В течение всего времени приборной регистрации величины момента геомагнитного поля, он стабильно уменьшается. Это не может не сказаться на уровне радиации. Рис. 12-11 показывает, что за последние 100 лет величина концентрации Be-10 выросла примерно в 3 раза относительно предыдущих лет. Следовательно, в течение последних 300 лет уровень радиации на Земле – увеличивается.

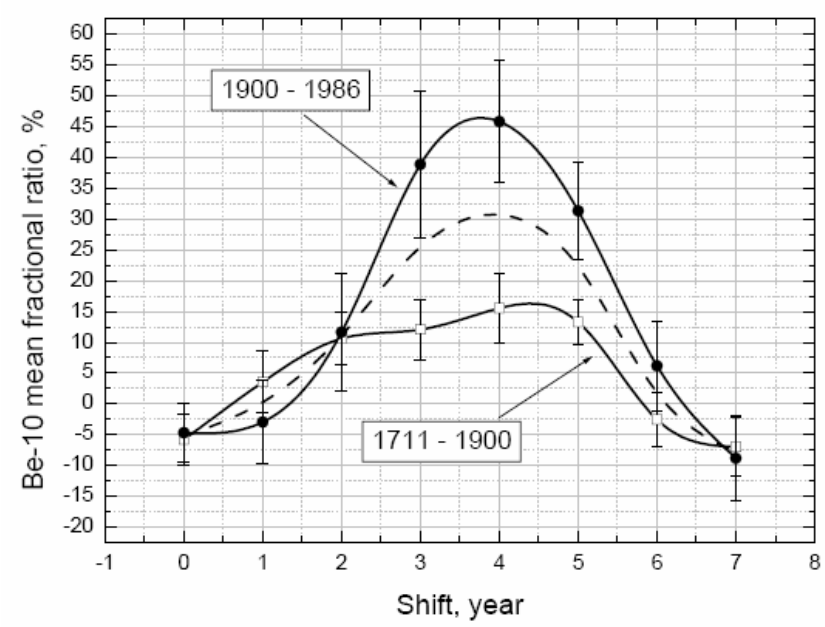


Рис. 21-11. Концентрация Be-10 в зависимости от сдвига времени для двух эпох. Штриховая линия – усреднение (Nikitin et al., 2005).

Литература.

Бердоносов С.С., Сапожников Ю.С. Ионизирующее излучение и окружающая среда. Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. **7**(2). С. 40-46.

Белишева Н.К., Гак Е.З. Значение вариаций космических лучей для функционирования биосистем // В кн.:: Сб. научных докл. VII Межд. конф. «Экология и развитие Севера-Запада России». - Санкт-Петербург. - 2002. - С.118-129.

Герасимова Н. В., Блинов Б. К., Марченко Т. А. и др. Чернобыльская катастрофа. Итоги и проблемы преодоления ее последствий в России 1986-2001. 2001.

Гуськов Е.П. Генетика, радиация и здоровье.
URL: http://www.eco-pravda.km.ru/science/iar15s3.htm

Кочаров Г.Е. Экспериментальная плеоастрофизика: достижения и перспективы. Соросовский образовательный журнал. 1996. № 11. С. 66-72.

Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. - Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. - 336 с.

Салоп Л.И. О связи оледенений и этапов быстрых изменений органического мира с космическими явлениями // Бюллетень М. о-ва исп. природы, отд. Геологии. - 1977. - Т. 52, № 1. - С. 5-32.

Aldahan A., Possnert G. Geomagnetic and climatic variability reflected by ^{10}Be during the Quaternary and late Pliocene. Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. doi: 10.1029/2002GL016077.

Behrensmeyer A.K. Climate change and human evolution // Science. - 2006. - V. 311. - P. 476-478.

Christl M., Mangini A., Holzkamper S., Spotl C. Evidence for a link between the flux of galactic cosmic rays and Earth's climate during the past 200,000 years // J. Atmosph. Solar-Terrestr. Physics. - 2004. - V. 66. - P. 313–322.

Clement B.R. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude // Nature. - 2004. - V. 428. - P. 637-640.

Evans P.D., Gilbert S.L., Mekel-Bobrov N. et al.. Microcephalin, a gene regulating brain size, continues to evolve adaptively in humans // Science. - 2005. - V. 309. - P. 1717-1720.

Forster L., Forster P. et al. Natural radioactivity and human mitochondrial DNA mutations. PNAS. 2002. V. 99(21). P. 13950-13954.

Frank M., Schwarz B., Baumann S., et al. A 200 kyr record of cosmogenic radionuclide production rate and geomagnetic field intensity from ^{10}Be in globally stacked deep-sea sediments. Earth Planet. Sci. Lett. 1997. V. 149. P. 121-129.

Grießmeier J.-M, Stadelmann A., Motschmann U., Belisheva N.K. et al. Cosmic ray impact on extrasolar Earth-like planets in close-in habitable zones // Astrobiology. - 2005. - V. 5, № 5. - P. 587-603.

Guskova, E. G., Raspopov O.M., Piskarev A.L., Dergachev V.A. Manifestation of the Gothenburg geomagnetic field excursion in the Barents Sea bottom sediments // Geomagnetism and Aeronomy. - 2007. - V. 47, № 6. - P. 781-786.

Klein R.G. Whither the Neanderthals? // Science. - 2003. - V. 299. - P. 1525-1527.

Kuznetsov V.V. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals // Phys. Earth Plan. Inter. - 1999. - V.115. - P. 173-179.

Nikitin I., Stozhkov Yu, Okhlopkov V., Svirzhevsky N. Do Be-10 and C-14 give us the information about cosmic rays in the past? 20th International Cosmic Ray Conference Pune. 2005. V.2. P. 243-246.

Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. - 1999. - V. 399. - P. 429-436.

Raisbeck G.M., Yiou F., Bourles D., Kent D.V. Evidence for an increase in cosmogenic ^{10}Be during a geomagnetic reversal. Nature. 1985. V. 315. P. 315-317.

Robinson C., Raisbeck G.M., Yiou F., et al. The relationship between ^{10}Be and geomagnetic field strength records in central North Atlantic sediments during the last 80 ka. Earth Planet. Sci. Lett. 1995. V. 136. P. 551-557.
Svensmark H. Cosmoclimatology: a new theory emerges. // Astronomy & Geophysics. - 2007. - V. 48, № 1. - P. 1.18–1.24. doi:10.1111/j.1468 4004.2007.48118
Tsakas S.C Geomagnetic reversals as a possible explanation for periods of punctuated speciation on Earth // Genetics. - 1984. - V. 107, № 3. - PT.2. s108.
Vanhellemont F., Fussen D., Bingen C. Cosmic rays and stratospheric aerosols: Evidence for a connection? Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. P. 10-1 – 10-4.
Wood B. Palaeoanthropology: Hominid revelation from Chad // Nature. - 2002. - V. 418. - P. 133-135

Глава 3. Возраст Земли.

В главе 03 обсуждаются: состав и возраст составных элементов Галактики, возраст Земли, методы его измерения, геохронологическая шкала, палеонтологическая шкала, изотопные методы оценки возраста, палеонтологические методы, геохимические методы.

3. 1. Состав и возраст некоторых типов населения Галактики.

Населения Галактики	Содержание тяжелых хим. элементов, %	Предельный возраст, млрд. лет
Шаровые скопления, звезды-субкарлики, короткопериодические цефеиды	0,1 - 0,5	12 - 15
Долгопериодические переменные, звезды с большими скоростями	1	10 - 12
Звезды Главной Последовательности солнечного типа, красные гиганты, планетарные туманности, новые звезды	2	5 - 7
Звезды спектрального класса А	3 - 4	0,1-5
Звезды классов О и В, сверхгиганты	3 - 4	0,1

Возраст Галактики может быть оценён по времени, необходимому для образования наблюдаемого в ней количества тяжёлых элементов. Их синтез прекратился, очевидно, в нашем районе Галактики с образованием Солнечной системы (т. е. 4,6 млрд. лет назад). Если синтез произошёл внезапно, за сравнительно короткое время, то для образования современного соотношения изотопов тяжёлых элементов он должен был произойти за 4-6 млрд. лет до возникновения Солнечной системы, т. е. 9 - 11 млрд. лет назад. Относительная кратковременность периода интенсивного синтеза подтверждается как анализом относительного состава указанных элементов, так и астрономическими данными - звездообразование в Галактике было особенно интенсивным в начальный период. Т. о., возраст Галактики, определяемый по синтезу элементов, составляет от 9 до 11 млрд. лет.

Возраст доступной для наблюдений части Вселенной (Метагалактики) оценивается по закону расширения Метагалактики. Согласно закону Хаббла, галактики удаляются друг от друга со скоростью 50-100 км/с на Мпк. Если эта скорость мало изменилась с начала расширения, то величина, обратная скорости, даёт оценку максимального возраста Метагалактики: $^{1}/_{50}$ км$^{-1}$·с·Мпк - 20 млрд. лет, а $^{1}/_{100}$ км$^{-1}$·с·Мпк - 10 млрд. лет. Однако обычно предполагают, что расширение Метагалактики замедляется со временем, поэтому возраст её должен быть несколько меньше. Оценка возраста в сильной степени зависит от точности определения постоянной расширения и от величины замедления, т.е. от предполагаемой модели мира.

3. 2. Возраст небесных тел.

Возраст Земли и метеоритов, а отсюда косвенно и других тел Солнечной системы наиболее надёжно оценивается методами ядерной космохронологии, например, по количеству изотопов свинца ^{206}Pb и ^{207}Pb, образовавшихся в исследуемых породах в результате радиоактивного распада изотопов урана ^{238}U и ^{235}U. С момента прекращения контакта исследуемого образца породы с возможными источниками ^{238}U и ^{235}U, образование изотопов ^{206}Pb и ^{207}Pb идёт за счёт имеющихся в образце изотопов урана. Поскольку скорость радиоактивного распада постоянна, количество накопившихся

изотопов свинца характеризует время, прошедшее с момента изоляции образца до момента исследования. Практически возраст породы определяется по отношению содержания изотопов ^{206}Pb и ^{207}Pb к содержанию природного изотопа ^{204}Pb, не порождённого радиоактивностью. Этот метод даёт для возраста древнейших пород земной коры оценку до 4,5 млрд. лет. Анализ содержания изотопов свинца в железных метеоритах даёт обычно оценки до 4,6 млрд. лет. Возраст каменных метеоритов, определяемый по радиоактивному превращению в них изотопа калия $^{40}К$ в изотоп аргона ^{40}Ar, колеблется от 0,5 до 5 млрд. лет. Это указывает на то, что часть метеоритов возникла сравнительно недавно.

Анализ пород, доставленных с Луны на Землю, показал, что количество содержащихся в них инертных газов - продуктов радиоактивного распада - отвечает возрасту пород от 2 до 4,5 млрд. лет. Т. о., возраст лунных пород и древнейших пород земной коры примерно одинаков.

Планеты Солнечной системы, но современным представлениям, возникли из вещества в конденсированной фазе (пылинок или метеоритов). Планеты, следовательно, моложе некоторых метеоритов. В связи с этим возраст Солнечной системы оценивается обычно в 4,6 млрд. лет.

Возраст отдельных звёзд и Солнца оценивают на основе теории строения и эволюции звёзд. Согласно этой теории, звёзды светят за счёт гравитационной энергии и ядерной энергии, выделяемых соответственно при сжатии звезд и в термоядерных реакциях, протекающих в их центральной области (на разных стадиях эволюции преобладающую роль играет то один, то другой из этих источников энергии). Изменение типа термоядерной реакции знаменует переход к новой стадии эволюции. Длительность каждой стадии эволюции тем меньше, чем более массивна звезда, и с учётом зависимости между массой и светимостью для звёзд главной последовательности длительность приближённо выражается следующими формулами.

Длительность стадии формирования звезды (первоначального сжатия от протозвезды до звезды главной последовательности):

$$t_c \approx 30\ M/L \text{ (млн. лет)} \qquad (3.1)$$

(масса M и светимость L звезды в данной фазе эволюции выражаются в долях массы и светимости Солнца – $M_\odot$ и $L_\odot$). Звёзды малых масс, находящиеся на этой стадии, могут иметь весьма большой абсолютный возраст. Так, древнейшие карликовые звёзды с массой менее 0.05 $M_\odot$ (переменные типа UV Кита) не завершили ещё этой стадии.

Длительность стадии горения водорода (пребывания звезды на главной последовательности) - самая продолжительная стадия в жизни звезды, когда источником энергии звезды являются термоядерные реакции водородного цикла:

$$t_H \approx 30\ M/L \text{ (млн. лет)} \qquad (3.2)$$

Сумма $t_c + t_H$ даёт макс. оценку возраста звезды, пребывающей на главной последовательности.

Длительность стадии горения гелия (стадии красных гигантов) t_{He} составляет примерно 0,1 t_H. Суммой $t_c + t_H + t_{He}$ оценивается максимальный возраст красного гиганта и сверхгиганта. Последующие стадии эволюции, связанные с "выгоранием" в звёздах углерода н кремния, скоротечны и характерны для массивных звёзд-сверхгигантов (они заканчивают свою эволюцию взрывом). При этом могут образоваться нейтронные звёзды и чёрные дыры. Звёзды с массами $M \leq 1.22\ M_\odot$ в процессе эволюции становятся, по-видимому, белыми карликами. Оценок длительности существования звёзд на этих стадиях нет.

Т. о. возможно установить пределы возраста звезды данной массы, находящейся в той или иной стадии эволюции, но находится ли она в начале этой стадии или уже почти прошла её, выяснить значительно сложнее. Прямую оценку возраста звезды можно было бы получить, сравнив процентное содержание водорода и гелия в её ядре (находится расчётом внутреннего строения звезды) и оболочке (находится по спектру звезды). При

условии не перемешивания внешнего и внутреннего слоев, но изменению состава звезды в центре, обусловленного термоядерными процессами, можно было бы определить её возраст. К сожалению, соотношение гелия и водорода и звёздах оценивается очень грубо, и то лишь у звёзд спектр. классов О и В, в спектрах которых наблюдаются сильные линии гелия. Для Солнца эта оценка очень приблизительна - 5 млрд. лет со времени начала стадии горения водорода. Это согласуется с оценками возраста Солнечной системы, но не исключено также, что Солнце старше её на 1-2 млрд. лет. Если возраст Солнца 5 млрд. лет, то, согласно формуле (2), оно будет находиться на главной последовательности ещё около 5 млрд. лет. Пройдёт ли оно затем стадию красного гиганта, или же сразу будет белым карликом, пока неясно, хотя первое вероятнее. В старейших из известных звёздных скоплений звёзды с массой Солнца или несколько меньшей ещё занимают главную последовательность, и их дальнейшая эволюция пока с достаточной полнотой неизвестна.

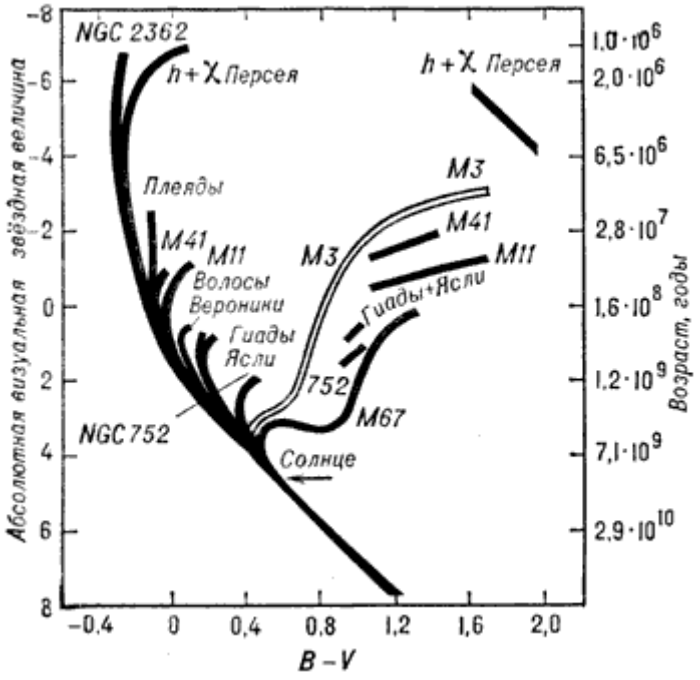


Рис. 3-1. Определение возраста звёздных скоплений по диаграмме цвет - светимость нескольких рассеянных звёздных скоплений и одного шарового скопления М3, В - V – показатель цвета. Каждой точке Главной Последовательности соответствует максимальный возраст $t_c + t_H$ звёзд (на рис.3-1 - справа). Точка, где звёзды скопления сворачивают с Главной Последовательности, указывает возраст ($t_c + t_H$) звёзд скопления. Судя по химическому составу, Солнце не является ровесником Галактики, оно моложе, хотя и относится к старейшим звёздам галактического диска.

Возраст звёздных скоплений и ассоциаций, в которых звёзды возникли почти одновременно, оценивается намного надёжнее, чем возраст отдельных звёзд. Наиболее массивные звёзды рассеянных скоплений быстро продвигаются в своей эволюции, уходят с главной последовательности и становятся красными гигантами или (наиболее массивные) - сверхгигантами. На диаграмме Герцшпрунга - Ресселла такого скопления (рис. 3-1) легко отличить те звёзды, которые заканчивают своё пребывание на главной последовательности и готовятся уйти с неё. Формула (3.2) даёт оценку возраста этих звёзд и, следовательно, всего скопления. У самых молодых рассеянных скоплений возраст оценивается в 1 млн. лет, самые старые - имеют возраст 4,5-8 млрд. лет (при различных предположениях о количестве водорода, превратившегося в гелий).

Возраст шаровых звёздных скоплений оценивается аналогичным путём, хотя диаграммы Герцшпрунга - Расселла для шаровых скоплений имеют свои отличия.

Оболочки звёзд в этих скоплениях содержат значительно меньше химических элементов тяжелее гелия, т. к. скопления состоят из древнейших звёзд Галактики (в их состав почти не вошли тяжёлые элементы, синтезированные в др. звёздах, все имеющиеся там тяжёлые элементы синтезированы в них самих). Оценки возраста шаровых скоплений - от 9 до 15 млрд. лет (с погрешностью 2-3 млрд. лет).

Возраст Галактики оценивается в соответствии с теорией её эволюции. Первичное газовое облако (протогалактика) за первый миллиард лет распалось, очевидно, на отдельные сгустки, положившие начало шаровым скоплениям и звёздам сферической подсистемы Галактики. В ходе эволюции взрывавшиеся звёзды первого поколения выбрасывали в пространство газ с примесью тяжёлых хим. элементов. Газ концентрировался к галактической плоскости, и из него образовывались звёзды следующего поколения, составляющие более сжатую к плоскости систему (население). Обычно выделяют несколько населений, характеризующихся различием свойств входящих в них звёзд, содержанием в их атмосферах тяжёлых элементов (т. е. всех элементов, кроме H и He), формой занимаемого в Галактике объёма и разным возрастом.

3. 3. Возраст Земли.

Возраст Земли так велик, что его трудно себе вообразить. Но если предположить, что нашей планете всего один год, то человечество просуществовало менее пяти часов.

Человечество веками пыталось определить возраст Земли. В начале XVII века архиепископ Армы Джеймс Ашер вычислил дату сотворения мира по Библии. Он определил ее как 4004 год до н. э., эту хронологию можно найти в старых изданиях Библии.

Геродот, наблюдая за скоростью роста дельты Нила (Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир. 1991. 447 с.), пришел к выводу, что Земля существует очень долго. До Аристотеля Землю считали вечной и неизменной, но во времена мрачного средневековья христианская догма ограничила продолжительность её истории описанием Моисея. Архиепископ Дж. Ашер (1581-1656) утверждал, что Земля была сотворена 26 октября 4004 г. до н.э. в 9 часов утра. Это утверждение было кульминацией в длинной серии подсчетов, основанных на изучении последовательности событий, отраженных в Библии, начало которых берется от Сотворения мира. Например, согласно другому подсчету: от сотворения мира до Потопа прошло 1656 лет, от Потопа до Авраама – 292 года, до исхода евреев из Египта – 503, до возведения Храма – 432, до вавилонского плена – 414 и до Рождества Христова – 614 лет и т.п. Вывод Ашера был результатом длительного изучения первоисточников на языках оригиналов, в том числе генеалогий, систем календарей и затмений, на которых могли основываться точные подсчеты времени и даты. Его оценка возраста земли пользовалась доверием в широких кругах и оставалась признанной долгое время после смерти Ашера.

Лорд Кельвин, выдающийся физик своего поколения, вооруженный формулами точной науки, объявил, что возраст Земли не может превышать 20 млн. лет. Он полагал, что первичным источником энергии во Вселенной может быть только гравитация, поэтому энергия Солнца должна убывать со временем. Аналогичных взглядов придерживались Лейбниц, Бюффон, Гельмгольц и др.

Теперь мы знаем, что Ашер ошибся - более чем в миллион раз! На сегодня принятый учеными возраст Земли составляет 4600 миллионов лет. Он приблизительно такой же, как и возраст Солнца и остальных планет.

В конце XVII века датский врач и естествоиспытатель Николаус Стено (который со временем тоже стал епископом) заключил, что верхние слои осадочных пород, накапливающиеся под водой, моложе, чем нижние. В XIX веке это открытие помогло ученым разработать относительную хронологию пород и, таким образом, частично определить возрастную структуру Земли. Наука о датировании пород известна под

названием геохронология. Однако лишь в начале XX века британские и американские ученые обнаружили, что некоторые радиоактивные элементы можно использовать как "часы" для фиксации огромных периодов времени. Атомы этих элементов со временем разлагаются, образуя другие элементы. Так, например, по истечении довольно длительного периода уран превращается в свинец, излучая при этом радиацию.
Девять тяжелых элементов, встречающихся в естественном виде, включая радий и уран, являются радиоактивными. То же самое касается некоторых изотопов (разновидностей одних и тех же элементов, отличающихся массой атомов) легких элементов, таких как рубидий и стронций.

Ученые открыли часы, но не знали, как определять по ним время. В этом им помогло создание во время и после Второй мировой войны прибора под названием масс-спектрометр. Он разделяет атомы по их массам и электрическим зарядам и позволяет определять ничтожные количества радиоактивных веществ в породах.

Периоды полураспада. Радиоактивные вещества распадаются с определенной скоростью. Единицей ее измерения является период полураспада - время, за которое распадается половина первоначального количества радиоактивного вещества. Второй период полураспада - это половина оставшегося вещества, и так с каждым разом этот период уменьшается.

Наиболее известным методом датирования является датирование по радиоуглероду, с помощью которого можно определить возраст любого органического вещества, дошедшего до нас из прошлого (такого как кости или древесина). Так, например, этот метод применили в 1988 г. для датирования Туринской Плащаницы, в которую, как полагают, в свое время завернули Иисуса Христа. Однако датировать по радиоуглероду неорганические породы невозможно, для этого применяются другие методы. Они включают распад с превращением радиоактивного изотопа калия в радиоактивный аргон, распад радиоактивного изотопа рубидия в радиоактивный стронций, и распад урана и тория с превращением в свинец.

Подтверждение возраста Земли пришло из космоса. Некоторые упавшие на Землю метеориты содержат минерал под названием троилит. В нем мало или совсем нет урана, поэтому полагают, что найденный в нем свинец представляет первоначальное его количество на планетах, включая Землю. Таким образом, удалось проверить правильность уран-свинцового датирования. Были также проанализированы лунные породы, доставленные на Землю американскими астронавтами в 1970-х годах. Из этих пород и образцов метеоритов получены данные о возрасте Луны и метеоритов, подобных тем, по которым определяли возраст Земли.

Следы примитивной жизни обнаружены в породах, которым почти 3,5 миллиарда лет, - самых старых из известных пород на Земле. Жизнь эта представлена бактериями и водорослями, т. е. простейшими одноклеточными организмами.
Вероятно, на протяжении предшествующих 1000 миллионов лет на Земле постепенно образовались океаны из воды мантии, выбрасываемой вулканами на поверхность при извержении. Первоначально атмосфера состояла, очевидно, главным образом из водорода. Кислород в воздухе образовался либо в результате воздействия света на водные пары, либо его выделяли растениевидные морские организмы.

Вспышка жизни. Около 570 миллионов лет тому назад на Земле началось бурное развитие жизни. Около 400 миллионов лет тому назад в атмосфере уже было достаточно кислорода для роста растений на суше. В течение последующих 50 миллионов лет появились, и начали эволюционировать - наземные животные.

Геологи делят историю последних 570 млн. лет на ряд периодов. Самый ранний из них называется кембрийским. Геологическое время с начала кембрия (590 миллионов лет

тому назад) до нынешнего четвертичного периода известно как фанерозойский эон. Остальная часть истории Земли обычно объединяется под общим названием докембрий. Если представить себе, что Земля существует один год, то самые ранние формы жизни появились в начале мая, а кембрийский период начался в ноябре. Первые люди возникли около 7 часов вечера 31 декабря, а современный человек сформировался приблизительно за пять минут до полуночи.

3. 4. Возраст Земли и Солнечной системы. Абсолютный и относительный возраст. Геохронологическая шкала.

Сама по себе постановка вопроса о возрасте Земли была некогда весьма революционной - ибо "возраст" подразумевает наличие "даты рождения". Конечно, в любой из религий соответствующее божество создает Землю с населяющими ее существами из первозданного Хаоса, однако европейская наука унаследовала от античных философов-материалистов принципиально иное видение Мира. Для нее Земля всегда была неотъемлемой частью той самой Вселенной, которая "едина, бесконечна и неподвижна... Она не рождается и не уничтожается... Она не может уменьшаться и увеличиваться" (Джордано Бруно). Но вот в конце Средневековья астрономы открывают существование так называемых новых звезд: оказывается, небеса не абсолютно неизменны, как считалось испокон веков! Следовательно, в принципе возможны и наиболее решительные (с точки зрения Человечества) изо всех возможных изменений: начало и конец существования Земли и видимой части Вселенной. А раз так, то не можем ли мы попытаться установить, когда было это начало и каким будет этот конец - не прибегая к помощи мифологии (шести дням творения, Сумеркам богов, и т.д.)?

Необходимо заметить, что людей первоначально заинтересовал возраст не Земли как небесного тела, а именно обитаемой Земли - как сейчас сказали бы, биосферы. Однако ясно, что, определив время возникновения жизни, мы тем самым получим минимальный срок существования и самой планеты. А поскольку источником жизни на Земле вполне справедливо полагали энергию Солнца, то возраст нашего светила, в свою очередь, даст нам максимальный срок существования биосферы.

Установление же времени существования Солнца - после того как были открыты законы сохранения вещества и энергии - казалось физикам довольно простой задачей. Солнце постоянно излучает энергию в пространство, назад ничего не возвращается, так что, по идее, количество энергии в Солнечной системе должно постоянно убывать. Самый энергетически выигрышный процесс (из известных до XX века) - сжигание каменного угля; тепло и свет при этом создаются в результате химической реакции $C+O_2 = CO_2+Q$. А поскольку нам известны и величина Q, и количество энергии, излучаемой Солнцем за единицу времени, и масса Солнца (она была приближенно вычислена еще в XVII веке), то рассчитать суммарное время существования угольного костра таких размеров можно буквально в одно действие. Вот тут-то и выяснилось, что он должен прогореть дотла всего-навсего за полторы тысячи лет. Конечно, существуют вещества более энергоемкие, чем уголь, но это не решает проблему: расчетное время существования Солнца все равно оказывается меньше шести тысяч лет - то есть меньше времени существования человеческой цивилизации; ясно, что это абсурд.

Необходимо было найти источник, питающий своей энергией Солнце - иначе вообще рушился закон сохранения энергии. И вот в 1853 г. Г. Гельмгольцу удалось предложить вполне приемлемую для того времени гипотезу. Он предположил, что Солнце постоянно сжимается - верхние его слои под собственной тяжестью как бы падают на нижние. Их потенциальная энергия при этом убывает (ведь масса слоев постоянна, а высота их "подъема" над центром Солнца уменьшается). Эта "теряющаяся" потенциальная энергия верхних слоев и выделяется в виде тепла и света. Возникает вопрос: какая скорость этого сжатия необходима для того, чтобы обеспечить нынешнюю светимость Солнца? Ответ: очень небольшая - за 250 лет (то есть за все время существования

современной астрономии) - всего-навсего 37 км; для сравнения: нынешний диаметр Солнца - почти 1,5 миллиона км. Очевидно, что такие изменения диаметра никакими измерительными приборами не ловятся.

Гипотеза эта имела и одно следствие, прямо касающееся возраста Земли. Если считать, что светимость Солнца (и, соответственно, скорость его сжатия) в прежние времена была примерно такой же, как сейчас, то, согласно расчетам Гельмгольца, 18 миллионов лет назад диаметр светила должен был превышать нынешний диаметр орбиты Земли. Следовательно, наша планета никак не старше этих самых 18 миллионов лет. Физиков эта цифра вполне удовлетворила, и они сочли вопрос о предельном возрасте Земли исчерпанным, но вот геологи восстали против такой датировки самым решительным образом.

Дело в том, что геология уже накопила к тому времени огромное количество эмпирических (т.е. основанных на непосредственном опыте) данных о строении поверхностных слоев планеты и о происходящих на ней процессах (например, о движении горных ледников, водной эрозии и т.д.). В 1830 году Ч. Лайелль, исходя из того, что геологические процессы (прежде всего осадконакопление) в прошлом должны были протекать примерно с той же скоростью, что и ныне - принцип актуализма - подсчитал, что время, необходимое для образования одних только доступных для прямого изучения осадочных толщ, должно составлять несколько сот миллионов лет. Расчеты Лайелля основывались на гигантском фактическом материале и казались геологам и биологам гораздо более близкими к истине, чем 18 миллионов лет Гельмгольца. Однако логика Гельмгольца казалась неопровержимой - с законом сохранения энергии особо не поспоришь... Для того чтобы возобладала точка зрения геологов (а правильной, как теперь известно, оказалась именно она) необходимо было найти иной, чем гравитационное сжатие, источник энергии для Солнца.

В 1896 году А. Беккерель открыл явление радиоактивности. Радиоактивность оказалась одним из типов ядерных реакций - изменений в комбинациях составляющих атомное ядро протонов и нейтронов; при этих реакциях выделяется неизмеримо больше энергии, чем при любых химических превращениях. В 1905 году А. Эйнштейн установил, что в ядерных реакциях массу можно рассматривать как чрезвычайно концентрированную форму энергии, и вывел свою знаменитую формулу их эквивалентности: $E = mc^2$, где c - скорость света. Величина c^2 чрезвычайно велика, а потому даже небольшое количество массы эквивалентно огромному количеству энергии: 1 г массы = 21,5 млрд. ккал (столько энергии выделится, если сжечь два с половиной миллиона литров бензина). Если предположить, что Солнце черпает энергию за счет ядерных реакций (каких именно - пока неважно, формула Эйнштейна справедлива для них всех), то для обеспечения его нынешней светимости необходимо расходовать 4600 тонн вещества в секунду.

Много ли это? Ничтожно мало: расчеты показывают, что происходящее при этом изменение тяготения Солнца приведет к увеличению времени оборота Земли вокруг светила - т.е. удлинению земного года - всего на 1 секунду за 15 миллионов лет, что, разумеется, нельзя установить никакими измерениями. Таким образом, проблема практически неиссякаемого источника энергии для Солнца была решена, и теперь уже ничто не препятствовало принятию геологической оценки возраста Земли - "не менее нескольких сот миллионов лет".

Однако открытие радиоактивности имело и еще одно следствие: это явление само по себе позволило создать новый метод определения возраста планеты, несравненно более точный, чем все предыдущие. Суть его заключается в следующем. Известно, что атом урана нестабилен: он испускает энергию, потоки частиц, и со временем превращается в атом свинца - устойчивого элемента, не подверженного дальнейшим превращениям. Природа этого типа реакций такова, что скорость ядерного распада абсолютно постоянна, и никакие внешние факторы (температура, давление) на нее не влияют. Значит, если экспериментально определить темп этих изменений за короткий промежуток времени, то

его можно совершенно точно предсказать и для более длительного промежутка. Так вот, было установлено, что в любой порции урана (точнее - изотопа ^{238}U) половина составляющих его атомов превратится в свинец за 4,5 млрд. лет; соответственно, через 9 млрд. лет урана останется 1/2 от 1/2, то есть четверть, и т.д. Срок в 4,5 млрд. лет называют периодом полураспада ^{238}U.

Пусть мы имеем горную породу, содержащую соединения урана. Если она остается нераздробленной, то все атомы свинца (в которые постоянно превращаются атомы урана) остаются внутри породы, и в результате уран все более "загрязняется" свинцом. Поскольку, как мы помним, внешние факторы не влияют на скорость этого процесса, степень "загрязнения" будет зависеть только от времени, в течение которого порода оставалась монолитной. Последнее обстоятельство весьма важно: таким способом можно устанавливать время образования изверженных пород, но не осадочных - те всегда разрушены, и уран/свинцовое соотношение в них необратимо нарушено миграцией этих элементов в окружающую среду.

Определять возраст изверженных пород уран-свинцовым методом (впоследствии появились калий-аргоновый, рубидий-стронциевый и некоторые другие) начали в 1907 году, и очень скоро обнаружили граниты с возрастом 1 млрд. лет. По мере дальнейших поисков этот "максимальный известный возраст" быстро увеличивался, пока не достиг 3,5 млрд. лет, после чего, несмотря на все усилия, почти не прирастал; древнейшие же из известных минералов были недавно найдены в Австралии - 4,2 млрд. лет (известный Сибирский "рекорд" - 4,5 млрд. лет - не подтвердился повторными анализами). Значит, Земля никак не моложе 4,2 млрд. лет; но, может быть, она еще старше, и породы с возрастом 7 или, скажем, 20 млрд. лет просто пока не найдены? Судя по всему, нет - и вот почему. Дело в том, что возраст всех изученных на этот предмет метеоритов составляет 4,5-4,6 млрд. лет; возраст всех горных пород, собранных в девяти районах Луны американскими экспедициями "Аполлон" и советскими автоматическими станциями "Луна", также варьирует от 4 до 4,5 млрд. лет. Все это свидетельствует о том, что цифра "4,6 млрд. лет" верно отражает реальный возраст не только Земли, но и всей Солнечной системы.

Итак, физики преподнесли геологам поистине царский подарок: стало возможным достаточно точно определить время существования Земли и протяженности различных периодов ее истории (палеозоя, мезозоя, и т.д.). Как же отнеслись к этому геологи? Спокойно, если не сказать - равнодушно: дело в том, что к собственно геологическим проблемам все это, как ни странно, имеет весьма косвенное отношение.

Физики мыслят в категориях абсолютного времени: для них существенно, когда именно произошло некое событие, а главная проблема, которую они при этом решают - это проблема часов (ведь распадающийся уран - это, по сути дела, песочные часы хитрой конструкции). Однако совершенно очевидно, что время существует вне зависимости от того, есть ли у нас приборы для его измерения. Любая последовательность событий уже сама по себе является временем - относительным временем. Так вот, геологи всегда работали в мире этого самого относительного времени. Точность, с которой мы можем определить положение некого события на шкале относительного времени, прямо зависит от ее дробности (т.е. числа составляющих шкалу событий) и полноты (события должны распределяться по шкале более или менее равномерно, не оставляя "пустот"). Поэтому геологи видели свою задачу в том, чтобы совершенствовать в указанных направлениях шкалу относительного времени - палеонтологическую летопись (это не художественная метафора, а строгий термин), а не в том, чтобы искать "часы".

Есть два фундаментальных принципа (фактически - это аксиомы, принимаемые без доказательства), которыми пользуются геологи при изучении истории. Во-первых, это принцип Стено, или закон напластования: если один слой (пласт) горных пород лежит на другом, то верхний слой образовался позднее, чем нижний. Во-вторых - принцип Гексли, или закон фаунистических и флористических ассоциаций: слои, содержащие ископаемые

остатки одних и тех же видов животных и растений, образовались в одно и то же время. Первый принцип позволяет установить хронологический порядок образования горных пород в одном месте, второй - синхронизировать между собой пласты, залегающие в разных местах (см. рисунок 3-2, а).

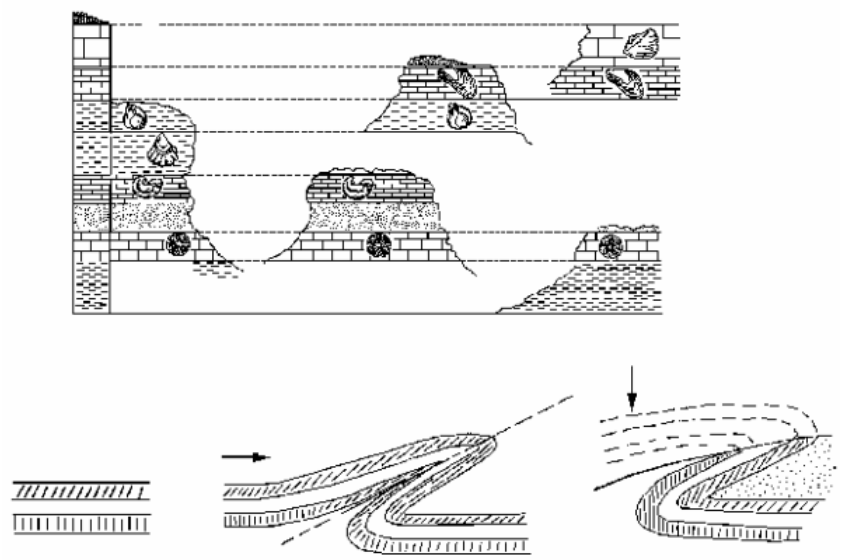


Рис. 3-2. а - составление сводной стратиграфической шкалы на 5 разрезах; б - образование запрокинутого залегания (линия, складка и эрозия "нормальной" половинки).

Принципы эти, казалось бы, предельно просты, однако при их практическом применении нас подстерегает целый ряд ловушек. Так, исходная последовательность слоев в результате тектонических движений зачастую сминается в более или менее горизонтальные складки. Если в дальнейшем вышележащая половинка складки (с "правильной" последовательностью) окажется полностью уничтоженной эрозией, то установить, что в нашем распоряжении осталось лишь искаженное, запрокинутое залегание слоев, будет весьма непросто (см. рисунок 3-2, б). Еще большие проблемы возникают с законом фаунистических ассоциаций. Синхронные, но пространственно удаленные фауны всегда будут отличаться друг от друга; в частности - они будут иметь в своем составе разную долю реликтов, унаследованных от предшествующих эпох. Представьте-ка себе, что вам предложено "вслепую" сопоставить выборки из современных фаун млекопитающих Европы и Австралии (со всеми ее сумчатыми и однопроходными); много ли у вас будет оснований для заключения об их синхронности? Сведение множества региональных последовательностей фаун и флор в единую глобальную шкалу - одна из основных задач специального раздела геологии, стратиграфии (от латинского "стратум" - слой).

Трудности, возникающие на этом пути, велики - но вполне преодолимы. Последовательное применение принципов Стено и Гексли, плюс накопление огромного эмпирического материала, - позволило геологам уже в самом начале XIX века разделить все отложения на первичные, вторичные, третичные и четвертичные. Это деление полностью соответствует современному делению осадочных толщ на палеозойские, мезозойские и кайнозойские (объединяющие два последних подразделения). А к 30-м годам прошлого века в составе этих отложений были выделены и почти все принятые ныне системы (юрская, меловая, каменоугольная и пр.); последняя из них - пермская - была выделена Р. Мурчинсоном в 1841 году.

Так была создана всеобъемлющая шкала относительного времени - геохронологическая шкала - к которой может быть однозначно "привязана" любая содержащая ископаемые осадочная порода. Шкала эта оказалась столь совершенной, что двадцатый век не внес в нее существенных корректив, за исключением чисто формального изменения ранга некоторых ее подразделений. В пятидесятые годы единый третичный

период был разделен на два - палеогеновый и неогеновый. Ордовик, считавшийся частью силура, получил ранг самостоятельного периода. Двадцатый век снабдил ее подразделения абсолютными датировками. Основная проблема, которую с той поры пришлось решать геологам - это создание такой же шкалы для наиболее древних пород, которые считались "немыми".

Самыми крупными подразделениями геохронологической шкалы являются эоны; хорошо известные палеозой, мезозой и кайнозой - это эры, на которые подразделяется последний из эонов - фанерозой (от греческого "фанерос" - видимый, явный, и "зоэ" - жизнь), начавшийся 0,54 млрд. лет назад. Эоны, предшествующие фанерозою, - протерозой (0,54-2,5 млрд. лет) и архей (2,5-4,5 млрд. лет) - часто объединяют под названием криптозой ("криптос" - по гречески скрытый), или докембрий (кембрий - самый первый период фанерозоя). Фундаментальное разделение геохронологической шкалы на фанерозой и докембрий основано на наличии или отсутствии в соответствующих осадочных породах ископаемых остатков организмов, имевших твердый скелет. Первая половина архея, катархей - время, из которого осадочные породы не известны по причине отсутствия тогда гидросферы. Последний отрезок докембрия, венд - время появления бесскелетных многоклеточных животных.

С каждой из единиц, составляющих существующую последовательность осадочных пород, можно однозначное соотнести определенное подразделение временной шкалы - и наоборот; так, все отложения, образовавшиеся на Земле на протяжении юрского периода, образуют юрскую систему, или просто юру. Системы объединяются в группы (юра входит в состав мезозоя), и делятся на отделы (нижняя, средняя и верхняя юра), ярусы (верхняя юра - на келловей, оксфорд, кимеридж и титон) и, далее, на зоны ("Cardioceras cordatum"); временным же эквивалентом группы эвляется эра, отдела - эпоха, яруса - век, зоны - время. Названия подразделений геохронологической шкалы обычно происходят от той местности, откуда были впервые описаны "эталонные" для этого времени осадочные породы (пермский период, оксфордский век); исключение составляет низшая единица шкалы, всегда называемая по так называемому "руководящему ископаемому", характерному для этого момента геологической истории (время Cardioceras cordatum).

Итак, например, пермский период следует определить как время, когда на Земле образовывались горные породы такого же типа, что ныне выходят на поверхность в окрестностях уральского города Пермь. Имея дело с геохронологической шкалой, необходимо всегда помнить, что первичен здесь именно определенный тип геологических тел, а время производно, вторично. (Тот же самый принцип используется и в археологии: мезолит или бронзовый век - это время, когда люди делали орудия и украшения определенного типа.) Именно по этой причине геохронология спокойно обходилась и без датировок ее подразделений в миллионах лет, ставших привычными лишь в последние три-четыре десятилетия. Вообще роль абсолютных (радиоизотопных) датировок очень велика для стратиграфии докембрийских толщ, где отсутствуют достаточно сложные ископаемые; радиоуглеродный метод широко применяется для датировки новейших отложений, возрастом менее 40 тысяч лет. В остальном же эти методы играют в стратиграфии сугубо подчиненную роль, и мы в дальнейшем будем в основном обозначать время в терминах не абсолютной, а относительной шкалы.

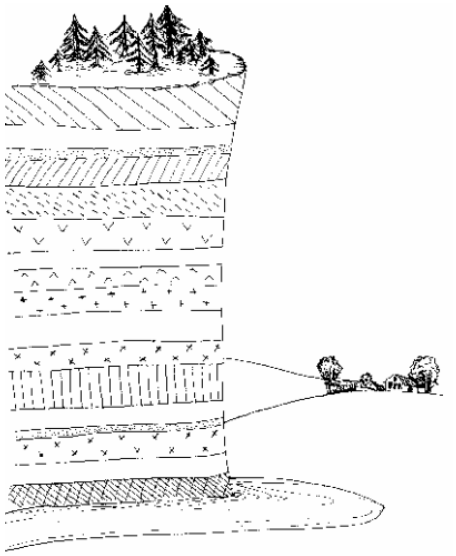


Рис. 3-3. Соответствие стратиграфических и временных подразделений.

Принято считать, что относительная геохронология точна, а абсолютная - нет. Дело в том, что радиоизотопные методы дают нам датировку с точностью до 1-2 %, которая, на первый взгляд, кажется вполне приемлемой. Не забудем, однако, о том, что на отрезках времени в сотни миллионов лет (которыми оперирует геология), эта погрешность измерения тоже будет исчисляться миллионами лет. Пусть мы определили абсолютный возраст некой осадочной толщи как 154 ± 2 млн. лет; в течение этих двух миллионов лет могли накопиться многие сотни метров (или даже километры) осадков. Палеонтологи же способны распознать в этой толще однообразных пород слой толщиной всего в несколько метров, руководствуясь известным им "адресом" - верхняя юра, оксфордский ярус, зона Cardioceras cordatum, ибо только в это "мгновение" геологической истории жил на Земле головоногий моллюск Cardioceras cordatum. Распознать же столь ничтожный отрезок времени методами абсолютных датировок нельзя ни в каком приближении.

Здесь опять напрашивается аналогия с археологией. Предположим, мы обнаружили древеегипетский саркофаг. Можно отколупнуть от него щепку и, путем немалых усилий, установить, что дерево из которого он был изготовлен, срублено 4500±300 лет назад. Археолог же поглядит на орнамент саркофага и без колебаний скажет: "Среднее царство, XIII династия... конец, но не самый". Ну, и какая из датировок, на ваш взгляд, более содержательна?

3. 5. Возраст Земли и периодизация геологических событий.

Возраст Земли как планеты по последним данным оценивается ~ 4,6 млрд. лет. Изучение метеоритов и лунных пород также подтверждает эту цифру. Однако самые древние породы Земли, доступные непосредственному изучению, имеют возраст около 3,8 млрд. лет. Поэтому весь более древний этап истории Земли носит название до геологической стадии. Объектом же геологического изучения является история Земли за последние 3,8 млрд. лет, которая выделяется в ее геологическую стадию.

Для выяснения закономерностей и условий образования г.п. необходимо знать последовательность их образования и возраст, т.е. установить их геологическую хронологию. Различают **относительный возраст** горных пород (относительная геохронология) и **абсолютный возраст -** (абсолютная геохронология). Установлением возраста горных пород занимается наука **стратиграфия** (лат. Stratum – слой).

Относительный возраст горных пород и методы его определения.

Определение относительного возраста пород – это установление, какие породы образовались раньше, а какие – позже.

Относительный возраст осадочных г.п. устанавливается с помощью геолого-стратиграфических (стратиграфического, литологического, тектонического, геофизических) и биостратиграфических методов.

Стратиграфический метод основан на том, что возраст слоя при нормальном залегании определяется - нижележащие их слои являются более древними, а вышележащие более молодыми. Этот метод может быть использован и при складчатом залегании слоев. Не может быть использован при опрокинутых складках.

Литологический метод основан на изучении и сравнении состава пород в разных обнажениях (естественных- в склонах рек, озер, морей, искусственных – карьерах, котлованах и т.д.). На ограниченной по площади территории, отложения одинакового вещественного состава (т.е. состоят из одинаковых минералов и горных пород) , могут быть одновозрастными. При сопоставлении разрезов различных обнажений используют маркирующие горизонты, которые отчетливо выделяются среди других пород и стратиграфиески выдержаны на большой площади.

Тектонический метод основан на том, что мощные процессы деформации г.п. проявляются (как правило) одновременно на больших территориях, поэтому одновозрастные толщи имеют примерно одинаковую степень дислоцированности (смещения). В истории Земли осадконакопления периодически сменялись складчатостью и горообразованием. Возникшие горные области разрушались, а на выровненную территорию вновь наступало море, на дне которого уже несогласно накапливались толщи новых осадочных г.п. в этом случае различные несогласия служат границами, подразделяющими разрезы на отдельные толщи.

Геофизические методы основаны на использовании физических характеристик отложений (удельного сопротивления, природной радиоактивности, остаточной намагниченности горных пород и т.д.) при их расчленении на слои и сопоставлении.

Расчленение пород в буровых скважинах на основании измерений удельного сопротивления г.п. и пористости называется **электрокаротаж**, на основании измерений их радиоактивности - **гамма-каротаж**.

Изучение остаточной намагниченности г.п. называют ***палеомагнитным методом***; он основан на том, что магнитные минералы, выпадая в осадок, распластаются в соответствии с магнитным полем Земли той эпохи которая, как известно, постоянно менялась в течении геологического времени. Эта ориентировка сохраняется постоянно, если порода не подвергается нагреванию выше 500 °С (т.н. точка Кюри) или интенсивной деформации и перекристаллизации. Следовательно, в различных слоях направление магнитного поля будет различным. Палеомагнетизм позволяет т.о. сопоставлять отложения значительно удаленные друг от друга (западное побережье Африки и восточное побережье Латинской Америки).

Биостратиграфические или палеонтологические методы состоят в определении возраста г.п. с помощью изучения ископаемых организмов (подробно палеонтологические методы будут рассмотрены в следующей лекции).

Определение относительного возраста магм. Методы для определения возраста осложнены отсутствием палеонтологических остатков. Возраст эффузивных пород, залегающих совместно с осадочными устанавливается по соотношению к осадочным породам. Относительный возраст интрузивных пород определяется по соотношению магматических пород и вмещающих осадочных пород, возраст которых установлен. Определение относительного возраста метамофических пород аналогично определению относительного возраста магматических пород.

Абсолютный возраст горных пород и методы его определения.

Абсолютная геохронология устанавливает возраст г.п. в единицах времени. Определение абсолютного возраста необходимо для корреляции и сопоставления биостратиграфических подразделений различных участков Земли, а также установления возраста лишенных палеонтологических остатков фанерозойских и докембрийских пород.

К методам определения абсолютного возраста пород относятся методы ядерной (или изотопной геохронологии) и не радиологические методы

Методы ядерной геохронологии в наше время являются наиболее точными для определения абсолютного возраста горной породы, в основе которых лежит явление самопроизвольного превращения радиоактивного изотопа одного элемента в стабильный изотоп другого. Суть методов состоит в определении соотношений между количеством радиоактивных элементов и количеством устойчивых продуктов их распада в горной породе. По скорости распада изотопа, которая для определенного радиоактивного изотопа есть величина постоянная, количеству радиоактивных и образовавшихся стабильных изотопов, рассчитывают время, прошедшее с начала образования минерала.

Разработано большое число радиоактивных методов определения абсолютного возраста: свинцовый, калиево-аргоновый, рубидиево-стронциевый, радиоуглеродный и др. (выше установленный возраст Земли 4,6 млрд. лет не установлен с применением свинцового метода).

Соляной метод был применен для определения возраста Мирового океана. Он основан на предположении, что воды океана были первоначально пресными, то, зная современное количество солей с континентов, можно определить время существования Мирового океана (~ 97 млн. лет).

Седиментационный метод основан на изучении осадочных пород в морях. Зная объем и мощность морских отложений в отдельных системах и объем минерального вещества, ежегодно сносимого в моря с континентов можно вычислить продолжительность их наполнения.

Биологический метод базируется на представлении о сравнительно равномерном развитии орг. мира. Исходный параметр – продолжительность четвертичного периода 1,7 – 2 млн. лет.

Метод подсчета слоев ленточных глин, накапливающихся на периферии тающих ледников. Глинистые осадки откладываются зимой, а песчаные летом и весной, т.о. каждая пара таких слоев результат годичного накопления осадков (последний ледник на Балтийском море прекратил свое движение 12 тысяч лет назад).

геохронологические подразделения	**стратиграфические подразделения**	**вспомогательные подразделения**
эон	эонотема	-
эра	эрастема	-
период	система	серия (формация)
эпоха	отдел	свита (толща)
век	ярус	-
время (фаза)	зона (горизонт)	подсвита, пачка, слои, горизонт

Периодизация истории Земли. Геохронологическая шкала.

На основании изменений в развитии органического мира вся история Земли подразделяется на несколько геохронологических этапов (эра период и т.п.), которым соответствуют определенные комплексы отложений (группы, системы и т.п.). В течение этих этапов в различных районах Земли происходили процессы накопления осадков или разрушение ранее образовавшихся отложений. Поэтому полный разрез, включающий все известные системы в каком либо месте не известен ни в одной точке Земли. Общие стратиграфическая и геохронологическая шкала основаны на изучении реально существующих геологических разрезов в различных районах суши Земли лежат особенности состава пород.

Подразделения геохронологической шкалы соответствуют подразделениям стратиграфической шкалы.

Эон	Эра	Период (система)	Эпоха	Завершение, лет назад	Основные события
Фанерозой	Кайнозой	Четвертичный (антропогенный)	Голоцен	Продолжается в наши дни	Конец ледникового периода. Возникновение цивилизаций
			Плейстоцен	11 400	Вымирание многих крупных млекопитающих Появление современногочеловека
		Неогеновый	Плиоцен	1.81 млн.	
			Миоцен	5.33 млн.	
		Палеогеновый	Олигоцен	23.0 млн.	Появление человекообразных обезьян
			Эоцен	37.2 млн.	Появление "современных" млекопитающих
			Палеоцен	55.8 млн.	
	Мезозой	Меловой		66.5 млн.	Плацетарные млекопитающие. Вымирание динозавров
		Юрский		146 млн.	Сумчатые млекопитающие и первые птицы. Расцвет динозавров
		Триасовый		200 млн.	Динозавры и яйцекладущие млекопитающие
	Палеозой	Пермский		251 млн.	Массовое пермское вымирание. 95% всех существовавших видов
		Каменноугольный		299 млн.	Появление деревьев и пресмыкающихся
		Девонский		359 млн.	Появление земноводных и споровых растений
		Силурийский		416 млн.	Выход жизни на сушу. Скорпионы, первые растения
		Ордовикский		443 млн.	Богатая морская фауна: ракоскорпионы, кальмары
		Кембрийский		488 млн.	Кембрийский взрыв - появление большого количества новых групп организмов
Докембрий	Протерозой: Неопротерозой	Эдиакарий		542 млн.	Первые многоклеточные животные
		Криогений		600 млн.	Одно из самых масштабных оледенений Земли
		Тоний		850 млн.	Начало распада суперконтинента Родиния
	Протерозой: Мезопротерозой	Стений		1.0 млрд.	Суперконтинент Родиния, суперокеан Мировия
		Эктазий		1.2 млрд.	
		Калимий		1.4 млрд.	
	Протерозой: Палеопротерозой	Статерий		1.6 млрд.	
		Орозирий		1.8 млрд.	
		Риасий		2.05 млрд.	
		Сидерий		2.3 млрд.	Кислородная катастрофа
	Архей	Неоархей		2.5 млрд.	
		Мезоархей		2.8 млрд.	
		Палеоархей		3.2 млрд.	
		Эоархей		3.6 млрд.	Появление одноклеточных организмов
	Катархей (Гадей)			3.8 млрд.	Формирование Земли - 4.57 млрд. лет назад.

3. 6. Изотопные методы определения возраста минералов и горных пород.

Многочисленные попытки найти в макромире часы, которые бы позволяли надежно устанавливать возраст горных пород и руд, время проявления и длительность геологических процессов, не увенчались успехом. Такие часы скрывались в микроскопическом мире атомов, и обнаружение их стало возможным только после открытия в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем явления радиоактивного распада. Было также установлено, что процесс радиоактивного распада происходит с постоянной скоростью, как на нашей Земле, так и в Солнечной системе. На этом основании П. Кюри (1902) и независимо от него Э. Резерфорд (1902) высказали мысль о возможности использования радиоактивного распада элементов в качестве меры геологического времени. Так наука в начале XX столетия подошла к созданию часов, основанных на радиоактивных природных превращениях, ход которых не зависим от геологических и астрономических явлений.

Первые определения возраста по отношению Pb/U были сделаны в США Б. Болтвудом в 1907 г. Для трех образцов уранинита были получены значения возраста от 410 до 535 млн. лет, которые хорошо согласуются с более поздними датировками. Важным техническим достижением в геохронологии было изобретение Ф.В.Астоном (1927) масс-спектрографа - прибора, предназначенного для измерения масс изотопов. Изотопами называются разновидности атомов, имеющие одно и то же число протонов (Z), а, следовательно, один и тот же атомный номер в Периодической таблице элементов, но разное число нейтронов (N) и, соответственно, разные массовые числа (A), т. к. масса ядра складывается из суммы масс входящих в него протонов и нейтронов, т. е. A = Z + N. При указании химического символа изотопа, его массу принято записывать слева вверху, а заряд ядра слева внизу: $_{92}{}^{238}U$, $_{92}{}^{235}U$, $_{62}{}^{147}Sm$, $_{6}{}^{14}C$ и т. д.

Э.Резерфордом (1899) было установлено, что при радиоактивном распаде испускаются три вида компонентов, которые он обозначил буквами греческого алфавита - α, β и γ. В последующем было установлено, что α - частицы являются быстродвижущимися ядрами гелия, β - частицы - быстрыми электронами, γ - компонент представляет собой электромагнитное излучение, подобное рентгеновским X - лучам. По наименованию частиц, испускаемых радиоактивными элементами, названы соответствующие типы радиоактивного распада.

Альфа (α) - распад испытывают только тяжелые химические элементы. Причиной этому служат, по-видимому, высокие содержания в их ядрах положительно заряженных частиц - протонов, создающих высокую энергию кулоновского отталкивания, ослабляющего связь нуклонов (т.е. протонов и нейтронов) в ядре. При достижении некоторого критического значения Z и A, ядру становится энергетически выгоднее переход в состояние с меньшим числом ядерных частиц. Распад ядра сопровождается испусканием α - частицы (иона $_2{}^4He$) и образованием нового ядра, в котором нейтронов (N) меньше на 2 и протонов (Z) на 2, т.е. (A, Z) —► (A- 4, Z -2) + $_2{}^4He$.

β - распад (или электронный распад), состоит в том, что ядро самопроизвольно испускает β - частицу - электрон, характеризующийся отрицательным зарядом, и нейтральную элементарную частицу - антинейтрино (ν). Для ядра энергетически не выгодно сверхнормативное число нейтронов относительно протонов, и оно будет стремиться избавиться от лишних нейтронов, путем распада одного из них на протон, электрон и антинейтрино. Новообразованный электрон выбрасывается из ядра, а возникшее новое ядро будет обладать зарядом на единицу большим: (A, Z)► (A, Z+1) + P" + ν. Из других видов радиоактивного распада, отметим K - захват и спонтанное деление.

K - захват (или электронный захват). При этом типе распада, ядро захватывает электрон из ближайшего к нему K - уровня электронного облака. В ядре электрон соединяется с протоном и превращает его в нейтрон. В итоге при K - захвате заряд уменьшается на единицу, а массовое число остается постоянным: (A, Z) + β^- —> (A, Z-1) + γ.

Спонтанное (или самопроизвольное) деление ядра на два, сравнимых по массе осколка, является свойством очень тяжелых ядер. Оно было открыто в СССР К.А.Петржаком и Г.Н. Флеровым в 1940 г. Процесс этот очень медленный. Например, на 2 230 000 α - распадов ^{238}U приходится всего один акт спонтанного деления. Возрасты горных пород и минералов обычно выражаются в 10^6 и 10^9 лет, или в значениях Международной системы единиц (СИ): Ma и Ga. Эта аббревиатура образована от латинских Mega anna и Giga anna, означающих, соответственно, «млн. лет» и «млрд. лет».

Все типы радиоактивных превращений подчиняются *закону радиоактивного распада*. Этот закон определяет зависимость между числом изотопов в закрытой системе (минерале, породе) в момент ее образования N_o и числом атомов N_t не распавшихся по прошествии времени t: $N_o = N_t e^{\lambda t}$ где λ - постоянная распада - доля распавшихся ядер данного изотопа за единицу времени, от общего их количества в закрытой системе (минерале, породе). Размерность этой единицы - год$^{-1}$; *e* - основание натуральных логарифмов. Из закона радиоактивного распада, выведено *главное уравнение геохронологии,* по которому вычисляется возраст, отсчитываемый радиоактивными часами: $t = l/\lambda \ln(N_k/N_t + 1)$, где N_k - число изотопов конечного продукта распада; N_t - число радиоактивных изотопов, не распавшихся по прошествии времени t. Таким образом, чтобы определить возраст минерала или породы (t), достаточно измерить количество материнского радионуклида и продукта его распада - стабильного дочернего изотопа. Численное значение λ для каждого радиоизотопа определяется особо и при обычной работе берется из таблиц. Вместо постоянной распада радиоактивного изотопа на практике часто используется другая его характеристика - период полураспада ($T_{1/2}$) - время, за которое число радиоактивных ядер данного изотопа убывает на половину. Период полураспада связан с постоянной распада следующим отношением: $T_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0.693/\lambda$.

Названия изотопно-геохронологических методов обычно образуются из названий радиоактивных изотопов и конечных продуктов их распада. По этому признаку различают: *уран-торий-свинцовый (часто уран-свинцовый), калий-аргоновый, рубидий-стронциевый, рений-осмиевый и др. методы*. Иногда названия даются только по конечному (стабильному) продукту радиоактивного превращения: свинцовый, аргоновый, стронциевый методы и т. д.

Рассмотрим в качестве примеров некоторые изотопно-геохронологические методы (табл.).

Таблица

Значения констант, принятых в изотопной геохронологии

Радионуклид	Тип распада	Радиогенный изотоп	$\lambda, 10^{-9}$/год	$T_{1/2}, 10^9$лет
238U	α	206Pb	0,155125	4,4683
235U	α	207Pb	0,98485	0,70391
232U	α	208Pb	0,049475	14,01
87Rb	β^-	87Sr	0,0142	48,8
40K	К-захват	40Ar	0,0581	1,250
147Sm	α	143Nd	0,00654	106
187Re	β^-	187Os	0,0164	42,256

Уран-торий-свинцовый метод. Радиоактивный распад урана и тория в стабильные изотопы свинца долгое время (до появления самарий-неодимового метода) рассматривался в качестве стандарта, с которым сравнивались данные других методов. Вместе с тем это один из наиболее сложных методов в изотопной геохронологии. В уран-ториевой изотопной системе существует три независимых семейства радиоактивного распада:

$$^{238}U \rightarrow {}^{206}Pb + 8\,{}^4He + 6\,\beta^- + Q;$$
$$^{235}U \rightarrow {}^{207}Pb + 7\,{}^4He + 4\,\beta^- + Q;$$
$$^{232}Th \rightarrow {}^{208}Pb + 6\,{}^4He + 4\,\beta^- + Q.$$

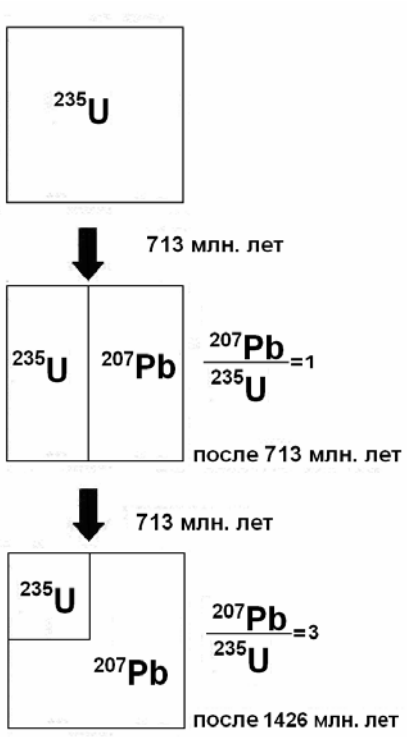


Рис. 3-4. Радиоактивный распад урана 235.

Распад каждого радиоактивного изотопа порождает длинный ряд промежуточных продуктов распада и заканчивается стабильным изотопом свинца. Главное уравнение геохронологии, применительно к данной изотопной системе, имеет следующий вид (на примере отношения $^{206}Pb/^{238}U$):

$$t(^{206}Pb / ^{238}U) = 1/\lambda \ln[(^{206}Pb/^{204}Pb)ms - (^{206}Pb/^{204}Pb)i / (^{238}U/^{204}Pbms)] + 1,$$

где t ($^{206}Pb/^{238}U$) - возраст образца по данному отношению; ($^{206}Pb/^{204}Pb$)ms ($^{238}U/^{204}Pb$)ms - измеренные изотопные отношения; ($^{206}Pb/^{204}Pb$)i - первоначальное отношение. Аналогичным образом рассчитывается возраст и по отношениям $^{207}Pb/^{235}U$ и $^{208}Pb/^{232}Th$. Кроме того, для уран-свинцовых семейств, принято вычислять возраст еще и по отношениям радиогенных изотопов свинца - ($^{207}Pb/^{206}Pb$)rad. Если, в итоге, по всем четырем изотопным отношениям получены одинаковые датировки, то можно считать, что возраст определен надежно. Исследуемый минерал на протяжении всего времени существования оставался замкнутой системой относительно U, Th и Pb. Однако нередки случаи, когда по разным изотопным отношениям получаются разные цифры возраста. Чаще всего t ($^{207}Pb/^{206}Pb$) > t ($^{207}Pb/^{235}U$) > t ($^{206}Pb/^{238}Pb$) > t ($^{208}Pb/^{232}Th$). Такие соотношения свидетельствуют о потере минералом радиогенного свинца. Влияние потери меньше всего сказывается на отношении $^{207}Pb/^{206}Pb$, в связи с тем, что фракционирования изотопов свинца, при этом процессе, почти не происходит. Поэтому возрастная датировка, по свинцово-свинцовому отношению, принимается обычно в качестве наиболее близкой к действительному возрасту образца.

В последние годы в U-Th-Pb изотопном датировании цирконов удалось достичь значительного прогресса, благодаря применению ионного микрозонда (SHRIMP), сконструированного проф. У. Компстоном в Австралийском национальном университете. Этот прибор сочетает высокую чувствительность и разрешение с локальностью анализа (30 мкм). На этом приборе были проанализированы обломочные зерна циркона, из метаосадочных пород позднеархейского зеленокаменного пояса блока Илгарн (Зап. Австралия), показавшие возраст 4.1 - 4.3 млрд. лет.

Калий-аргоновый метод. Калий состоит из трех изотопов - ^{39}K, ^{40}K и ^{41}K, из которых только ^{40}K обладает естественной радиоактивностью. Немецкий физик Вейцзекер (1937) установил, что ^{40}K претерпевает двойной распад - в ^{40}Ar и ^{40}Ca. В ^{40}Ca путем β^- распада переходит 89,05% ядер ^{40}K, а в ^{40}Ar, посредством К-захвата, - 10,95 %. Двойной распад ^{40}K позволяет определять возраст К- содержащих минералов и пород по двум геохронометрам. Но распад ^{40}K в ^{40}Ca широкого применения в геохронологии не получил, т.к. природный кальций, содержащийся во многих породах и минералах, имеет то же массовое число, что и радиогенный ^{40}Ca, и отличить их очень трудно. Наиболее надежной оказалась K-Ar ветвь распада. Учитывая идеальную длительность периода полураспада К - 1250 млн. лет, и широкое распространение К- содержащих минералов в природе, К - Ar метод оказался пригодным для определения возраста во всех интервалах геологического времени - от архея до антропогена и почти для всех типов горных пород - осадочных, магматических и метаморфических. Следует отметить большую роль K-Ar метода в датировании осадочных пород позднего докембрия по калийсодержащему минералу глаукониту. Частая встречаемость и синхронность образования глауконита с формированием морских осадков, позволила установить большой возрастной диапазон процесса позднедокембрийской седиментации - от 1650 до 570 млн. лет, который оказался на много более продолжительным, чем предполагалось.

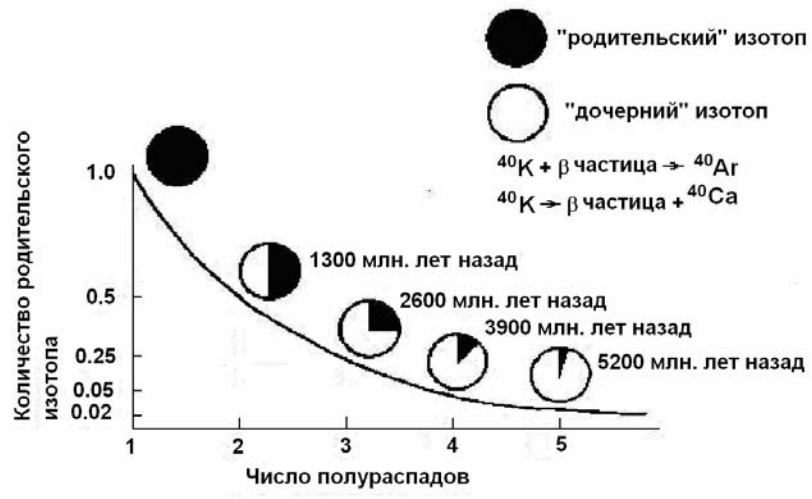


Рис. 3-5. Распад радиоактивного изотопа ^{40}K имеет два пути, превращаясь в ^{40}Ar или в ^{40}Ca.

В последнее время широкое применение получил метод датирования по отношению ^{39}Ar / ^{40}Ar. Этот метод, в отличие от обычного K-Ar, позволяет определять возраст, на который не влияют природные потери ^{40}Ar. Для лунных морских базальтов этим методом был получен возраст 3.78 - 3.84 млрд. лет, а для анортозитовых брекчий и габбро 4,05 и 4,26 млрд. лет, соответственно.

Рубидий-стронциевый метод. Принцип метода основан на β^- распаде изотопа ^{87}Rb и превращении его в стабильный изотоп ^{87}Sr по схеме: ${}_{37}{}^{87}Rb \rightarrow {}_{38}{}^{87}Sr + \beta^- + \nu + Q$, где ν - антинейтрино, Q - энергия распада. Распространенность рубидия в минералах горных пород определяется, в первую очередь, близостью ионных радиусов Rb^+ (r = 1.48 Å) к ионам калия K^+ (r = 1.33 Å). Это позволяет иону Rb замещать ион K во всех важнейших породообразующих минералах.

Распространенность стронция контролируется способностью иона Sr^{2+} (r =1.13 Å) замещать ион Ca^{2+} (r = 1.01 Å), в кальций - содержащих минералах (главным образом в плагиоклазе и апатите), а так же возможностью его вхождения в решетку калиевых полевых шпатов на место иона K^+. Вычисление возраста производится по главному

уравнению геохронологии, которое, применительно к Rb-Sr методу, имеет следующий вид:

$$t = 1/\lambda \ln [(^{87}Sr / ^{86}Sr) - (^{87}Sr / ^{86}Sr)i / (^{87}Rb / ^{86}Sr)] +1.$$

Rb-Sr метод успешно используется не только для определения возраста земных пород, но и для лунных и метеоритов. В частности, по дунитам, норитам и другим породам лунных материков, этим методом получены возрасты 4,3 - 4,6 млрд. лет, т.е. сопоставимые с принятым возрастом Земли.

Самарий-неодимовый метод. Самарий и неодим являются редкоземельными элементами. При метаморфизме, гидротермальном изменении и химическом выветривании они менее мобильны, чем щелочные и щелочноземельные элементы, такие, как K, Rb, Sr и др. Поэтому Sm-Nd метод дает более надежные датировки возраста горных пород, чем Rb-Sr. Предложение об использовании Sm-Nd метода в геохронологии впервые сделал Г. Лагмайр (G. Lugmair, 1947), определивший возраст двух эвкритовых ахондритов - Juvinas и Stanner и одного лунного образца. Для метеорита Juvinas он получил Sm-Nd возраст 4,56 ±0,08 млрд. лет и первичное отношение $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,50677 \pm 0,00010$. Он же показал, что отношение изотопов неодима $^{143}Nd/^{144}Nd$ является индикатором изменений в относительном содержании ^{143}Nd, обусловленного распадом ^{147}Sm. В разработку, внедрению в геологическую практику Sm-Nd метода и интерпретацию получаемых данных, большой вклад внесли американские исследователи Де Паоло и Г.Вассербург. Для самария известны 7 изотопов, но только один из них - ^{147}Sm является радиоактивным, распадающимся, путем испускания α - частицы, в ^{143}Nd по схеме:

$$_{62}{}^{147}Sm \rightarrow {}_{60}{}^{143}Nd + \alpha + Q$$

Период полураспада ^{147}Sm очень большой - 106 млрд.лет. Лучше всего самарий - неодимовый метод применим для определения возраст основных и ультраосновных пород, в том числе и метаморфических (эклогитов, метадиабазов и др.).

Рений-осмиевый метод. Рений - рассеянный элемент. Наиболее высокие концентрации его содержатся в молибдените (до 1,88 %), особенно когда он находится в ассоциации с сульфидами меди. Рений имеет два изотопа - ^{185}Re и ^{187}Re, последний изотоп радиоактивен. Осмий - металл платиновой группы, обладает ярко выраженными сидерофильными свойствами. Самые высокие его концентрации обнаружены в осмириде - сплаве осмия с иридием и другими металлами платиновой группы. Осмий имеет 7 изотопов и все они стабильны. Изотоп ^{187}Re путем эмиссии β^- частицы распадается в ^{187}Os по схеме: $_{75}{}^{187}Re \rightarrow {}_{76}{}^{187}Os + \beta^- + Q$. Накопление ^{187}Os в Re - содержащей системе, описывается уравнением:

$$(^{187}Os / ^{186}Os) = (^{187}Os / ^{186}Os)i + [(^{187}Re / ^{186}Os) \cdot (e^{\lambda t} - 1)],$$

где $(^{187}Os / ^{186}Os)$ и $(^{187}Re / ^{186}Os)$ - современные планетарные значения отношений, равные, соответственно, 1.06 и 3.3; первичное значение $(^{187}Os / ^{186}Os)i = 0.81$.

Re-Os изотопная система получила широкое применение не только в геохронологии, но и в исследовании эволюции мантии Земли и развитии земной коры. Она уникальна по сравнению с U- Pb и Rb-Sr системами в том отношении, что родительские и дочерние элементы последних отторгаются мантийными фазами. В Re-Os системе все обстоит по-другому. Re, например, в большинстве случаев, лишь незначительно перераспределяется между мантийным реститом и расплавом, так что его концентрация в мантии заметно не изменяется при дифференциации. Os то же практически весь остается в мантийном остатке, в расплав его переходит не более сотых долей от исходных концентраций в мантии. Поэтому Re-Os система, в отличие от других изотопных систем, при условии изоляции ее от последующих процессов вещественного обмена, может дать первичный возраст остывания и кристаллизации мантии (ТМА), предшествующий этапу её частичного плавления. При использовании Re-Os изотопной системы, совместно с другими изотопными методами, можно получить комплиментарную

информацию, относящуюся к возрасту, происхождению различных типов пород и эволюции коры и мантии. Кроме того, это один из немногих методов, позволяющий датировать возрасты сульфидных месторождений, он успешно используется так же для изучения метеоритов. С его помощью была построена Re-Os изохрона для метеоритов, включившая все их типы - железные, железокаменные и металлическую фазу хондритов. Все экспериментальные точки легли строго, в пределах погрешности эксперимента, на изохрону, свидетельствуя об очень коротком интервале времени образования всех типов метеоритов из газово-пылевого облака. Точка, соответствующая изотопному составу $^{187}Os/\ ^{186}Os$ и $^{187}Re/^{186}Os$ в мантии Земли, так же легла на эту изохрону, подтверждая предположение об одновременности образования Земли и метеоритов из одного и того же источника.

Радиоуглеродный метод датирования основан на естественном распаде космогенного радионуклида ^{14}C, образующегося в верхних слоях атмосферы в результате взаимодействия нейтронов и протонов космического происхождения с ядрами атмосферных газов - N_2, O_2, Ar (рис. 3-6).

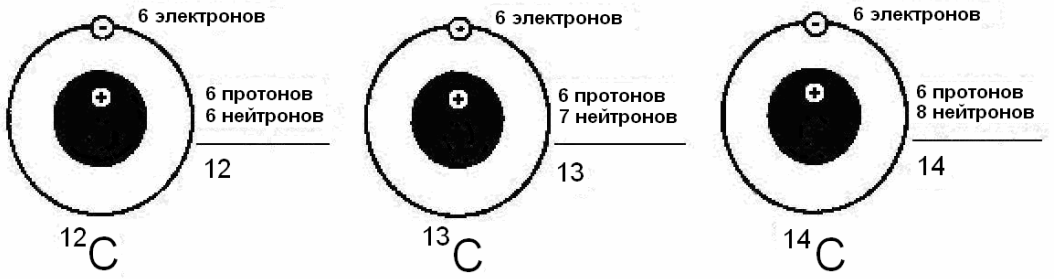


Рис. 3-6. Строение атомов углерода.

Реакции расщепления ядер - мишеней, вызванные частицами высоких энергий первичного космического излучения, сопровождаются образованием вторичных протонов, нейтронов, пионов и других частиц. Многие из вторичных частиц обладают достаточной энергией, чтобы вызвать новые ядерные реакции при взаимодействии со стабильными изотопами N, O, C и создать новые вторичные частицы. В целом этот процесс носит каскадный характер. Наиболее важной в образовании ^{14}C, является реакция вторичных нейтронов с ядрами стабильного изотопа ^{14}N:

$$_0{}^1n + {}_7{}^{14}N \rightarrow {}_6{}^{14}C + {}_1{}^1p,$$

где $_0{}^1n$ — нейтрон; $_1{}^1p$ - протон, испускаемый новообразованным изотопом. В результате взаимодействия с кислородом воздуха, или CO и CO_2, атомы ^{14}C переходят в молекулы диоксида углерода. Поскольку процесс перемешивания в атмосфере происходит достаточно быстро, то концентрация $^{14}CO_2$ повсеместно выравнивается - в атмосфере, гидросфере и биосфере. В биосферу ^{14}C попадает сначала в результате фотосинтеза зеленых растений и путем всасывания корнями из почвы, а потом по пищевой цепочке передается животным организмам. В гидросферу ^{14}C попадает в результате молекулярного обмена между CO_2 атмосферы и поверхностью вод. Отсюда он попадает в карбонатные скелеты и раковины водных организмов.

Атомы ^{14}C не стабильны и путем β^- распада превращаются в стабильные изотопы ^{14}N, согласно схеме: $_6{}^{14}C \rightarrow {}_7{}^{14}N + \beta^- + \nu + Q$.

Постоянная распада $\lambda^{14}C = 1.209*10^{-4}$ год$^{-1}$, период полураспада $T_{1/2} = 5730 \pm 40$ лет. Когда концентрация ^{14}C становится всюду одинаковой, это означает, что распад ^{14}C уравновешивается его образованием в атмосфере. Для живой ткани равновесное состояние определяется так называемой удельной активностью ^{14}C, которая принимается равной 13.56 ± 0.07распадов / (мин. г углерода). Если организм умирает, то прекращается поступление ^{14}C и в результате радиоактивного распада удельная активность ^{14}C уменьшается. Измерив значение активности в образце и зная ее величину в живой ткани

(= 13,56 расп. / мин. на 1 г С), можно рассчитать время прекращения углеродного обмена организмом. Радиоактивность организма, прекратившего жизнедеятельность t лет назад, определяется по уравнению радиоактивного распада: $N = No\ e^{-\lambda t}$, где N - измеренная активность ^{14}C (т.е число распадов в 1 мин. в 1 г углерода); N_0 - активность ткани живого организма.

Углеродный возраст образца организма, прекратившего жизнедеятельность t лет назад, определяется по следующему уравнению: $T = l/\lambda \ln(N_0/N)$.

Объектами радиоуглеродного датирования могут быть любые образцы, содержащие углерод, возрастом не более 70 тыс. лет - древесина, древесный уголь, торф, раковины, кости, пергамент, волосы и другие материалы.

Метод основан на допущении, что образующееся количество ^{14}C в атмосфере постоянно. Однако, имеются данные о значительном изменении атмосферного содержания радиоуглерода в прошлом (до 10 %). Причинами изменения содержания ^{14}C в атмосфере могут быть: - вариации в интенсивности космического излучения, - загрязнения атмосферы за счет сжигания ископаемого топлива (понижение ^{14}C / ^{12}C), - за счет ядерных взрывов в атмосфере и под землей, - работы ядерных реакторов, аварий на атомных электростанциях (увеличение ^{14}C / ^{12}C) и др. Радиоуглеродный метод находит широкое применение для датирования событий позднего плейстоцена и четвертичного периода. С его помощью был установлен возраст последнего прорыва босфорских вод в Черное море, вызвавших его сероводородное заражение - около 7500 - 8000 лет назад (А.П.Виноградов, 1967); производилось изучение четвертичного вулканизма, по обугленным древесным остаткам; датирование морских террас, по раковинам моллюсков; определение возрастов этапов оледенений; времени вымирания некоторых групп животных и т. д. Особенно эффективно он используется в археологических исследованиях.

3. 7. Возраст самых древних пород земной коры - 4,28 млрд. лет.

Геологи оценили возраст пород недавно открытого зеленокаменного пояса на севере Канады. Их расчеты основывались на соотношение самария и разных изотопов неодима. Этот метод используется для оценок возраста пород старше 4 млрд. лет, например метеоритов. Оказалось, что некоторые составляющие этого зеленокаменного пояса имеют возраст 4,28 млрд. лет. Это всего на 300 млн. лет позже рождения самой Земли.

Возраст Земли сейчас оценивают в 4,5–4,6 млрд. лет. Этот возраст расчетный, так как никаких пород от тех времен не сохранилось (или неизвестно, где и как их искать). Древнейшие найденные породы имеют возраст 4,03 млрд. лет (северо-западные территории Канады) и 4,27 млрд. лет (в Западной Австралии). Для расчетов возраста этих пород обычно используют радиоизотопный метод датирования (см. также Radiometric dating) по цирконовым гранулам. Но главное ограничение циркониевого метода в том, что циркон — это редкий минерал, и в наиболее распространенных магматических породах он не встречается.

Геологи из Монреаля (Университет Мак-Гилла и Квебекский университет) и Вашингтона (Институт Карнеги) решили использовать другой метод для определения абсолютного возраста древних пород — по соотношению неодим–самарий.

Изотоп самария с атомным весом 146 (^{146}Sm) распадается с образованием изотопа неодима ^{142}Nd, период полураспада ^{146}Sm составляет 103 миллиона лет. Соотношение этих двух изотопов говорит о возрасте пород — но это если известно изначальное содержание изотопа самария ^{146}Sm в породе. А поскольку оно неизвестно, геологи отталкиваются от другого соотношения — двух стабильных изотопов неодима $^{144}Nd/^{142}Nd$. Это соотношение меняется из-за распада самария — то есть чем древнее порода, чем больше в ней должно быть относительное содержание изотопа ^{142}Nd. Измерив в породе содержание изотопа

самария-146 и соотношение $^{144}Nd/^{142}Nd$ и учтя период полураспада самария, а также «фоновое» соотношение $^{144}Nd/^{142}Nd$, геологи и оценивают возраст древних пород.

Сланцы, которые изучали геологи, были доставлены в лабораторию из зеленокаменного пояса (Greenstone belt), расположенного у иннуитского (эскимосского) поселка Нуввуагиттук (Nuvvuagittuq) в Квебеке. Этот зеленокаменный пояс был обнаружен исследователями несколько лет назад, и его древний возраст был определен сразу же, в том же году. Остальные годы специалисты перепроверяли результаты и описывали строение формации и минералогию. Этот пояс составлен вулканическими породами и окружен массивом тоналитов, сложенных кварцем, натриевым плагиоклазом, амфиболом, биотитом. В тоналитах были найдены вкрапления циркона и по этим вкраплениям определен возраст тоналитов — 3,66 млрд лет. А вот основные породы самого пояса — это своеобразные по химическому составу амбифолы, называемые куммингтонитом. Так как эти породы отличаются от основной массы амфиболов, с которыми привыкли иметь дело канадские геологи, то авторы статьи в *Science* даже назвали куммингтонит лжеамфиболом. И самое важное было для них — определить возраст этих лжеамфиболов. Он оказался 4,28 млрд лет.

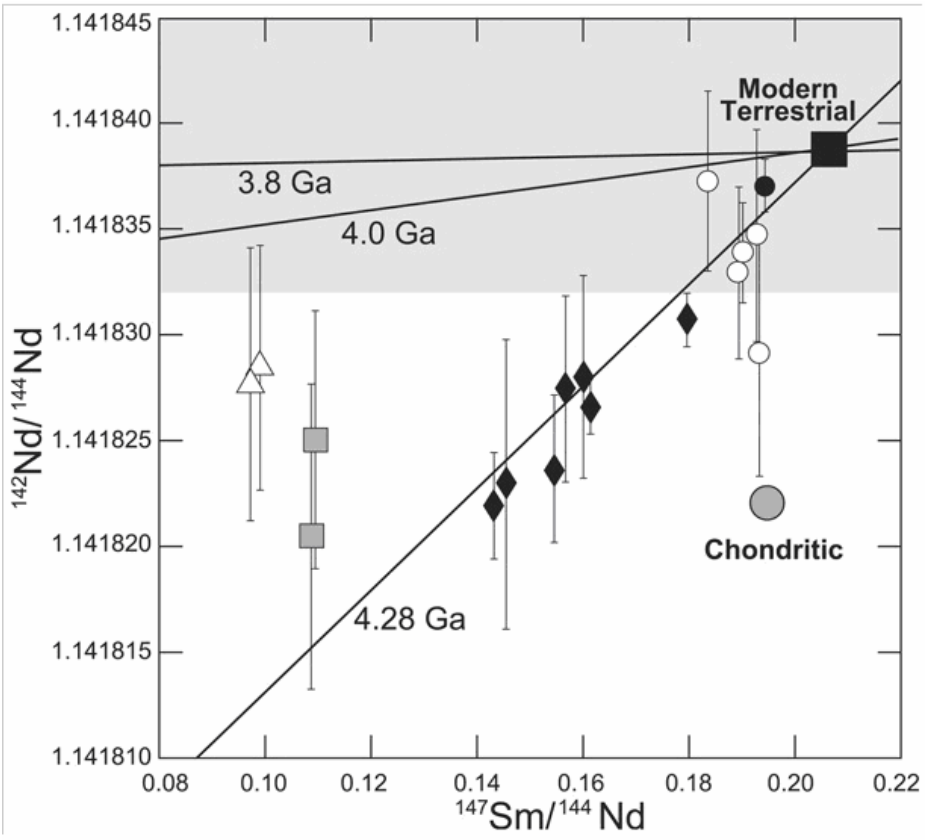


Рис. 3-7. Изохроны по изотопам неодима и самария. Стандартные для современных земных пород значения показаны *большим квадратом* и *серой полосой* вверху. *Черные ромбы* - это данные по семи изученным образцам. По ним и построена изохрона, соответствующая возрасту 4,28 млрд лет. *Кружки*, *квадраты* и *треугольники* показывают изотопные соотношения других геологических структур, окружающие лжеамфиболы. *Большой серый кружок* указывает соответствующие значения изотопных соотношений для метеоритов (хондритов). График из статьи (O'Neil J., et al., Neodymium-142 Evidence for Hadean Mafic Crust // Science. 2008. V. 321. P. 1828–1831.).

Если считать, что эти оценки относятся к моменту образования пород, то получается, что земная кора формировалась уже через 300 млн. лет после рождения Солнечной системы и самой Земли, чей возраст оценивается в 4,5-4,6 млрд. лет. В интервью для *Canadian Press* Джонатан О'Нил высказал несколько предположений, которые косвенно следуют из приведенных изотопных соотношений и содержания других элементах в породах этого древнейшего зеленокаменного пояса: «Эти данные дают ученым новые возможности для исследования процесса отделения земной коры от мантии. Помимо этого, некоторые детали указывают на возможное присутствие воды при формировании этих пород. Значит, океаны уже существовали тогда, 4,28 млрд. лет назад. Условия в том океане, конечно, отличались от теперешних, но не катастрофическим образом. И в принципе, условия были таковы, что там могла быть жизнь. Пока никаких следов ее не нашли. Однако в исследованных породах очень высокое содержание железа, а обогащение пород железом может происходить при участии бактерий. Тогда (но это только предположение!) — перед нами первое свидетельство жизни».

Глава 4*. Внутреннее устройство Земли.

В главе 4 изложена: модель горячей Земли, эволюция параметров Земли в контексте горячей модели, роль водорода, температура, давление и плотность вещества в центре Земли. Упругие свойства вещества внутреннего ядра. Эксперименты со сжатием железа сходящейся сферической ударной волной. Упругие свойства кристаллической пылевой плазмы. Кристаллическая» ячейка вещества внутреннего ядра Земли.

4. 1. Модель горячей Земли.

Модель внутреннего устройства Земли может быть верной и убедительной лишь в том случае, если:
- четко и ясно сформулированы условия и механизм образования планеты;
- оценены начальные параметры вещества планеты (температура, плотность, размер, химический состав и т.п.);
- эволюция параметров планеты очевидна и следует из основных законов физики, которые, естественно, не нарушаются;
- на определенном этапе эволюции, Земля должна оказаться именно такой, какая она есть сейчас.

Выполнение этих очевидных условий должно позволить:
- прогнозировать поведение Земли в будущем;
- найти и объяснить общность и различия Земли с другими планетами Солнечной системы.

.

Согласно (Магницкий, 1965), гравитационная энергия Земли равна:

$$E = 3/5\ GM^2/R = 2.25\times10^{39} \text{ эрг}, \qquad (4.1)$$

здесь: G - гравитационная постоянная, M - масса, а R - радиус Земли. Энергию такой величины необходимо затратить на то, чтобы «растащить» всю массу Земли по пылинкам так далеко друг от друга, чтобы они не смогли собраться вместе. Естественно, что именно столько выделится энергии, и пойдет на нагрев её вещества, если будет происходить обратный процесс – сжатие вещества Земли (за счет самогравитации). Если энергию E поделить на приемлемую величину теплоемкости вещества Земли (c_p = 0.3 кал/г·град.) и её массу, то оказывается, что температура земного вещества может достичь очень большого значения, порядка 30 000 К. Как следует из книги Магницкого (1965), *геофизики не знают, как можно воспользоваться этой оценкой. Температура в 30 000 К представляется им абсолютно нелепой* (там же). Очевидно, что при такой температуре вся Земля должна быть, по меньшей мере, расплавленной, что противоречило бы ее внутреннему устройству. Действительно, толщина мантии Земли составляет почти 3 тысячи километров. Время существования Земли (t) “всего” 4.5 млрд. лет ($t = 1.5\times10^{17}$ с). За это время (если бы вся Земля была расплавленной) земное вещество может кристаллизоваться на глубину (δ) не превышающую 400 - 600 км. [$\delta \approx (\zeta t)^{1/2}$, где ζ - температуропроводность земного вещества ($\approx 10^{-2}$ см^2/с)]. Этот довод практически “закрыл” все дальнейшие попытки разработки модели “горячей” Земли. Для геофизиков остался лишь один путь - развитие “холодной” модели. В этом случае для “изготовления” Земли необходимо примерно 10^8 лет, именно для того, чтобы образующееся в этом процессе тепло успевало отводиться в космическое пространство радиационным способом, через излучение.

В этой главе мы рассмотрим “сценарий” образования горячей Земли, включающей быстрое сжатие её вещества за счет самогравитации. В этом случае температура вещества

Земли окажется порядка нескольких десятков тысяч градусов. Согласно этому "сценарию", температура вещества планеты (звезды, спутника) определяется только ее массой:

$$T \sim E/Mc_p \sim M/Rc_p \sim M^{2/3}/c_p. \qquad (4.2)$$

Оцененная таким способом величина T, соответствует температуре вещества планеты в момент ее образования. Полагая, что в процессе эволюции планет и их спутников, они охлаждались, величина T приближается (оставаясь всегда больше) к температуре вещества (T_G) внутреннего ядра планеты ($T > T_G$).

Вещество, имеющее температуру T = 30 000К (≈ 3 эВ) будет находиться в газообразном состоянии, точнее, в состоянии слабоионизованного газа - плазмы. Земное вещество может нагреться до такой температуры при сжатии в момент образования планеты за счет протекания диссипативного процесса самогравитации. Внутреннее (газокинетическое) давление вещества в процессе его сжатия, по мере увеличения его температуры, будет возрастать. Сжатие остановится в тот момент, когда газокинетическое давление станет равным давлению самогравитации (критерий Джинса). Воспользуемся этим критерием для оценки термодинамических параметров вещества Земли. Сделаем одно весьма существенное для нашей модели предположение. Будем считать, что в настоящее время земное вещество в "первородном" состоянии, близком к идеальному газу, находится во внутреннем ядре. Это очень важное предположение. Если это действительно так, то все остальное в нашей модели является физически непротиворечивым следствием этого предположения...

Воспользуемся им для оценки современных термодинамических параметров вещества внутреннего ядра. Приравняем скорость звука в идеальном газе: $(\gamma R_g T/\mu)^{1/2}$ к величине скорости P-волн внутреннего G-ядра (v_p = 11.2 км/с), получаем: $T/\mu \approx 1$, (T в 10^4 К). Здесь: $\gamma = c_p/c_v$ - показатель адиабаты, R_g - газовая постоянная, μ - молекулярный (атомный) вес вещества.

Оценим величину T/μ из равенства: $nkT = \rho g R$ = 3.5 $\cdot 10^{12}$ дин/см^2 (давление в центре Земли), где $n = \rho_G/\mu m$ - концентрация вещества, ρ_G - плотность вещества G-ядра, m - вес протона, k - постоянная Больцмана, ρ - средняя плотность Земли, g - сила тяжести, R - ее современный радиус, а получаемая величина $T/\mu \approx 1/3$. Эта оценка, на наш взгляд, более правдоподобна, чем первая. Принимая величину T = 30 000 К, получаем $\mu \approx 10$. Заметим, что в этом случае величина молекулярного (атомного) веса вещества Земли показывает, что в ее составе значительное место принадлежит водороду. В качестве примера представим, что внутреннее ядро Земли состоит из водорода и железа. Молекулярный вес μ "молекулы", составленной из атомов железа и водорода, будет равен примерно 10 при условии, если один атом железа будет "окружен" пятью атомами водорода и т.п.

Согласно нашей модели, температура T = 30 000 К (или близкая к ней) присуща только веществу внутреннего ядра. Большая часть вещества Земли (внешнее ядро и мантия) за время ее эволюции уже остыла (релаксировала). Это один из главных постулатов нашей модели. Другой, не менее важный, говорит о том, что вещество, нагретое до такой температуры, будет находиться в газообразном состоянии и может быть сжато до плотности, большей, чем у металла. Отсюда следует, что начальный размер Земли, в момент ее создания, был меньше современного ($R_o < R$). Оценки начального радиуса Земли R_o, проведенные различными способами, не слишком надежны, хотя все они показывают, что $R_o < R$ современного. Величина R_o, по различным оценкам, колеблется в диапазоне 3 - 4 тыс. километров. Наиболее интересное решение нашей задачи возникает в том случае, если принять R_o равным 3.5 тыс. км. В пользу него, приведем такое, весьма интересное наблюдение. Радиус внешнего ядра Земли равен 3.5 тыс. км. Площадь поверхности внешнего ядра с удивительной точностью равна суммарной площади материков, а сами материки с удивительной точностью

“совмещаются” друг с другом на шаре с радиусом, равным радиусу внешнего ядра (см. рис. 1-9, глава 1). Эти обстоятельства, по-видимому, можно истолковать в пользу того, что Земля имела первоначальный размер, равный размеру ее внешнего ядра, а материки занимали полностью всю её поверхность.

Поделив массу Земли на объем внешнего ядра, можно получить оценку начальной плотности вещества Земли (ρ_o), которая могла достигать **35 г/см^3**. Начальная температура вещества T_o оказывается примерно вдвое больше, чем оцененная нами величина T. Давление в центре Земли должно быть больше современного примерно в 15 раз. Молекулярный (атомный) вес, по всей видимости, был меньше современного: $\mu_o < 10$. В течение последующих 4.5 млрд. лет Земля, после образования, эволюционировала, при этом, естественно, изменялись значения величин ее основных параметров: радиус, температура в центре и на поверхности, плотность и химический состав вещества внутреннего ядра, величина теплового потока, гравитационное и магнитное поля и т.д.

Возникает естественный вопрос, насколько реальна оценка такой величины плотности как 35 г/см^3? До недавнего времени ответа на этот вопрос не было. Однако совсем недавно спутник CoRoT нашёл сразу несколько внесолнечных планет и загадочный тёмный объект неизвестной природы. Масса одного из них в 50 раз меньше, чем у Солнца, а плотность в 4 раза больше, чем у свинца. Объект, который получил название CoRoT-Exo-3b, обращается вокруг слабенькой звездочки 13-й звёздной величины, идентифицируемой в эксперименте как CoRoT-Exo-3. Средняя плотность CoRoT-Exo-3b составляет **около 45 г/см^3**. Плотность других планет из этой системы несколько меньше, но всё равно очень велика (Deleuil et al. 2011). *Этот результат объяснения не находит.*

4. 2. Эволюция параметров Земли в контексте горячей модели.

К настоящему времени геологами собраны коллекции образцов, обработка которых показывает, что на Земле раньше было совсем не так как сейчас. Были другими состав и плотность атмосферы, другая температура поверхности, другие океаны, другая скорость вращения Земли, другое гравитационное и магнитное поля и т.д. Практически все они, в той или иной степени, находятся в противоречии с моделью холодной Земли, построенной на принципе актуализма: «так было всегда». Ниже мы обратимся к известным фактам из истории эволюции Земли в контексте нашей модели.

Радиус Земли. Согласно нашей модели, эволюция Земли состоит в релаксации метастабильного плотного горячего вещества к стабильному состоянию путем реализации двух экзотермических фазовых переходов: конденсации и последующей кристаллизации. Процесс конденсации начинается на границе внешнего ядра (внутреннее – ещё не сформировалось), процесс кристаллизации – там же, но фронты обеих фазовых переходов имеют противоположные направления. Эти процессы сопровождается перемещением масс вдоль по радиусу (рис. 4-1-*а*). При этом происходит превращение однородной модели Земли в многослойную. Конденсация приводит к тому, что плотность исходного вещества становится меньше на величину $\Delta\rho \approx \rho_o - \rho_Я$, где ρ_o – исходная плотность вещества Земли (35 г/см^3), а $\rho_Я$ – плотность вещества ядра ($\approx$ 10 г/см^3). По нашей модели вещество с плотностью $\Delta\rho$ после кристаллизации его на границе фазового перехода формирует мантию. Эти фазовые переходы сопровождаются ответным перемещением масс в обратную сторону, таким образом, чтобы соблюдалось постоянство момента импульса (см. рис. 6). Таким образом, масса мантии равна массе «потерянной» внешним ядром: $(R_З^3 - R_Я^3)\rho_М \approx R_Я^3\Delta\rho$. Здесь $R_З$ и $R_Я$ – радиусы современной Земли и внешнего ядра, отсюда $\Delta\rho \approx \rho_М$ $(R_З^3 - R_Я^3)/ R_Я^3 \approx 25$ г/см^3, что и следует из модели. В нашей модели гравитирующий шар (звезда, планета, большой спутник) рассматривается как саморегулирующаяся, самоорганизующаяся система в терминах теории самоорганизации и оптимальных процессов.

Итак, после образования, горячая Земля охлаждалась. На первом этапе остыла и кристаллизовалась ее внешняя оболочка - прообраз земной материковой, гранитной коры. Вещество протоЗемли, находящееся после образования в газообразном (плазменном) состоянии, конденсировалось, образуя вещество внешнего ядра, и затем кристаллизовалось, - образуя мантию. Таким образом, в эволюции планеты непосредственное участие принимали два экзотермических фазовых перехода: конденсация и кристаллизация. На самом раннем этапе эволюции Земли скорость охлаждения её вещества определял процесс кристаллизации. Этот процесс контролировался кондуктивным теплопереносом – температуропроводностью: $\zeta = \lambda/\rho c_p$, где ρ - плотность, а λ - коэффициент теплопроводности. Для обычных веществ величина ζ = 0.1 - 0.01 (см^2/с). Поначалу, наращивание мантии происходило очень медленно: $l \sim (\zeta t)^{1/2}$, t - время эволюции. Увеличение толщины мантии сопровождалось уменьшением внутреннего ядра. Так продолжалось до тех пор, пока ее толщина жидкого внешнего ядра l не стала достаточной для того, чтобы во внешнем ядре и в мантии возникла конвекция ($l \geq l^*$) и "заработал" конвективный теплоперенос, более эффективный, чем кондуктивный. Известно, что конвекция в слое толщиной l между двумя плоскостями, поддерживаемыми при постоянном перепаде температуры ΔT, возникает при числе Релея $Ra > 1710$:

$$Ra = (g\,\beta\, l^3 \Delta\, T) / (\eta\zeta). \qquad (4.3)$$

Подстановка характерных для вещества мантии Земли величин ускорения силы тяжести g, коэффициента объемного расширения β, кинематической вязкости η, и коэффициента температуропроводности ζ, для $\Delta T = 10^4$ К, определяет величину $l^* \approx 300$ км. По оценкам, толщина внешнего ядра была примерно того же порядка.

В работе (Chandrasekchar, 1961) показано, что для больших чисел Релея (именно этот случай соответствует конвекции в ядре и мантии) произведение чисел Рейнольдса: $Re = (v_k\, l)/\,\eta$ и Прандтля $Pr = \eta / \zeta$ пропорционально корню квадратному из числа Релея:

$$Re \times Pr \sim Ra^{1/2}. \qquad (4.4)$$

В свою очередь, число Релея (18.3) $Ra \sim l^3$. Подставляя, получаем зависимость между характерным размером l, скоростью конвекции в мантии v_k ($v_k = l/t$) и характерным временем процесса t: $v_k\, l \sim l^{3/2}$, или: $l^2/t \sim l^{3/2}$. Заменяя l на ΔR, получаем зависимость: $\Delta R \sim t^2$, вместо $\Delta R \sim (t)^{1/2}$ в начале процесса эволюции Земли (см. вставку в левом верхнем углу рис. 4-1-а).

Таким образом, по нашей модели получается, что в течение примерно 3.5 - 4 млрд. лет толщина мантии увеличилась от нуля до (примерно) 300 км (l^*), а за последние 0.5 - 1 млрд. лет - более чем на 2.5 тыс. км. Наша модель горячей Земли оказывается адекватной модели расширяющейся Земли, которую разрабатывали в свое время С. Кэри (Carey, 1976); Хильденберг (Hilgenberg, 1933); Оуэн (Owen, 1992) и др. Рисунок 4-1 демонстрирует зависимость земного радиуса от времени эволюции, согласно моделям этих авторов и, для сравнения, нашу модель, в которой $\Delta R \sim t^2$. Так как радиус Земли однозначно связан с силой тяжести и средней плотностью, на рисунке показано изменение этих параметров. Согласно модели, увеличение радиуса Земли происходит за счет роста толщины мантии, поэтому на рисунке показано как происходило увеличение массы мантии, а так как количество воды в океанах жестко связанно с массой мантии, то этот график характеризует и скорость «наполнения» океанов. Здесь же, для сравнения, приведен ориентировочный ход увеличения воды в акватории Мирового океана по наблюдательным данным.

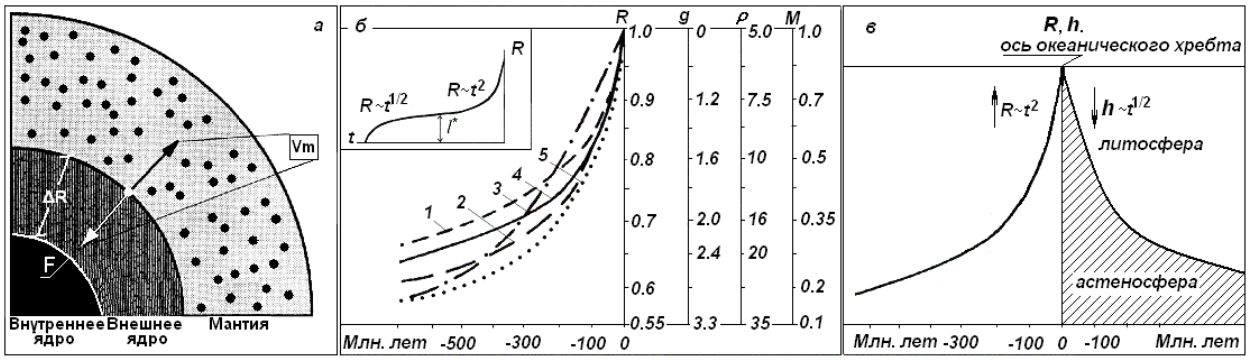


Рис. 4-1. (*а*) Перенос массы: положительной (наружу, в направлении увеличения радиуса Земли) при формировании мантии и "отрицательной" (внутрь), - при формировании внешнего ядра, при выполнении условия соблюдения постоянства момента импульса.
(*б*) Изменение радиуса Земли R от времени её эволюции: - в течение всего периода эволюции t, и за 500 млн. лет. Здесь $R(t)$, $g(t)$, $\rho(t)$: 1- по данным Кэри, 2 – Хильденберга, 3 – Оуэна, 4 – нашей модели. Увеличение массы океанов $M(t)$ – 5.
(*в*) Толщина литосферы $h \sim t^{1/2}$ в зоне СОХ.

Сравним полученную зависимость $\Delta R \sim t^2$ (или $R \sim t^2$, где R - радиус Земли) с хорошо известным в тектонике плит характером глубины астеносферы в зоне спрединга от расстояния от центра срединно-океанического хребта, оцененного в годах: $h \sim t^{1/2}$, (h – глубина астеносферы, а t – время, отсчитанное назад от современного). Эти функции являются однозначно обратными и симметричными относительно: $\Delta R \sim t_R$, или $h \sim t_h$ (что одно и то же). Действительно, $\Delta R = - h$, а $t_R = - t_h$. Используя наши оценки, полученные для зависимости ($\Delta R \sim t^2$), и подставив h в км, а t в млн. лет, получим ориентировочно: $h \approx 100 \times t^{1/2}$, для $t < 500$ млн. лет. Таким образом, известная зависимость (рис. 1-6), показывающая изменение толщины астеносферной зоны от времени эволюции, является (в нашей модели) ни чем иным, как скоростью расширения Земли.

Расширение Земли определяется тем обстоятельством, что силы растяжения, возникающие при разуплотнении сжатого газообразного вещества, и переходе его в нормальное, конденсированное состояние, превалируют над силами гравитации – силами сжатия. В принципе, по модели, после окончания цикла расширения, наступает цикл сжатия, когда гравитация оказывается сильнее, чем расширение. Есть все основания говорить о том, что наша модель описывает расширяющуюся, пульсирующую Землю. Подобная гипотеза неоднократно высказывалась и обсуждалась известными геологами: В.А. Обручевым, М.А.Усовым, М.М. Тетяевым, Е.Е. Милановским и др. Естественно, геологами не обсуждалась физика подобной модели эволюции Земли.

Планеты. Согласно нашей модели все планеты земной группы и Луна прошли такой путь эволюции. Отличие состоит только в том, что чем меньше масса планеты, тем быстрее происходит эволюция (рис. 4-2) и меньше начальная плотность вещества планеты (рис. 9-5). Меркурий «выбивается» из этого ряда. Возможной причиной может быть близость его к Солнцу и дополнительный разогрев недр за счет приливного трения. Время окончания эволюции Луны определено по прекращению генерации геомагнитного поля. Период эволюции Марса и Венеры, так же «потерявших» дипольное поле, определен качественно, по пересечению линии, соединяющей Землю и Луну. Время окончания эволюции Земли оценивается делением количества метастабильного вещества G-ядра на скорость роста радиуса. Такая ориентировочная оценка показывает, что при средней скорости роста радиуса $\approx$ 1 см/год, его приращение $\Delta R \approx 4R_G^3 \, \Delta\rho / S\rho_M = (2 - 3) \cdot 10^6$ см, или оставшееся время эволюции $\approx$ 2 - 3 млн. лет, т.е. фактически можно считать полное время эволюции

Земли ≈ 4.5 млрд. лет. Здесь, $\Delta\rho$ - разность плотностей между G- и E ядрами, $S\rho_M$ – площадь поверхности Земли и плотность вещества верхней мантии.

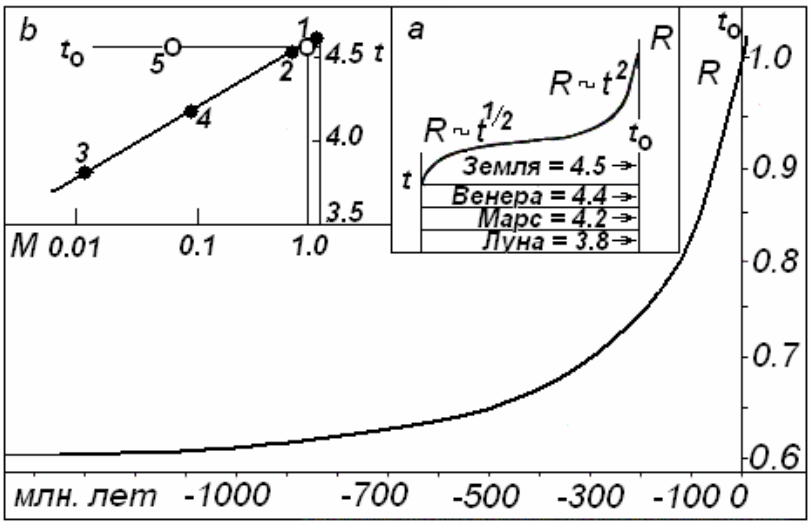


Рис. 4-2. Изменение радиуса планеты в период эволюции от начала до её окончания (*a*). Зависимость времени эволюции от массы планет и Луны (*b*). Здесь 1- Земля, 2 - Венера, 3 - Луна, 4 - Марс, 5 - Меркурий.

Любая теория может претендовать на признание лишь в том случае, если она способна давать прогноз предстоящих событий. Суть модели горячей Земли состоит в постепенной релаксации возникшего в момент образования планеты вещества в состоянии перегретого и пересжатого пара. Вещество Земли проходит стадии конденсации пара и последующей его кристаллизации. Эти процессы относятся к экзотермическим фазовым переходам первого рода. Они происходят при выделении теплоты фазового перехода. При перегреве вещества за счет выделяемой энергии возможны обратные переходы испарения и плавления. Они происходят при поглощении энергии и относятся - к эндотермическим. При экзотермических переходах вещество - разуплотняется, что приводит к расширению Земли, при эндотермических, наоборот, - вещество Земли становится более плотным – Земля сжимается. В истории Земли эти моменты можно проследить по чередованию полярностей геомагнитного поля.

Прогноз. Как будет показано в главе 14, генерация геомагнитного поля обуславливается фазовым переходом на границе внутреннего ядра. По нашей модели это означает, что в периоды современной полярности Земля сжималась, противоположной – расширялась.

Как следует из рисунков 4-1 и 4-2, несмотря на общий характер зависимости: $\Delta R \sim t^2$, на последнем участке можно принять $\Delta R \sim t$. В течение последних 5 млн. лет, ΔR увеличился примерно на 50 км (рис. 4-3). Средняя скорость расширения Земли ≈ 1 см/год. На рис. 4-2 показано, что радиус Земли ещё будет возрастать, но насколько?

Оценим предельную величину радиуса Земли. Как следует из нашей модели, расширение Земли, прекратится после того, как вещество внутреннего ядра релаксирует и конденсируется. Внутреннее ядро – исчезнет, прекратится генерация геомагнитного поля. Величину ΔR, на которую возрастет радиус Земли, мы оценили выше из баланса массы: «излишек» массы внутреннего ядра $4\pi/3R_G^3\Delta\rho = \Delta RS\rho$, где $\Delta\rho \approx \rho$, $\Delta\rho$ - «излишек» плотности, ρ - средняя плотность вещества Земли, а S – площадь поверхности Земли. Величина ΔR – оказывается порядка 20 - 30 км. Отсюда следует неутешительная для землян оценка: ***оставшееся время существования жизни на Земле ≈ 2 - 3 млн. лет***. В течение этого времени на Земле произойдет одна - две инверсии геомагнитного поля и несколько экскурсов. Сила тяжести при этом уменьшится примерно на 10 Гал ($g = GM/R^2$).

Рис. 4-3. Возможный (следующий из горячей модели) ход изменения радиуса Земли.

4. 3. Роль водорода.

Авторы многих работ по физике и химии Земли обращаются к факту присутствия водорода в ее недрах. В значительной части, это экспериментальные наблюдения за эманацией водорода при извержении вулканов, землетрясениях, в зонах глубинных разломов и т.п. Кроме этого, наличие в глубинах Земли водорода, в некоторых ее теоретических моделях, способствует объяснению ряда свойств вещества (например, величину электропроводности астеносферы (Karato, 1990)). Складывается впечатление, что наличие водорода в земных глубинах можно считать твердо установленным фактом. В этой связи возникает естественный вопрос: откуда в недрах Земли берется водород? Согласно общепринятой модели “холодной” Земли, в момент ее образования, когда она “собиралась” из отдельных кусочков железа и силикатов, не находится места летучему водороду. В то же время, например, по данным об атмосфере Земли на ее ранних этапах развития, состав земной атмосферы был преимущественно водородным (Салоп, 1982). Этот факт противоречит модели холодной Земли.

Совсем другое “отношение” к водороду в модели “горячей” Земли. По нашей модели, Земля образовалась вместе с Солнцем и другими планетами и их спутниками в едином процессе и из одного и того же “строительного материала”, в основном, - водорода. Вещество Земли в процессе ее образования отделилось из общей массы протосолнечного диска, было сжато и нагрето до температуры порядка нескольких тысяч градусов при самогравитации. Процесс самосжатия (коллапс) уравновешивался растущей величиной внутреннего газокинетического давления. В тот момент, когда газокинетическое давление и давление самогравитации уравновесились, самосжатие вещества Земли прекратилось. Земля стала остывать, формируя при этом земную кору, внешнее ядро (при конденсации первично газообразного плотного вещества, которое

сохранилось до наших дней как внутреннее ядро), и мантию (при кристаллизации вещества внешнего ядра). Вещество внутреннего ядра, согласно нашей модели, представляет собой перегретый плотный газ (слабоионизированную плазму), состоящий в значительной степени из водорода.

Модель горячей Земли предполагает наличие водорода как во внутреннем ядре, так и в других ее оболочках (естественно, в значительно меньших концентрациях). Воспользуемся введенным в работе (Karato, 1990) параметром, характеризующим отношение концентраций "водород/кремний" (H/Si). Этот параметр во внутреннем ядре (по нашей модели) примерно равен единице (точнее, 0,66). Согласно Карато, на глубине 100 км величина H/Si порядка 10^{-3}-10^{-4}. Весьма грубые оценки показывают, что на границе ядро-мантия H/Si будет около 0, 2 - 0,3 и т.д.

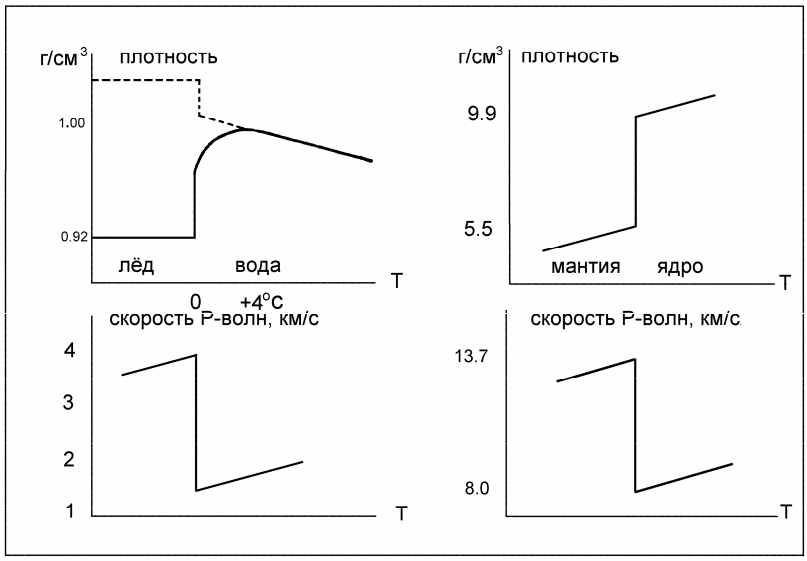


Рис. 4-4. Изменение плотности и скорости звука на границе лед-вода - слева; и мантия-ядро - справа.

Присутствие водорода в веществе земных оболочек позволяет воспользоваться его удивительной и уникальной способностью образовывать т.н. водородные связи между элементами (атомами, молекулами, ионами и т.п.) вещества. Как будет следовать из дальнейшего изложения, этот подход позволяет найти объяснение свойств и структуры земного вещества альтернативное общепринятой точке зрения.

Вода и лед с их водородными связями обладают уникальными аномальными свойствами. Свойства системы "вода-лед" (резкое изменение плотности и скорости звука на границе жидкость-кристалл) в значительной мере похожи на свойства системы "ядро-мантия" (см. рис. 4-4). Это обстоятельство позволяет нам использовать теории и модели, разработанные для воды, - для объяснения свойств и структуры вещества земных оболочек. Однако прежде чем перейти к построению нашей модели, приведем некоторые сведения о свойствах воды, льда и водородных связей.

Вода, лед и водородные связи. Вода и лед, это самое распространенное вещество во Вселенной, и в то же время, это самое необычное вещество, обладающее самыми "аномальными" (по сравнению с другими "нормальными" веществами) свойствами. Аномальные свойства воды настолько привычны, что о них обычно не задумываются. Еще Галилей заметил, что жизнь на Земле обязана проявлению водой ее аномальных свойств. Физические и химические свойства воды и льда обсуждаются в научной литературе не менее 200 лет. Аномальное поведение воды обязано, как известно, наличию

у нее водородных связей. Вещества, так же обладающие водородными связями, ведут себя аналогично воде. Водородная связь это особый тип связи между атомами. Промежуточный - между валентной, и Ван дер-Ваальсовой связями. Эта связь может образоваться при наличии атома Н между двумя электроотрицательными атомами, причем с одним из них атом Н связан ковалентной связью. Природа водородной связи состоит в том, что электронная плотность на линии Н...О (N, F и т.п.) смещается к отрицательному атому. Это способствует сближению электронов отрицательных атомов соседних молекул. В результате расстояния: О - О, О - N и т.п. становятся значительно меньше, чем они были бы без атома Н. Явление укорочения длины атомных связей двух молекул А и В: А - В (без водорода) и А - Н...В (с присутствием атома водорода), иллюстрирует таблица 4.1. (ФЭ, 1992).

Таблица 4.1.

Н - связь	энергия ккал/моль	расстояние в Å А - В	расстояние в Å А - Н...В
слабая	0.1 - 1.0	3.0 - 3.5	2.0 - 2.5
средняя	5.0 - 15.0	2.7 - 3.0	1.7 - 2.0
сильная	20 - 60	2.2 - 2.5	1.1 - 1.2

Из таблицы 4.1 следует, что наличие (сильной) водородной связи приводит к тому, что расстояние между атомами уменьшается примерно вдвое.

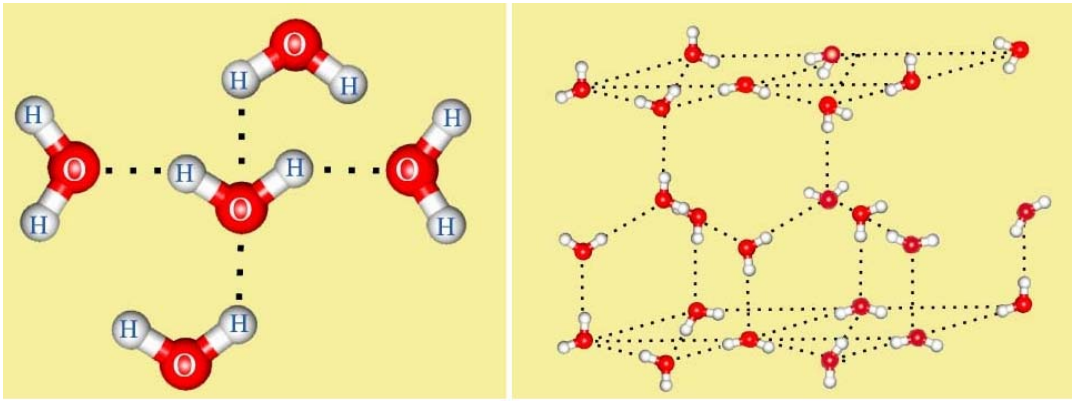


Рис. 4-5. Водородные связи (точки, слева) и структура льда (справа).

Плотность льда меньше плотности воды. Это свойство отличает воду и другие вещества, обладающие водородными связями, от прочих, у которых плотность вещества в твердом кристаллическом состоянии всегда выше, чем плотность его расплава. При переходе жидкости в твердое состояние, молекулы большинства веществ в обычном состоянии располагаются теснее, а само вещество становится плотнее. Однако, это совсем не так у воды. Охлаждая воду, можно наблюдать за поведением ее плотности (см. рис. 4-4). В начале плотность ведет себя обычным образом: вода при охлаждении становится все плотнее и плотнее. После охлаждения ее до температуры 4 °С она, вопреки общим представлениям, становится легче, а замерзая и образуя лед, еще легче.

Вода представляет собой гидрид кислорода. Сравним ее свойства со свойствами гидридов элементов, входящих так же как кислород в шестую группу таблицы Менделеева. Данные по температурам плавления и кипения этих гидридов приведены в таблице 4.2. В четвертой строке таблицы указаны примерные величины температур плавления и кипения воды, если бы она была обычным гидридом, и не обладала бы водородными связями. Оценка получена в предположении об обратной зависимости температур плавления и кипения от величины молекулярного веса. Эта зависимость достаточно четко прослеживается для гидридов первых трех столбцов таблицы. Из таблиц

4.1 и 4.2 видно, насколько наличие водородных связей меняет не только плотность упаковки вещества, но и его термодинамические характеристики: Наличие водородных связей в веществе, в нашем случае в воде, приводит к повышению его температуры плавления примерно на 95, а температуры кипения, на 170 градусов. Если бы вода не обладала способностью к образованию водородных связей, то в нормальных условиях она находилась бы только в газообразном состоянии и превращалась в жидкость при температуре порядка -70 °С.

Таблица 4.2.

	Гидриды:	Т плав. (°С)	Т кип. (°С)	Молек. вес:
1	H_2 Te	- 60	- 5	129.6
2	H_2 Se	- 65	- 40	81
3	H_2 S	- 85	- 60	34
4	H_2 O	- 95	- 70	18
5	H_2 O	0	100	18

Природа аномального поведения воды была предметом исследований более 200 лет тому назад Генри Кавендиша и Антуана Лавуазье. Они заложили основы современного понимания природы воды. В 1910 г. физики, американец П. Бриджмен и немец Г. Тамман, обнаружили, что лед может образовывать несколько полиморфных кристаллических модификаций. Понятие о водородных связях было впервые введено в 1920 г. американскими учеными У. Латимером и У. Родебушем. С этих пор водородные связи являются предметом фундаментальных исследований. Английский ученый Уильям Брэгг, разработавший рентгеноструктурный метод анализа кристаллов, обнаружил, что каждая молекула H_2O во льду окружена четырьмя другими молекулами. В 1932 году ученик Брэгга проф. Д. Бернал совместно с Р. Фаулером (Бернал, Фаулер, 1934) разработали теорию молекулярной структуры воды, основанную на интерпретации рентгенографических данных льда. В основе их теории были положены представления о воде как о трехмерной структуре с четверной координацией.

Рентгенографические исследования льда показывают, что ядра кислорода располагаются в нем так же, как атомы кремния в решетке тридимита. Структура жидкой воды, согласно Берналу и Фаулеру, напоминает структуру кварца. При этом каждая молекула H_2O окружена четырьмя ближайшими к ней молекулами. Тридимит и кварц, это два различных кристаллических состояния кремнезема SiO_2. Химический состав и молекулярные структуры их одинаковы, а плотность кварца выше примерно на 10 %. Это различие обусловлено тем, что, имея одинаковые расстояния между атомами и ближайшими молекулами (т.е. первые координационные сферы), у кварца и тридимита различаются вторые координационные сферы: 4.2 Å - у кварца и 4.5 Å - тридимита. В последствии выяснилось, что эта аналогия не более чем образное представление воды и льда, т.к. кварцеподобных структур в жидкой воде обнаружить не удалось.

Стоит упомянуть идеи Л. Полинга, высказавшего в 1952 году предположение, что структура воды подобна структуре клатратных гидратов. Полинг предполагал, что у льда и воды, находящейся при различной температуре, количество водородных связей весьма различается. По его данным при 0° С около 15 % водородных связей оказываются разорванными. По характеру зависимости диэлектрических свойств воды от температуры, удалось выяснить, что при 25° С в жидкой воде 67 % всех молекул H_2 O сохраняют все четыре водородные связи, 23 % - три водородные связи, 7,6 % - две связи и лишь 0,2 % полностью свободные молекулы. Английский физик Д.Ж. Попл предположил, что водородные связи вообще не рвутся, а всего лишь “изгибаются”. Перестройка структуры воды, по Поплу, происходит именно благодаря “изгибанию” водородных связей. Холл предложил рассматривать воду как ассоциат, состоящий из двух структур: обычной и плотноупакованной. Упомянем еще одно, весьма важное свойство водородных связей.

Оно называется кооперативностью и означает, что образование одной водородной связи способствует возникновению рядом следующих связей. Идея кооперативности основывается на том, что для образования системы водородных связей требуется меньше энергии, чем арифметическое сложение энергий отдельных связей.

Водородные связи в минералах. Красивая идея о возможности объяснения такого факта, что плотность жидкого ядра выше, чем плотность вещества мантии, может быть связана не с тем, что ядро железное, а мантия – силикатная, будет воспринята лишь при доказательстве того факта, что в мантии действительно существуют минералы, в составе которых водородные связи имеются.

Геологи считают водород самым трудноуловимым элементом в составе Земли. Современная наука не в состоянии пока подсчитать, сколько водорода содержится в гидратированной океанической коре и в верхней литосферной мантии, в переходной зоне (на глубинах 410–660 км) и в нижней мантии, не говоря уже о земном ядре: разброс в различных оценках общего количества водорода внутри Земли достигает одного порядка.

Немногим больше ясности существует и в вопросе о происхождении водорода, а, следовательно, и воды на нашей планете. То ли оно было эндогенным, то есть накапливание водорода происходило непосредственно в процессе первичного сбора протопланетного вещества в Солнечной системе, то ли экзогенным, то есть водород был принесен позднее из околоземного пространства различными богатыми водородом кометами. Всё это остается не ясным.

Соответственно, согласно одной широко распространенной точке зрения, вода на Земле образовалась конденсационным путем из атмосферы вскоре после образования планеты, около 4,5 млрд. лет тому назад, сторонники же альтернативного подхода настаивают на том, что вода длительное время равномерно накапливалась на поверхности в процессе дегазации и вулканизма мантии Земли.

В середине 80−х годов XX века Джозефу Смайту, работающему в Университете Колорадо (Боулдер), впервые удалось обнаружить, что в структуре одного из наиболее распространенных минералов земной верхней мантии, вадслеита, присутствуют атомы водорода, то есть эти минералы имеют в своем составе водную (гидроксильную) группу (OH). Позднее, в 1996 году, Смайту также удалось открыть новую водосодержащую разновидность вадслеита, вадслеит II, который не разлагается даже в глубине мантии.

За последние десять-пятнадцать лет методом инфракрасной спектроскопии было установлено присутствие низких содержаний H_2O и в ряде других так называемых номинально безводных минералов земной мантии (оливине, пироксене, гранате). Причем, поскольку оливин и его более плотные полиморфы - вадслеит и рингвудит - являются основными минералами мантии, - это позволяет рассматривать их в качестве своеобразного гигантского водного резервуара (так, вадслеит может содержать до 3% воды, рингвудит — до 2,8%).

В современной минералогии минералы-гидроксиды, обладающие гидроксильно-водородными связями, например, такие как диаспор (AlOOH) и гётит (FeOOH), для того, чтобы подчеркнуть их особенность, даже записываются специальным образом: $HAlO_2$, $HFeO_2$. (Буллах и др., 2008).

Аномалии свойств, обусловленные наличием водородной связи. Наличием водородных связей обусловлены уникальные свойства многих веществ, в том числе воды. Сильные водородные связи между молекулами воды *препятствуют ее плавлению и испарению*.

Водородные связи являются причиной и другого уникального свойства воды - при плавлении ее плотность возрастает. В структуре льда каждый атом кислорода связан через атомы водорода с четырьмя другими атомами кислорода - из других молекул воды. В результате образуется очень рыхлая "ажурная" структура. Вот почему лед такой легкий.

При плавлении льда около 10% *водородных связей разрушается*, и молекулы воды немного сближаются. Поэтому плотность жидкой воды при температуре плавления выше,

чем плотность льда. Дальнейшее нагревание, с одной стороны, должно вызывать увеличение объема воды. Это происходит со всеми веществами.

С другой стороны, водородные связи продолжают разрушаться, а это должно приводить к уменьшению объема воды. В результате плотность воды изменяется неравномерно. Наибольшее значение (1,00 г/мл) она имеет при температуре 4 ^{o}C. Такова зимняя температура вблизи дна пресноводных водоемов, где скапливается вода с максимальной плотностью.

http://www.hge.pu.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=295&Itemid=5

Вывод: согласно модели горячей Земли о*бразование мантии обязано продувке водородом вещества кристаллизующегося на поверхности жидкого ядра*.

4. 4. Температура, давление и плотность вещества в центре Земли.

Задача определения термодинамических параметров горячей Земли не допускает широкого разнообразия вариантов. Полагая, что масса Земли в процессе ее эволюции практически не меняется, температура определяется достаточно строго, а внутреннее давление является функцией радиуса Земли и температуры ее вещества, остальные параметры оцениваются более или менее однозначно. Согласно нашей модели, как отмечалось, начальный радиус Земли был примерно в два раза меньше современного. Следовательно, Земля расширялась, и ее объем в течение эволюции увеличился примерно в 8 раз. Начальная величина плотности вещества Земли составляла примерно 35 г/см^3, что в три раза больше современной величины плотности вещества внутреннего ядра ρ_G.

Давление. Величина современного давления в центре Земли оценивается как $p = \rho g R = 3.5 \cdot 10^{12}$ дин/см^2. Давление в центре Земли в момент ее образования (по нашей модели) $p_o = \rho_o g_o R_o$ должно было быть примерно в 10-15 раз выше, чем современное. Воспользуемся оценкой Ландау (Ландау, Лифшиц; 1964) для величины давления вещества, находящегося в сверхсжатом состоянии, $p \sim \rho^{5/3}$ (примерно: $p \sim \rho^2$). Отсюда следует, что величина плотности внутреннего ядра должна уменьшаться в течение эволюции Земли, по мере уменьшения давления, и достигнуть к настоящему времени общепринятых для величины плотности вещества внутреннего ядра значений. Так как начальный радиус Земли оказался примерно вдвое меньше современного, то гравитационная энергия только что образованной Земли должна быть примерно вдвое больше (а величина $g_o \approx 3.5\ g$), чем оцененная нами. Вряд ли начальная температура вещества Земли T_o могла быть в два раза больше чем оцененная нами выше (30 000 К). Дело в том, что величина теплоемкости c_p возрастает с увеличением температуры, а $T \sim 1/c_p$. Этот факт приведет к некоторому снижению величины T_o.

Температура. Тем не менее, если принять $T_o \approx 2T$ и учесть зависимость ρ от p ($p \sim \rho^2$), то можно оценить величину μ_o. Так как $T/\mu \sim p/\rho \sim (p)^{1/2}$, то $T_o/\mu_o \approx 1$, а величина $\mu_o \approx 5$, что находится в согласии с нашей моделью: вещество Земли на начальном этапе эволюции было более “солнечным”: на один атом железа здесь необходимо уже 10 атомов водорода, а не 5, как сейчас. Можно выяснить такой вопрос: сколько водорода (M_H) должна была “потерять” Земля за время своей эволюции для того, чтобы величина μ уменьшилась вдвое. Будем полагать, что μ^* современной Земли: $\mu^* \approx 50$ (не путать с μ внутреннего ядра). Массу Земли можно представить: $M = Nm\mu^*$, где N - полное число атомов (молекул). Массу потерянного Землей водорода, аналогично: $M_H = 10Nm\mu_H$, где $\mu_H = 1$ - атомный вес водорода, а 10 - число атомов водорода на один атом железа. Отсюда: $M_H/M \approx 1/5$, или, иначе, потери водорода составляют не более 20% от начальной массы Земли M_o, что, при наших точностях оценок, не должно особенно сказаться.

Тепловой поток. Градиенты температуры и давления dT/dR и dp/dR, согласно нашей модели, были, в прошлом, заметно выше (первый примерно в 3-4 раза выше, а второй - в 15-20 раз). Следовательно, тепловой поток Q ($Q \sim dT/dR$) на начальном этапе эволюции

Земли тоже был выше современного. Кстати, по нашей модели, можно оценить величину теплового потока. Воспользуемся для этого известной термодинамической формулой, связывающей энергию и энтропию системы: $dE = T\,dS - p\,dV$. Положим, что температура T изменяется в области фазового перехода на 10 000 K, а изменение энтропии dS порядка 1 Дж/г град. Обычно, величина $T \cdot dS \approx U$, где U - теплота фазового перехода - конденсации, U = (10-15) кДж/г. Величина теплового потока в этом случае:

$$Q = T \cdot dS \cdot M/t_o, \qquad (4.5)$$

где t_o - время эволюции Земли ($t_o = 4.5 \cdot 10^9$ лет), оказывается равной $Q = 10^{29}$ эрг/год, что примерно на порядок больше современного значения величины Q. Учитывая то, что раньше тепловой поток был больше современного, эта оценка не должна вызывать особых сомнений.

К этому следует добавить, что тепловой поток на Луне, где, по нашей модели, конденсация первичного вещества уже закончилась, а кристаллизация ещё идет, примерно в 30 меньше, чем тепловой поток Земли. Теплота фазового перехода конденсации примерно в 30 раз больше, чем теплота кристаллизации, что подтверждает нашу модель.

Водород. Как показано выше, наличие водорода и образуемых им водородных связей в ядре Земли - играет огромную роль в формировании внешнего ядра и мантии. Сравним энергетический вклад водорода в геодинамические процессы в мантии с тепловым потоком. Очевидно, что это весьма ориентировочная оценка, но она говорит о несомненном участии водорода в эволюции Земли. Итак, потери водорода составляют примерно 1/5 от массы Земли. Примем массу водорода $M_H \approx 10^{27}$ г. Энергию водородной связи примем равной 1 ккал/моль или 4кДж/г. Предположим, что все атомы водорода включены в водородные связи. Тогда общая энергия связей будет равна $4 \cdot 10^{27}$ кДж или $4 \cdot 10^{37}$ эрг, что составляет 2 % от полной гравитационной энергии Земли. Разделив эту величину на время эволюции Земли, получаем цифру (10^{28} эрг/год), сравнимую с величиной оцененного нами выше - теплового потока.

Как показано на сайте http://www.sunhome.ru/journal/115698 на Земле может быть образовано 239 триллионов тонн углеводородов, что составляет $\approx 2.4 \cdot 10^{20}$ г. Даже без учета того, что на водород приходится только четвертая часть этой цифры, видно, что Земля уже потеряла водорода значительно больше.

Обратим внимание на такую деталь... По началу, мы предположили, что вещество внутреннего ядра, возможно, сохранилось до наших дней в том виде, в каком оно было при образовании Земли. В результате развития модели, мы приходим к заключению, что это предположение не совсем точно... Оказывается, что в течение эволюции Земли состояние термодинамического равновесия, вокруг которого могут совершаться (по модели) циклические колебания, постоянно смещается в сторону уменьшения температуры и давления. Этот факт говорит в пользу циклического характера эволюции Земли, т.к. линейная термодинамика необратимых процессов показывает, что колебания значений термодинамических параметров не могут происходить относительно равновесного состояния. Последнее означает, что только в такой (или подобной) модели могут происходить циклы, привлекающие пристальное внимание геологов.

4. 5. Эволюция pT параметров на поверхности Земли.

Принято считать, что экзогенные процессы, происходящие на Земле, обусловлены главным образом: энергией солнечной радиации, силой тяжести, деятельностью ветра, воды и ледников. Заметную роль играет и внутренняя, эндогенная энергия Земли, из-за влияния которой происходят землетрясения, извергаются вулканы, поднимается и опускается уровень океанов и т.п.

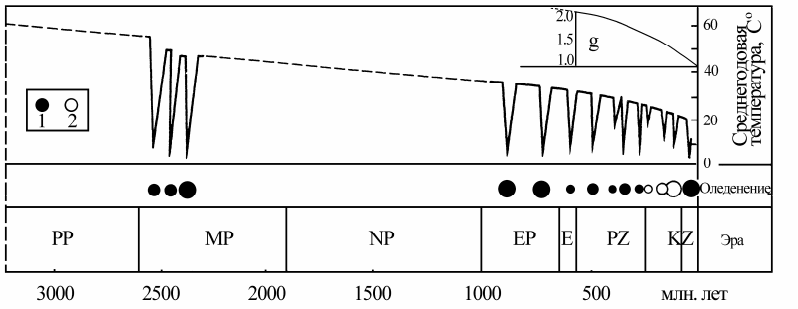


Рис. 4-6. Температура поверхности Земли. В правом верхнем углу зависимость: $g(t)$.

Хорошо известно, что Земля “пережила” несколько оледенений. Следуя В.Н.Саксу (1947), “... нужно отказаться от мысли, что оледенения были чем-то случайным в истории Земли. Особенно обращает на себя внимание то обстоятельство, что крупные оледенения всякий раз следовали за интенсивным проявлением складкообразовательных процессов. Так, четвертичные ледники появились после альпийской складчатости, верхнепалеозойские - после герцинской, протерозойские - после докембрийской. Напротив, эпохи обширных трансгрессий моря, предшествовавшие основным фазам складчатости, характеризовались относительным выравниванием климатов на земной поверхности ...” (с.29-30). Это один из примеров связи pT (давление-температура) параметров на поверхности Земли с внутриземными орогенными процессами. Надо сказать, что в наше время эти взгляды не разделяются большинством специалистов. Так, например, Чумаков (1995) полагает, что климатические изменения имеют ритмический характер, а «главные различия между ледниковыми и безледниковыми интервалами геологической истории заключались в увеличении амплитуд климатических колебаний. Это было связано, по-видимому, с совпадением холодных фаз сверхдлинных, длинных и коротких климатических колебаний, приводивших к возникновению криосферы и увеличению альбедо во время климатических минимумов» (с. 37). Бытующее среди многих геологов мнение, относительно того, что эволюция Земли состоит из сочетания суммы разнофазных колебательных процессов, не согласуется с обсуждаемой на страницах этой книги моделью Земли, как открытой, самоорганизующейся диссипативной системы. Изменение климата и его связь с геомагнитным полем рассмотрено ниже, в разделе VI.

Наиболее важная характеристика климатического процесса – это температура и ход её изменения в развитие этого процесса. Поэтому, несомненный интерес представляет зависимость температуры поверхности Земли от времени её эволюции. Несмотря на то, что многие геологи, так же как Дж. Ферхуген и др. (1974) считают, что “... мы еще очень далеки от действительного понимания термальной истории Земли” (с. 739), такая зависимость для Земли известна. Она построена многими авторами по изотопным соотношениям (кислорода O^{16}/O^{18} и водорода/дейтерия) и восстановленному палеотемпературному градиенту. Среди авторов (см. например, Шульдинер, 1985) имеются небольшие расхождения в величинах температур для одних и тех же периодов эволюции Земли, но общий характер остается примерно одинаковым (см. рис. 4-6). По видимому, есть основания считать, что температура на поверхности Земли примерно 3.8 млрд. лет назад приближалась к 100° С (Океаны кипели! Если не учитывать тот факт, что плотность атмосферы была выше современной). Можно восстановить (Кузнецов, 1990) эту зависимость для ранней Земли, ко времени 4.5 млрд. лет назад. Температура окажется порядка 300 °С (и более). Это, однако, не самая высокая оценка температуры поверхности ранней Земли, например, согласно Р. Геррелсу и Ф. Маккензи (там же, с. 79): “ ... температура на поверхности ранней Земли достигала 600 °С, а давление превышало 360 атмосфер, из которых на долю воды приходилось 300, углекислоты - 45, соляной кислоты

10 атм". Различные авторы попутно неоднократно высказывали идею, согласно которой древняя атмосфера Земли соответствует атмосфере современной Венеры.

Таблица 4.3.

Период	Возраст, млрд. лет	Температура поверх.°С	Атмосферное давление, атм.	Состав атмосферы
Катархей	3.75 - 3.5	100	20	H_2, CO_2, H_2O
Палеопротозой	3.5 - 2.6	70	10 - 20	H_2, CO_2, H_2O
Мезопротозой	2.6 - 1.9	60	-	H_2O, 1% O_2,
Неопротозой	1.9 - 1.0	50	-	Увеличение O_2
Эпипротозой	1.0 - 0.65	40	-	Увеличение O_2
Эокембрий	0.65 - 0.57	35	-	Увеличение O_2
Настоящее время	0	15	1	21% O_2

Наиболее полно данные по *pT* условиям на поверхности ранней Земли (в докембрии) представлены в монографии Салопа (1982). Извлеченные нами из этой книги данные представлены в таблице 4.3. Из этой таблицы, как и из рисунка 4-6, следует, что температура поверхности Земли и её атмосферное давление плавно понижались в течение всего периода эволюции. Менялся химический состав атмосферы: исчез водород, уменьшилась концентрация воды, выросла концентрация кислорода и т.п.

Можно ли найти простую логичную модель, описывающую эволюцию условий на поверхности Земли? Верно ли предположение о том, что *pT* условия ранней Земли адекватны современной Венере? Попытаемся ответить на эти вопросы в контексте нашей модели.

В момент образования вещество Земли имело солнечный состав: в основном, это были водород, кислород, кремний, железо и т.д. Оно, как следует из нашей модели, было нагрето до очень высокой температуры. Зададим температуру поверхности Земли (собственно твердой "поверхности", как таковой, - ещё не было) равной 10^3 К. Эта величина оценивается следующим образом. Температура плазмы вещества Земли в момент образования достигала нескольких электронвольт (1 эВ $\approx 10^4$ К). Радиационное (за счет излучения) охлаждение должно было сравнительно быстро "сбросить" температуру окружающего плазму т.н. обменного слоя, примерно на порядок. Рассмотрим, как происходит охлаждение такого тела за счет излучения. Будем придерживаться канвы рассуждений, изложенной в двух монографиях (Бай Ши-и, 1968; Зельдович и Райзер, 1966).

Потери энергии на излучение *K* равны интегралу по объему от потери энергии *q* элементарного объема в единицу времени. Так как $q = div\ S_o$, то можно записать, используя выражение из книги (Зельдович, Райзер, 1966; с. 143):

$$K = \int q\, dV = \int S_o\, d\Sigma\,, \qquad (4.6)$$

где dV- элемент объема тела, $d\Sigma$- элемент его поверхности, S_o- нормальная составляющая потока излучения на поверхности тела: $S_o = \sigma T^4$, T - температура поверхности тела, σ - постоянная Стефана-Больцмана.

Горячие газы и пары нелетучих веществ, окружающие только что сформировавшуюся Землю можно представить как "оптически толстое тело", размеры которого x гораздо больше длины "пробега" охлаждающего излучения l. Величина l представляет собой характерное расстояние, которое проходит квант излучения без столкновений и рассеяния. Она обратно пропорциональна коэффициенту поглощения излучения χ: $l \sim 1/\chi$. С учетом сказанного, поток излучения $S^* \approx (l/x)\times\sigma T^4$ для "оптически толстого тела" (где: $l/x << 1$) существенно меньше S_o.

Известно, что величина l уменьшается с увеличением температуры. Для воздуха, в приближении Росселанда (Бай Ши-и, 1968, с. 115):

$$1/l = 4.86\ 10^{-7}\ p^{1.31} \times exp\ (4.56\ 10^{-4}\ T). \quad (4.7)$$

Для не слишком высоких температур ($T \approx 10^3$ К), экспоненциальный множитель примерно равен единице, поэтому формулу можно упростить:

$$1/l \approx 5\times10^{-7}\ p^{1.3}\ , \quad (4.8)$$

где l в см, а p в атм. Для современной атмосферы Земли величина l порядка 2×10^6 см, величина x примерно того же порядка, так что l/x ≈ 1 и $S_o = S^*$, однако, это было совсем не так на более ранних этапах эволюции Земли.

Рассмотрим характер радиационного охлаждения поверхности Земли в течение времени её эволюции. Обозначим начальную температуру поверхности в момент времени t_o через T_o. Тепловая энергия Земли E может быть записана так:

$$E = c_V M T_o,$$

где c_V - теплоемкость вещества охлаждаемого слоя Земли, M её масса. Тепловая энергия Земли значительно выше, но так как за счет конечного времени теплопроводности, в охлаждении принимают участие лишь поверхностный слой, подобная оценка правомерна.

Порция энергии ΔE, "уносимой" за счет радиационного охлаждения, определим в соответствии с формулой для S^*:

$$\Delta E \approx (l/x)\times\sigma T^4 s\ t, \quad (4.9)$$

где s - поверхность Земли, а t - интервал времени. В наших оценках принимаем: $t = 0.5\ 10^9$ лет. По прошествии t-лет, температура T_o уменьшится и станет равной T_1, а тепловая энергия Земли станет равной:

$$E_1 = c_V M T_1 = c_V M T_o - (l/x)\times\sigma T_o^4 s\ t, \quad (4.10)$$

или:

$$T_1 = T_o[1 - ((l/x)\times\sigma T_o^3\ s\ t)/c_V M]. \quad (4.11)$$

Таким образом, получаем формулу вида:

$$T_1 = T_o(1 - \alpha T_o^3), \quad (4.12)$$

в которой, как мы выяснили, содержится информация о температуре и плотности атмосферы. Очевидно, что для последующего (второго) интервала времени:

$$T_2 = T_1(1 - \alpha T_1^3) \text{ и т.д.} \quad (4.13)$$

Величина α ($\alpha \sim [T_1 - T_2]\ /T_1^4$) зависит от температуры и текущего значения l, т.к. все остальные величины в формуле α не меняются (при условии, что остается постоянной величина поверхности Земли - s).

Оценим, насколько полученная нами зависимость правдоподобна и соответствует данным по ходу температуры на ранних этапах эволюции Земли, приведенным в таблице. Для этого построим график: lgT - lgt (рисунок 4-7). Рисунок показывает, что в течение 3 млрд. лет (от 0.5 до 3.5) характер охлаждения поверхности Земли не менялся. По-видимому, он был другим в течение первого млрд. лет эволюции Земли, но для его изучения наших данных явно недостаточно. С течением времени, величина α (в рассматриваемом нами диапазоне от 0.5 до 3.5 млрд. лет) незначительно увеличивалась и составляла величину $\alpha = (3 - 5)\ 10^{-10}$ К$^{-3}$. (Наши более ранние оценки (Кузнецов, 1990), соответствовали величине $\alpha = 10^{-9}$ К$^{-3}$). Величина l оказывалась порядка 1 м, что на четыре порядка меньше её современного значения.

Продолжим прямую lgT - lgt в область более низких температур, тогда она пересечет изотерму 15° С в точке, соответствующей примерно 50 млн. лет назад. Температура 15° С, это примерно среднегодовая современная температура поверхности Земли, определяемая величиной инсоляции. Если бы это было действительно так, то вплоть до этого периода времени (50 млн. лет назад) температура поверхности Земли зависела бы только от внутренней, эндогенной причины. По всей видимости, учитывая инерционный характер тепловых процессов, в такой системе не должно происходить оледенений.

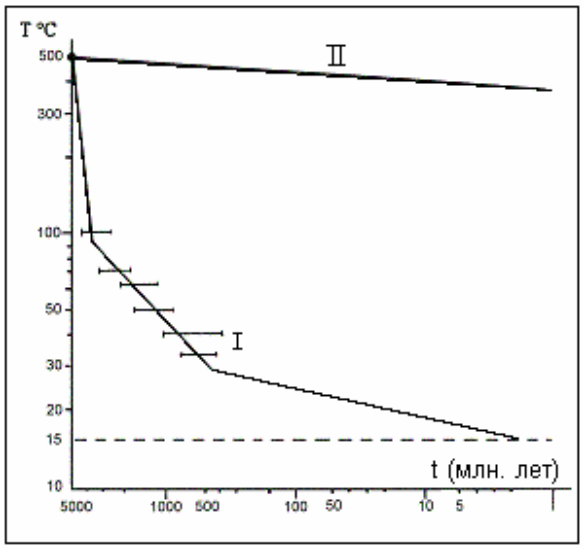


Рис. 4-7. Температура Земли (I) и Венеры (II) в течение времени эволюции.

Оледенения на Земле были, это общепризнанный факт. Поэтому, такое продолжение температуры в область времени, меньше чем 500 млн. лет назад, неправомерно. По-видимому, примерно 400-500 млн. лет на Земле произошло изменение режима её эволюции. По нашей модели, - начался период интенсивного расширения. Этот факт мог бы объяснить резкое увеличение α, например, за счет возрастания площади поверхности Земли и т.п.

Здесь уместно отвлечься и сказать несколько слов о причине оледенений, и их связи с внутренними, эндогенными процессами, о которых писал Сакс. Период (этап) расширения Земли (согласно нашей модели) связан с резкой интенсификацией её вулканической и горообразовательной деятельности. В такой период времени, в атмосферу Земли выбрасывается огромное количество пепла, который, надолго оставаясь в атмосфере, экранирует от Земли солнечное тепло. Если при этом температура поверхности Земли определялась солнечным теплом (как сейчас), а не внутриземным тепловым потоком (который в настоящее время намного меньше, чем поток тепла от Солнца), то её охлаждение поверхности в периоды экранировки и оледенения очевидны. Если в истории Земли происходили оледенения в рассматриваемый нами период (от 0.5 до 3.5 млрд. лет назад), то наша модель охлаждения была бы верна при одном условии: уровень инсоляции в те далекие времена был значительно выше современного, или иначе, Солнце было значительно “горячее”, чем сейчас.

Вернемся к нашим оценкам. Полученное нами значение параметра α позволяет, в приближении Росселанда, оценить температуру поверхности и величину атмосферного давления. Эти величины (Кузнецов, 1990) оказались равными: температура $T \approx 800$ К, а давление $p \approx 10^3$ атм. Заметим, что эти оценки носят грубый, ориентировочный характер, однако, тем не менее, они (по смыслу) совпадают с данными, полученными геологами для pT-условий ранней Земли.

Как ответить на вопрос: соответствует ли современная “обстановка” на Венере обстановке на поверхности молодой Земли? Предположим, что Венера была изначально нагрета сильнее, чем Земля. Допустим, что относительный перегрев составлял, например, 100° С. Допустим так же, что толщина атмосферы Венеры изначально была больше земной примерно в два раза, а начальное давление, в три раза выше. Всё это может привести к тому, что величина коэффициента α атмосферы Венеры окажется меньше чем у Земли примерно на порядок. Для оценок, примем для начальной атмосферы Венеры:

α = 3 10^{-11} K^{-3}. При этом характер изменения температуры поверхности меняется существенным образом (см. рис. 4-7). Вполне возможно, что незначительные изменения начальных условий на поверхности Венеры, относительно условий на Земле, привели к тому, что Венера остывала (и продолжает остывать) более медленно, чем Земля.

Уровень океанов и цикличность эволюции. Как изменялся "лик" нашей планеты в течение 4.5 млрд. лет её эволюции? Иначе, всегда ли Земля выглядела так, как сейчас? На эти, казалось бы, очевидные вопросы, науки о Земле не дают четкого, однозначного ответа. Сегодня принято считать, что "на Земле раньше было так же, как сейчас" (принцип актуализма). Различия состояли лишь в том, что материки, то объединялись в единый, громадный материк, то разъединялись, "расползаясь" по своим местам, и затем объединялись вновь. В зонах спрединга "производилась лента конвейера", с помощью которой материки "плавали как корабли по океану", а в зонах субдукции, эта лента затягивалась в мантию, чтобы вновь выйти на поверхность в зонах спрединга. Известно, что материки, это древние, как правило, гранитные образования. Это известно давно. Однако еще в первой половине нашего века было принято считать, что дно океанов столь же древнее образование. Сенсацией прошлого века в науках о Земле, было открытие факта наличия на дне всех океанов очень молодых базальтовых пород, срединно-океанических хребтов (зон спрединга) и, собственно, движения, дрейфа материков. Это открытие "родило" т.н. тектонику плит, которая сразу и безоговорочно заняла главенствующие позиции в геологии. Основным, бесспорным достижением (я бы назвал это даже открытием) плитной тектоники считается то, что Земля в настоящее время динамично развивается. Другое дело, спорить о причинах и следствиях геодинамики, о физике процессов дрейфа и, собственно, о физике Земли. Здесь же споров практически не было: факт наличия динамики необходимо было объяснить в рамках принятой модели холодной Земли.

Обратимся к фактам, объяснение которых породило плитную тектонику. Как мы уже отмечали, все началось с изучения дна океанов. (Заметим, что океаны составляют 2/3 поверхности Земли и в значительной степени определяют "лик" нашей планеты). Факты и гипотезы об океанах наиболее обстоятельно и убедительно изложены в книге Е.М. Рудича (1984), который показывает, что объем мирового океана значительно увеличился в течение последних 160 млн. лет (рис. 1-10). Эти данные получены на основании анализа результатов глубоководного бурения (более 500 скважин пробуренных при выполнении почти 70 рейсов судна "Гломар Челленджер") акватории Мирового океана; исследования разрезов, вскрытых океаническим бурением, и анализа глубины и условий накопления океанических осадков.

Изучение акватории Мирового океана показало, что общие черты имеются у всех океанов Земли и, тем не менее, есть различия между ними. Многие геологи отмечают различия между океанами тихоокеанического типа и атлантического. К общим особенностям можно отнести: одинаковый возраст (160 млн. лет), наличие зон полосовых магнитных аномалий и зон т.н. спокойного поля. Основное различие между океанами состоит в том, что атлантический тип (который присутствует и на Тихом океане) связан с расширением и разрастанием океанического дна через срединно-океанический хребет (СОХ). В этом случае полосовые магнитные аномалии параллельны друг другу, а разрыв океанической коры в районе СОХ произошел тогда, когда кора не могла растягиваться, как это имело место в Тихом океане, а была в достаточной степени прочна и консолидирована (Кузнецов, 1990). Растяжение океанической коры в тихоокеаническом варианте сопровождается совершенно другой структурой полосовых магнитных аномалий. На Луне, как и на Земле, можно выделить базальтовые «моря» атлантического и тихоокеанического типов (Макаренко, 1983). Автор, анализируя геодинамические структуры Земли и Луны, приходит к важным для нашей модели выводам. Во-первых,

развитие Земли и Луны происходит под действием одних и тех же глубинных, эндогенных сил, и, во-вторых, Луна, есть не что иное, как упрощенная модель Земли.

Расчеты, приведенные в книге Рудича, показывают, что за последние 160 млн. лет объем впадины Мирового океана увеличился весьма значительно: по максимальной оценке, - на 580 млн. км^3. При средней глубине современных океанов порядка 4-х км, это соответствует примерно 1/3 площади поверхности современной Земли. За последние 160 млн. лет эволюции Земли её радиус увеличился от ≈ 0.77*R,* - до его современного значения. Резкое увеличение впадины океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Он обращает внимание на то, что " ... с позиций мобилистских концепций невозможно объяснить крупное приращение объема Мирового океана. ... мобилистские гипотезы исключают возможность заметного изменения объема Мирового океана в течение последних 160 млн. лет" (Рудич, 1984, с.232).

Совсем не так "воспринимает" этот факт наша модель, согласно которой большая часть мантии была образована на Земле именно в течение этих 160 млн. лет (см. рис. 4-1). Если учесть, что в базальтах экспериментально обнаружено наличие воды в количестве ≈ 0.1%, а так же учесть, что масса воды Мирового океана так же составляет примерно 0.1 % от массы мантии, то этот факт может служить еще одним подтверждением правомерности нашей модели горячей Земли.

Можно ли доверять таким данным, которые показывают резкое увеличение объема океанов, начавшееся 160 млн. лет назад? Выяснению этого вопроса посвящена статья Стейнера (Steiner, 1977), в которой автор приводит данные по скорости увеличения площади поверхности океанов: Тихого, Атлантического и Индийского. Данные получены на основании изучения полосовых магнитных аномалий. Площадь Тихого океана начала резко увеличиваться 165 млн. лет назад (см. рис. 1-10), одновременно, но с меньшей интенсивностью, стала возрастать площадь северной части Атлантического океана. Чуть позже, 135 млн. лет назад в процесс роста океанов "включился" Индийский океан и южная часть Атлантики. Суммарная скорость роста площади трех океанов составляет, по верхней оценке Стейнера, примерно 3000 км^2 за тысячу лет, в течение 165 млн. лет их развития. Если подсчитать площадь образовавшихся океанов, то окажется (по верхней оценке), что за это время их площадь примерно равна площади поверхности Земли (5×10^8 км^2). Учитывая неточности и то, что мы использовали верхнюю оценку, эту величину можно уменьшить вдвое, но все равно оказывается, что практически все океаны Земли образовались в течение последних 160 млн. лет. Стейнер не приводит таких очевидных оценок, он допускает, что радиус Земли увеличился за это время, но ограничивает это увеличение примерно 12%. Оставшаяся часть площади увеличившихся океанов должна быть, по мнению Стейнера, "поглощена" субдукцией, интенсивность которой, как следует, тоже должна возрастать по мере роста площади океанов.

В течение последних 135-165 млн. лет скорость спрединга, по Стейнеру, постоянно возрастала вплоть до наших дней. За последние 5 млн. лет средняя скорость спрединга для Тихого океана составляла 9.6 см/год, для Индийского океана - 7.6 см/год и для Атлантического - 4.3 см/год.

Современные океаны возникали, расширялись и "раздвигали" материки, которые, судя по всему, 160 млн. лет тому назад были значительно ближе друг к другу. Рисунок 1-10 (Courtillot, Besse, 1987) демонстрирует это, показывая, что раньше других (160 млн. лет) Африка отделилась от Северной Америки, затем (150 млн. лет) - от Африки отделился Мадагаскар. Позже (135 млн. лет) Африка разделилась с Южной Америкой и т.д. Разрывы проматерика на современные его части, и их раздвижение объясняется в рамках модели холодной Земли и тектоники плит наличием мантийной конвекции. Обсуждаемый нами парадокс, связанный с быстрым увеличением объемов воды Мирового

океана, вообще не рассматривается, т.к. не может быть объяснен этими моделями. Однако никакая мантийная конвекция не способна найти объяснение раздвижению материков на сфере с современным радиусом. Об этом ещё тридцать лет тому назад писал Р. Мезервей (Meservey, 1969). Он обратил внимание на расположение материков вдоль "берега" Тихого океана. Южная Америка, Северная Америка, Азия, Австралия и Антарктида никогда не находились на расстояниях, больших, чем современные (см. рис. 1-9). Это верно, по крайней мере, в течение последних 160 млн. лет. Иначе, периметр Тихого океана в течение этого промежутка времени никогда не был больше современного. Об этом свидетельствует и рис. 1-10, где показано, что Австралия и Антарктида "расстались" всего 50 млн. лет назад, Южная Америка - с Антарктидой "совсем недавно", а Южная и Северная Америки и Азия, - так и "не расставались". Если сохранять условие постоянства (или очень небольшого увеличения) периметра Тихого океана, то каким же образом, спрашивает Мезервей, можно соединить Африку с Южной Америкой, которые разъединились друг с другом примерно 135 млн. лет назад? Ответа нет на этот, надо сказать, очень простой вопрос. Его нет, и не может быть, - в рамках плитной тектоники в том упрощенном виде, как её преподают в школах и университетах.

Несмотря на, казалось бы, убедительные факты, далеко не все геологи разделяют точку зрения, согласно которой океаны в основном сформировались на Земле лишь в "последние" 160 млн. лет. Тем не менее, никто из них не отрицает факта бурного роста океанической коры и увеличение объема воды Мирового океана именно в этот период эволюции Земли. Здесь многих привлекает период, о котором мы уже говорили, продолжавшийся с 120 млн. назад до 80 млн. лет. В течение этого периода не было инверсий, это так называемый период спокойного магнитного поля, или, его называют ещё, - меловой суперхрон. Принято считать, что в этот период Земля изменила характер эволюции и вместо спрединга океанической коры, наращиваемой посредством "работы" СОХ, она увеличивала объем путем генерации плюмов (Larson, 1991; Fuller, Weeks, 1992). Авторы этих и большого количества подобных публикаций, сопоставляют период спокойного магнитного поля с периодом интенсификации образования плюмов. Некоторые авторы (Larson, 1991), показывают в своих работах, что характер эволюции Земли в эти периоды (суперхроны - суперплюмы) резко отличался как от периодов предыдущих, так и последующих. В частности считается, что именно в эти периоды на Земле были образованы основные запасы нефти и других углеводородных полезных ископаемых. Разработка модели горячей Земли из проблемы фундаментальной может перерасти в проблему прикладную, если удастся понять, что реально происходило на Земле в эти периоды её эволюции. Надо заметить, что меловой суперхрон, - не единственный в истории магнитного поля Земли период т.н. "спокойного поля". Известен юрский суперхрон и другие, более ранние периоды. (Обратим внимание на то, что отмечаемые нами здесь корреляции не находят объяснения в рамках модели холодной Земли).

Не менее удивительны и другие синхронные проявления активности Мирового океана, атмосферы и климата: эти корреляции известны геологам как трансгрессии и регрессии. Например, Мёрнер (1986) исследовал несколько катастрофических событий, одно из которых произошло на Земле на рубеже эоцена и олигоцена (рис. 4-8), когда наблюдалось крупное похолодание, падение уровня моря и уменьшение разнообразия форм фауны. Ряд подобных катастрофических событий случились на Земле сравнительно "недавно", в период времени, называемый палемагнитологами эпохой Брюнеса. Выделяются несколько событий, причем последнее из них - Гетеборг (Палеомагнитология, 1982; Мёрнер, 1986). Это событие происходило от 20 до 12 тыс. лет тому назад. Событие Гетеборг выделено в истории геомагнитного поля как экскурс. Это событие, как и ряд подобных (рис. 4-8), предшествующих, характеризуется рядом признаков:

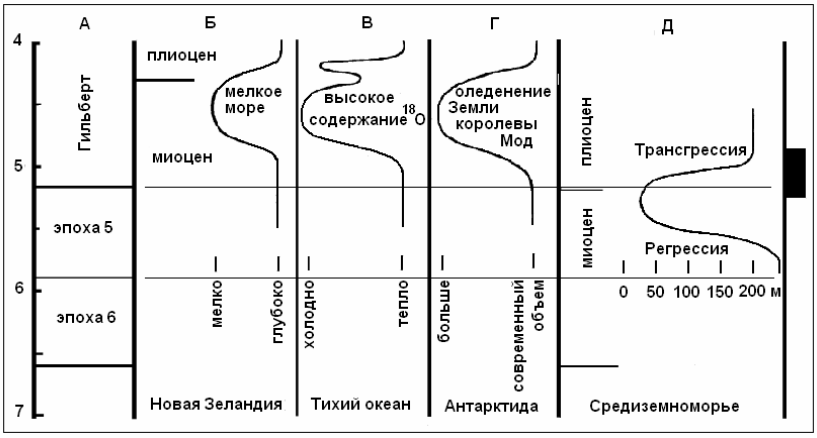


Рис. 4-8. Событие на границе миоцена и плиоцена (Мёрнер, 1986).

- аномально высокое изменение уровня моря на 200 - 240 м, с последующим его подъемом;
- понижение температуры и наступление ледников в Северной Америке и севере Европы и последующее резкое их таяние;
- резкое увеличение вулканической деятельности и последующее её прекращение.

Заметим, что событие Гетеборг - единственное, которое произошло на памяти цивилизованного человека, так как все предыдущие “пришлись” на малоцивилизованное человечество и не остались в его памяти. Мёрнер считает, что событие Блейк, например, характерно тем, что сведения об изменении уровня моря противоречивы, а именно - 70-метровая регрессия на Новой Гвинее и 50-метровая трансгрессия на Гавайях; четких данных об оледенениях нет, хотя изменения параметров Миланковича зафиксированы и т.п. Наиболее полно в этом плане исследовано событие, которое имело место при смене эпохи 5 на эпоху Гильберт (см. рис. 4-8). При этом полярность геомагнитного поля, как и в предыдущих случаях, изменялась от современной (N) - к противоположной (R). Это событие сопровождалось:
- сменой миоцена на плиоцен;
- регрессией и следующей за ней трансгрессией на Средиземноморье;
- оледенением Антарктиды;
- регрессией и трансгрессией в Новой Зеландии.

Мёрнер связывает возможную причину наблюдаемых событий с процессами, происходящими в глубоких горизонтах Земли, возможно, на границе ядро-мантия. Такие события, по мнению Мёрнера, приводят к изменению формы геоида, что, в конечном счете, вызывает изменение уровня Мирового океана, регрессии и трансгрессии.

Итак, на Земле происходили глобальные катастрофические явления: массовые вымирания, оледенения, потопы, периоды интенсивного вулканизма, магматизма и сейсмичности сменялись периодами спокойного развития планеты. Некоторые из этих явлений наблюдаются и в наше время, хотя и заметно меньшего, чем раньше, масштаба. Модель горячей Земли находит непротиворечивое объяснение этим явлениям. По своей физике, наша модель базируется на функционировании фазовых переходов первого рода, которые, по определению, имеют “катастрофические” решения (Кузнецов, 1992).

Разработка модели горячей Земли из проблемы фундаментальной может перерасти в проблему прикладную, если удастся понять, что реально происходило на Земле в эти периоды её эволюции и, например, в частности, в чем состоял механизм образования нефти и газа. Надо заметить, что меловой суперхрон, - не единственный в истории магнитного поля Земли период т.н. “спокойного поля”. Известен юрский суперхрон произошедший в период 250 - 165 млн. лет, который так же как меловой имел современную полярность геомагнитного поля. Поле каменноугольного суперхрона (320 –

250), предыдущего юрскому суперхрону, – имело отрицательную полярность (Харленд, 1985). Периоды суперплюмов перемежались частыми инверсиями геомагнитного поля.

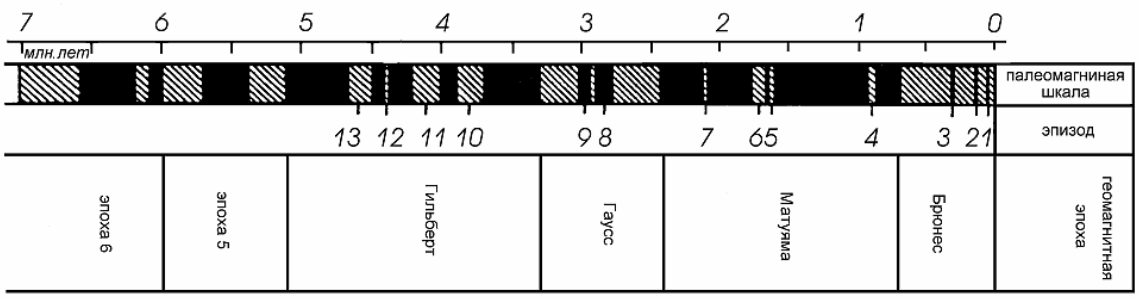


Рис. 4-9. Магнитохронологическая шкала за последние 7 млн. лет.

Обратим внимание на рис. 4-1 откуда следует, что, к примеру, 200 млн. лет тому назад объем океанов Mo составлял примерно 0.35 от объема современных океанов (Mo = 0.35M, что подкрепляется данными Рудича), а земной радиус (по модели) составлял 0.7R от современного радиуса Земли. Средняя глубина современных океанов h, которые занимают 2/3 (0.66) поверхности Земли S, равна 4 км = $M/S = M/0.66R^2$ (опуская 4π). Массу современного океана можно выразить следующим образом: M = 0.66 hR^2, тогда масса палеоокеана (200 млн.лет) Mo = 0.35 0.66 hR^2. Радиус Земли 200 млн. лет тому назад Ro = 0.7 R, а площадь So = $S \approx 0.5\ R^2$. Положим, что площадь материков остается без изменения в процессе эволюции Земли и она равна: Smat = 1/3 R^2. Площадь поверхности океанов 200 млн. лет тому назад можно выразить: Sok = 0.5 R^2 – 0.3 R^2 = 0.2 R^2. Тогда глубина древних океанов может быть оценена: ho = hMo/0.2 R^2 = 0.35·0.66 h/0.2 ≈ h. Приведенная оценка показывает, что если считать, что уровень океана определяется его глубиной h, то, согласно нашей модели, уровень океана остается практически неизменным в ходе эволюции Земли, что и требовалось доказать.

Наша модель позволяет оценить величину h на начальном этапе эволюции Земли. Обратимся ещё раз к рис. 4-1-*б*, откуда следует, что 4 млрд. лет тому назад толщина мантии составляла всего 300 км, а радиус Земли, соответственно, 0.6 R, Sok = 0.36 R^2 – 0.3R^2 = 0.06 R^2. Масса океана не превышала 0.1 M; ho = hMo/0.06 R^2 = 1.6 h (6.5 км!). По-видимому, эта оценка не верна, т.к. трудно представить, что мог образоваться такой глубокий океан, в то время как все материки были сушей. Поделим массу палеоокеана (4 млрд. лет) на всю поверхность Земли 0.36 R^2, тогда ho = hMo/0.36 R^2 = 0.28 h, или примерно 1 км. Таким образом, из модели горячей Земли следует, что *большая часть материков находилась под водой*, что соответствует геологическим данным.

Регрессии – трансгрессии - складчатость – вулканизм – оледенения. Рассмотрим последовательную во времени цепь этих явлений, для чего воспользуемся основными понятиями и терминами модели горячей Земли. В этом плане, регрессия, т.е. уменьшение уровня океана, происходит в момент цикла расширения, когда радиус Земли увеличивается и, соответственно, возрастает площадь поверхности Земли и объем мантии. В течение этого времени вода, масса которой увеличивается при росте мантии, еще существует в области формирования мантии и требуется некоторое время для транспортировки воды на поверхность Земли. За циклом регрессии, по этой модели, сразу следует цикл трансгрессии, который можно разбить на два связанных друг с другом этапа. В течение первого, как отмечалось, происходит транспортировка воды от ядра через астеносферную зону СОХ к поверхности Земли. После цикла расширения, следует цикл сжатия Земли, поэтому, во время второго этапа происходит увеличение количества воды в океане в связи с уменьшением площади поверхности Земли. По времени, эти процессы трудно отделимы друг от друга. Например, в настоящее время на Земле продолжается цикл сжатия – регрессии, однако поступление т.н. ювенильной воды в океане –

продолжается. В цикле сжатия на Земле возрастает складчатость земной коры. При этом происходит рост гор, увеличение интенсивности вулканических извержений, что, в свою очередь, приводит к выбросу в стратосферу вулканической пыли, вызывающей похолодания и оледенения.

Рассмотрим одну из возможных и наиболее вероятных причин, почему в момент трансгрессии уровень океана довольно часто повышается именно до того уровня, который существовал до начала регрессии. Обозначим: высоту регрессии - h_R , трансгрессии - h_T. Оценим отношение этих величин в цикле сжатие-расширение, учитывая, что из наблюдений: $h_R \approx h_T$. Обозначим: приращение радиуса Земли в цикле расширения - $\triangle R$, увеличение площади поверхности Земли - $\triangle S$, увеличение массы океанов - $\triangle M_o = k\triangle M_M$, где M_M - масса мантии, а коэффициент k, показывающий содержание воды в базальте, $\approx 10^{-3}$. Здесь формально, для оценок, принято, что мантия состоит из базальта.

- На первом этапе в момент расширения масса океанов остается неизменной: M_o – const, уровень океанов $h_o = M_o/S_o$. Площадь поверхности океанов, равная примерно 2/3 поверхности Земли, равна $S_o \approx 4R^2$; поверхность Земли возрастает в цикле расширения (увеличения радиуса на $\triangle R$): $S_R = 4(R^2 + 2R\triangle R)$; отсюда высота регрессии: $h_R \approx M_o/4R^2 - M_o/4(R^2 + 2R\triangle R) = M_o/4\ (1/R^2 - 1/R^2 + 2R\triangle R) \approx M_o/4 \cdot 2\triangle R/R^3 = h_o \cdot 2\triangle R/R$.
- Высоту трансгрессии оценим из очевидного соотношения, показывающего рост мантии в цикле расширения: $\triangle M_M = \triangle R S_o$. Увеличение массы океанов $\triangle M_o = k\triangle R S_o = S_o h_T$, отсюда: $h_T = k \triangle R$.
- Полагая $h_R \approx h_T$, получаем: $h_o \cdot 2\triangle R/R \approx k \triangle R$, или: $k \approx 2 h_o /R \approx 10^{-3}$.
- Учтем эффекты, возникающие при сжатии Земли, последующей за циклом расширения. Сжатие приводит к некоторому уменьшению величины $\triangle R$, поэтому сокращать эти величины в равенстве: $h_R \approx h_T$ не совсем корректно. Оценим величину эффекта сжатия, для чего перепишем формулы относительно $\triangle R$, обозначим: $\triangle R_1$ - растяжения и $\triangle R_2$ - сжатия: $\triangle R_1 = h_R /h_o \cdot R/2$ и $\triangle R_2 = h_T / k$. Их отношение: $\triangle R_1/\triangle R_2 = h_R /h_T \cdot R/2h_o\ k$ определяется тем, как «отслеживает» глубина океанов - увеличение радиуса Земли. Заметим, что это очень незначительные поправки, находящиеся в пределах точности измерения эффектов трансгрессии и регрессии и самого уровня океана.
- Полученная оценка подтверждает вывод Рудича относительно того, что резкое увеличение впадины океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Это означает, что правило $h_R \approx h_T$, подтверждается не только на единичных циклах, но справедливо и в целом по Земле.
- Нами не учитывалось изменение формы геоида, которое вносит свой вклад в величину трансгрессии и регрессии. Развиваемый подход дает такую возможность, т.к. именно возмущение геоида в момент цикла расширения – сжатия в последующем компенсируется «течением» верхнего слоя земной коры и мантии, регистрируемое как дрейф плит (Кузнецов, 2005).

Увеличение массы мантии и объема океанов в течение времени эволюции можно считать глобальной трансгрессией, причем, как отмечал Рудич, резкое увеличение впадины океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Это свидетельствует не только о том, как считал Рудич, что увеличение впадины океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Этот факт свидетельствует так же и о том, что масса океанов ($M_o \sim Sh_o$) увеличивалась синхронно с увеличением объема Земли ($M \sim SR$), а так как $R \approx 2 h_o /k$, то и $M \sim 2Sh_o/k$ - за счет образования и роста мантии, как это следует из модели горячей Земли. Эта оценка ещё раз объясняет, почему в процессе эволюции Земли, связанной с очевидным ростом объема океана, - береговая линия менялась незначительно.

Выясним возможную причину роли обширных трансгрессий моря, предшествовавших основным фазам складчатости, в выравнивании климатов на земной поверхности. Учтем, что согласно модели горячей Земли смена регрессии на трансгрессию является следствием смены режима фазового перехода, что, как будет показано ниже, является причиной смены полярности геомагнитного поля – инверсиям и экскурсам. В периоды инверсий и экскурсов Земля оказывается без магнитного поля и подвергается повышенной радиации космическими лучами. Если до этого события в стратосфере существовал пылевой слой, экранирующий Землю от Солнца, и, следовательно, Земля находилась в стадии оледенения, то повышенная радиация приводит к разрушению слоя пыли, потеплению и выравниванию температуры поверхности Земли. Если до инверсии на Земле ярко светило Солнце, определяя различия в температуре поверхности, то в момент инверсии радиация приводит к увеличению концентрации водного аэрозоля, что несколько охлаждает поверхность Земли, что так же как в первом случае – выравнивает температуру.

Периоды частых инверсий геомагнитного поля сменялись периодами, в течение которых поле своей полярности не меняло. Если частота инверсий составляла несколько инверсий в 1 млн. лет, то период времени без инверсий составлял около 40 млн. лет (рис. 2-б). Этот период эволюции носит название «меловой суперхрон». Считается, что ему свойственно увеличение частоты и интенсивности т.н. «суперплюмов». Согласно модели горячей Земли, в моменты суперхронов происходит перестройка конвективной системы в ядре Земли (Кузнецов, 1998-а, 1998-б), при этом режим устойчивого конвективного охлаждения внутреннего ядра сменяется режимом неустойчивой турбулентной конвекции. Он характеризуется тем, что возникают локальные перегревы поверхности внутреннего ядра, которые вызывают образование локальных, конвективных каналов, по которым происходит тепло и массоперенос от границы внутреннего ядра до границы ядро-мантия и далее, до поверхности Земли. Эти локальные переносы и называются плюмами. Они характеризуются, как отмечалось, повышенным тепло и массопереносом. Причем, каждый плюм представляет собой локальное явление, происходящее в «своё время» и в «своём месте» на земной поверхности. Если локальный перегрев происходит и во время периода инверсий, то и тут может возникнуть и развиться плюм. Локальный плюм таким же образом, будет сопровождаться регрессией и трансгрессией, но не в целом по Земле, а будет приурочен «своему региону». В океане это т.н. зоны «спокойного поля». Возникновение суперплюмов, т.е. одновременно большого количества интенсивных, локальных плюмов, может вызвать на Земле значительные перемены, в то время как геомагнитное поле остается «спокойным». Эту, парадоксальную на первый взгляд, ситуацию комментирует Д.М Печерский (2003). Он задает вопрос, «почему именно во время наиболее стабильного спокойного состояния геомагнитного поля, а не во время вспышек высокой активности в ядре, приводящей к частым сменам полярности геомагнитного поля, происходят столь бурные процессы на поверхности Земли». Общепринятая модель Земли не дает ответа на этот и другие, рассматриваемые нами вопросы.

Таким образом, модель горячей Земли находит простое и очевидное объяснение рассматриваемым нами явлениям и их взаимосвязям, в том числе и явлению роста океана в течение последних 200 млн. лет. Находят непротиворечивое объяснение такие явления как регрессии и трансгрессии и их периодичность, определяемая функционированием фазовых переходов на границах земного ядра, а так же режимом конвекции в ядре и мантии.

4. 6. Упругие свойства вещества внутреннего ядра.

Модули упругости железа и вещества внутреннего ядра Земли. Принято считать, что ядро Земли железное, внутреннее ядро - в кристаллическом состоянии, внешнее – в виде

расплава. Этот тезис практически не подвергается сомнению, в то время как многочисленные экспериментальные факты не могут быть использованы в поддержку этого мнения. Считается, что знание упругости и реологии железа при давлении характерном для ядра Земли очень важно для понимания сейсмологических наблюдений, таких как малое затухание сейсмических волн, малые величины скоростей сдвиговых волн и анизотропия скорости распространения волн сжатия. Многочисленные группы геофизиков экспериментаторов и теоретиков получили значительное количество новых данных по реологии железа и, тем не менее, до сих пор остается не совсем ясным, как устроена Земля и её ядро, в частности.

Считается, что радиус внутреннего ядра увеличивается в течение времени эволюции Земли путем кристаллизации из расплава железа в виде гексагонального монокристалла. Внешнее ядро при этом остается маловязким, жидким и хорошо проводящим субстратом, обеспечивающим возможность гидродинамических течений вполне определенной, заданной конфигурации, необходимых для генерации геомагнитного поля. Следует добавить, что Земля обменивается с космосом энергией и веществом и поэтому её можно считать открытой системой. Земля генерирует тепловой поток, а так же ей свойственно наличие таких процессов как движение материков, вулканизм и сейсмичность, что всё вместе говорит о её диссипативном характере. Эти, казалось бы, очевидные каноны, тем не менее, содержат весьма значительные внутренние противоречия, которые мы попытаемся вскрыть при тщательном анализе известных, опубликованных данных.

В последнее время появились работы, в которых рассматривались реология, модули упругости и вязкость железа при давлении и температуре, свойственным ядру Земли (Boehler, 2000; Brown, McQueen, 1986; Зельдович и др., 1995; Mao et al., 1998; Steine-Neumann et al., 2001). С другой стороны, сравнительно недавно определена скорость сдвиговых волн, проходящих через внутреннее ядро (Кузнецов, 1997). По выражению Тромпа: обнаружен «святой Грааль» сейсмологии. Этим фактом доказано, что внутреннее ядро является твердым. Обнаруженная анизотропия внутреннего ядра истолкована так, что оно, возможно, представляет собой гексагональную структуру. Проведем сравнение между собой упругих модулей железа и вещества внутреннего ядра Земли, приведенных в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Модули упругости (GPa) и коэффициент Пуассона железа (при высоком давлении и температуре) и внутреннего ядра Земли.

	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}	C_{66}	K	μ	σ	
1	1697	809	757	1799	421	444	1085	445	0.28	Mao et al., 1998
2	2130	2010	925	1470	140	60	1425	145	0.45	Steine-Neumann
3	1630	1284		1660	150	173	1400	170	0.44	наши оценки

В первой строке таблицы 4.4 приведены величины модулей железа (Mao et al., 1998) измеренные при давлении 211 ГПа и плотности железа $\rho = 12.8$ г/см^3. В этой работе применялись статические и динамические методы для определения плотности и объемного модуля гексагонально (h.c.p.) упакованного железа при давлениях от 16 до 220 ГПа. Авторы использовали широкий набор экспериментальных методов, включая дифракцию рентгеновских лучей и сверхзвуковые методы. На одном кристалле определялись: модуль сдвига, тензор упругости, скорости волн сжатия и волн сдвига, и анизотропию этих скоростей в железе. Обнаружено, что скорость сдвиговых волн в железе значительно выше, чем во внутреннем ядре: $V_S = 5.9$ км/с в железе против $V_S = 3.65$ км/с во внутреннем ядре (см. рис. 1-11). Авторы наблюдали в железных образцах сильную решеточную анизотропию напряжения. Коэффициент Пуассона определен по величинам V_P и V_S.

Во второй строке Таблицы приведены рассчитанные упругие модули для h.c.p. железа при ρ = 13 г/см^3 и температуре T = 6000 К (Steine-Neumann et al., 2001). Авторы вычисляли энергию Гельмгольца гексагональной решетки в изотермическом приближении и оценивали величины изотермических, упругих модулей. Затем, для оценки величин K и μ, эти модули преобразовывались в адиабатические постоянные. Оценка авторами коэффициента Пуассона σ (при T = 5700 К) показала хорошее совпадение с величиной этого параметра, принятой для вещества внутреннего ядра.

В третьей строке Таблицы 4.3 приведены оцененные нами модули упругости вещества внутреннего ядра. Здесь принято, что скорость Р-волн, равная 11.2 км/с соответствует: V_P" = $(C_{11}/\rho)^{1/2}$. Учитывая анизотропию внутреннего ядра, состоящую в том, что скорость Р-волн, проходящих вдоль оси вращения (обозначим их V_P') примерно на 1 – 2 % больше, чем скорость волн, проходящих в экваториальной плоскости (V_P"), примем: V_P' = 11.3 км/с. Скорость сдвиговых S-волн, проходящих через внутреннее ядро в экваториальной плоскости, равна V_S" = 3.65 км/с (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Положим, что величина коэффициента Пуассона (σ) во внутреннем ядре анизотропией не обладает, тогда, полагая, что σ = 0.44, величина скорости V_S' = 3.7 км/с. Принимая плотность внутреннего ядра $\rho \approx$ 13 г/см^3, получаем величины модулей упругости внутреннего ядра, приведенные на третьей строчке таблицы 4.4. В этой строке пропущено значение модуля C_{13}. Оценить его величину можно было бы по формуле (Steine-Neumann et al., 1999):

$$1/\beta = K = [(C_{33}\,(C_{11} + C_{12}) - 2C^2{}_{13}\,]/C_S, \qquad (4.14)$$

где $C_S = C_{11} + C_{12} + 2C_{33} - 4C_{13}$. Однако определение нами величины модуля K по этой формуле (в качестве её проверки), дает величину K для данных (Mao et al., 1998): K = 690, вместо 1085, и для данных (Steine-Neumann et al., 2001): K = 900, вместо 1425. По-видимому, этой формулой пользоваться не стоит. Тем не менее, если, к примеру, знать точные величины всех упругих модулей, можно было бы, в принципе, определить отношение c/a (Steine-Neumann et al., 1999) гексагональной решетки внутреннего ядра. Зная величины модулей упругости, можно сравнить параметры анизотропии для всех трех случаев, представленных в таблице 4.4.

Параметр анизотропии волн сжатия (Steine-Neumann et al., 1999) $\Delta_P = C_{33}/C_{11}$: в экспериментах (Mao et al., 1998) Δ_P = 1.06; при расчетах (Steine-Neumann et al., 2001) Δ_P = 0.69; во внутреннем ядре, как следует из измерений скоростей Р-волн, Δ_P = 1.02. Аналогичный параметр для сдвиговых волн - $\Delta_S = C_{44}/C_{66}$. В первом случае Δ_S = 0.94, во втором - Δ_S = 2.3 и в третьем (во внутреннем ядре) - Δ_S = 0.87.

Анализируя данные по величинам модулей упругости приведенным в таблице 4.4, можно уверенно утверждать, что: 1) измеренные модули упругости для гексагонального железа при давлении до 211 ГПа, модули оцененные теоретически для того же железа при температуре 6000 К и упругие модули, оцененные по скоростям Р- и S-волн во внутреннем ядре, не совпадают; 2) во всех рассмотренных случаях не совпадают и параметры анизотропии модулей упругости; 3) по-видимому, совпадение коэффициентов Пуассона во втором и третьем, случаях является следствием того, что в расчетах (Steine-Neumann et al., 2001) железо находилось почти в расплавленном состоянии, а, как известно, коэффициент Пуассона при плавлении: $\sigma \rightarrow$ 0.5. Поэтому, подбирая соответствующую температуру твердого тела, всегда можно получить желаемую величину коэффициента Пуассона.

Известно, что скорость Р-волн во внутреннем ядре практически вдоль радиуса не меняется, оставаясь равной 11.2 км/с, величина давления при этом, изменяется от 320 до 360 ГПа. С другой стороны, известно, что скорость Р-волн в железе, в этом диапазоне давлений, - измерена (Mao et al., 1998). Здесь же показано, что скорость V_P, возрастает на $\Delta V_P \approx$ 1 км/с при изменении давления от 320 до 360 ГПа. Если бы внутреннее ядро Земли действительно состояло из кристаллического железа, то скорость V_P, по мере

продвижения от границы ядра к центру Земли, должна возрасти до величины ≈ 12.2 км/с. Этот факт так же ставит под сомнение тезис относительно наличия кристаллического железа во внутреннем ядре.

Анализ данных, приведенных в Таблице 4.4, дает основание считать, что внутреннее ядро Земли не может состоять из кристаллического h.c.p. железа. Эти данные показывают, что внутреннее ядро твердое, обладает анизотропией упругости и, возможно, гексагональной структурой. Для того чтобы ответить на важный вопрос: как устроено ядро Земли, следует рассматривать его как структуру, состоящую из гомогенного вещества, находящегося в состоянии двух фаз: жидкого – внешнего и твердого – внутреннего. Надо заметить, что это общепринятая точка зрения. Так же общепринятым считается, что твердая фаза образуется путем кристаллизации из расплава однородного вещества в его центральной части.

Рассмотрим этот процесс подробнее. Будем придерживаться канвы рассуждений, высказанных Лангером (Langer, 1980). Однако прежде сошлемся на то, что идея однородного вещества ядра Земли была подтверждена сравнительно недавним определением величины скорости сейсмических волн, проходящих через внутреннее ядро как сдвиговые. Речь идет об измерении скорости PKJKP-волны (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Как известно, величина этой скорости была оценена теоретически, исходя из учета уравнения Адамса и Вильямсона, при анализе факта возрастания скорости P-волн на границе внутреннего ядра. Оцененная таким образом величина скорости S-волн 3.5 км/с во внутреннем ядре практически совпадает с измеренной в (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Есть все основания считать, что вещество ядра Земли однородно по химическому составу и находится в различных фазах, как, например, лед и вода.

В общепринятой модели Земли, температура вещества внутреннего ядра выше температуры внешнего. Насколько подобная ситуация физически однозначна, и какие могут быть следствия из такого утверждения? Рассмотрим подобную задачу. Возьмем некое тело, состоящее из однородного вещества, находящегося в состоянии двух фаз: в центре тела фаза II, при температуре T^{II}. Фаза II окружена веществом, в состоянии фазы I, при температуре T^{I}, причем, $T^{II} > T^{I}$. Для упрощения задачи примем, что тело находится в равновесии с окружающей средой и здесь теплообмена не происходит, в то же время рассматриваемая нами двухфазная система диссипативна, существует тепловой поток dQ от вещества в состоянии фазы II к веществу в состоянии фазы I. При выполнении этих условий, в такой системе продуцируется энтропия: $dS = dQ(1/ T^{I} - 1/ T^{II})$. Здесь $dQ > 0$ - количество тепла полученного фазой I от фазы II. Так как dS величина положительная (энтропия возрастает), а $(1/ T^{I} - 1/ T^{II}) > 0$, то:

$$dQ = c_V\, dT + L_T\, dV - U_{TV}\, d\xi$$

по условию, тоже должна быть величиной положительной. Здесь: c_V – теплоемкость при постоянном объеме, L_T – скрытая теплота изменения объема, U_{TV} – теплота фазового перехода (положительна при экзотермической реакции), ξ - степень полноты реакции (Пригожин, 2001). Для стационарных условий, когда $dT = dV = 0$: $dQ \sim - U_{TV}\, d\xi$ и, следовательно, для выполнения $dQ > 0$, необходимо чтобы теплота фазового перехода должна быть отрицательной величиной. Если принять, что фаза II – вещество в твердом состоянии, в I – жидкость (расплав), то условие $dS > 0$ выполняется только в том случае, если происходит плавление, и оно не выполняется, если происходит кристаллизация.

Задача, связанная с затвердеванием чистой субстанции из ее расплава, например, замораживание льда в образце чистой воды, (в математической постановке – задача Стефана) подробно рассмотрена Лангером (Langer, 1980). В случае чистого вещества, процесс затвердевания (кристаллизации) управляется тепловым потоком. Скорость затвердевания в любой точке на поверхности раздела “жидкость – твердое”, определяется тем, как быстро скрытая теплота плавления выделяется (или поглощается) в точке, где проводится выборка. Лангер рассматривает две возможных в эксперименте схемы, причем

в обоих случаях чистая жидкость содержится в камере, в которой её стенки поддерживаются при заданной температуре, меньшей, чем температура плавления. В случае наиболее близком к рассматриваемой нами ситуации, затвердевание происходит в центре камеры. Жидкость первоначально переохлаждена и её температура ниже температуры плавления, причем, затвердевания, как и следует из предыдущего, не происходит. Этот процесс начинается только в том случае, если в центр камеры вводится специальная затравка - ядро кристаллизации. Скрытая теплота фазового перехода должна быть отведена через жидкость для обеспечения роста кристалла путем конвективной транспортировки. Ситуация с началом кристаллизации из центра камеры нестабильна, поверхность раздела фаз (фронт кристаллизации) разбивается на дендриты, которые вырастают относительно быстро из центральной части твердого тела. Например, аналогичная ситуация имеет место при росте снежинок.

Исследования, выполненные Лангером, применительно к нашей ситуации, позволяют сделать важный вывод о том, что кристаллизация вещества внутреннего ядра в центре его расплава, возможна только в том случае, если его температура ниже температуры плавления, а начало кристаллизации инициировано специальной затравкой. Кроме этого, фронт кристаллизации неустойчив, а результат кристаллизации представляет собой типичную дендритную структуру. Расплав в такой структуре – это стекло, или переохлажденная жидкость, вязкость которой очень велика. Причем, вязкость жидкости на линии плавления повышается с ростом температуры (Скрипов, Файззулин, 2001). Так, например, вязкость воды при обычных условиях 10^{-3} Па с возрастает до 10^{12} Па с - в области стеклования (Скрипов, Файззулин, 2001). По всей видимости, вязкость железа внешнего ядра, при условии, что кривая распределения температуры будет идти по линии плавления и ниже, будет не меньше, чем у воды и составлять не менее 10^{12} Па с.

Надо сказать, что мнения, по поводу величины вязкости вещества внешнего ядра, - крайне противоречивы. По мнению Бражкина и Ляпина (2000), вязкость вещества внешнего ядра составляет от 10^{2} Па·с до 10^{11} Па·с, по оценке Джеффриса - 10^{9} Па·с (Джеффрис, 1960), по оценке Магницкого (1965) - 10^{12} Па·с. Наиболее часто употребляемое значение, полученное по анализу астрономических данных, - 10^{8} Па·с. Сравним эти цифры с величиной вязкости расплава Fe-FeS измеренной экспериментально.

Расплав Fe-FeS принято считать основным кандидатом в состав внешнего ядра (Terasaki et al., 2001). В этой связи величина вязкости расплава, определенная экспериментально при температуре и давлении, соответствующим давлению и температуре внешнего ядра, представляет собой одно из наиболее важных физических свойств. Особую роль величина вязкости играет при исследовании динамики конвекции во внешнем ядре. Авторы (Terasaki et al., 2001) измерили вязкость этого расплава в диапазоне температур 1233-1923 K и давлений 1.5 - 6.9 ГПа, которая изменялась, соответственно, от 0.008 до 0.036 Па·с, что не намного больше, чем вязкость воды при нормальных условиях. Значительное несовпадение данных по величине вязкости экспериментальных (10^{-2} Па·с), теоретических (до 10^{13} Па·с) и полученных по анализу астрономических данных (10^{8} Па·с) можно считать ещё одним аргументом против идеи железного ядра.

Рассмотрим фазовые диаграммы вещества Земли и железа. Имеют ли они общность, или между ними такая же большая разность, как между данными по упругости и вязкости? Здесь встречается определенная трудность, состоящая в том, что в отличие от железа, Земля представляет собой сложную многокомпонентную систему, уравнение состояния которой не может быть простым и однозначным, следовательно, не может быть простой и фазовая диаграмма. Выход один – построить фазовую диаграмму железа и сравнить его с «реперными» точками, присущими Земле.

Приведем термодинамические параметры железа: температура плавления 1539° С, температура кипения 2872° С, удельная теплоемкость c_p = 641 Дж/кг К, теплота плавления $U_{\text{п}}$ = 13.77 кДж/моль ≈ 0.25 кДж/г, теплота испарения $U_{\text{и}}$ = 350 кДж/моль ≈ 6.25 кДж/г,

критическая температура T_c = 9600 К, критическое давление $p_к$ = 8.25 10^8 Па, критическая плотность $\rho_к$ = 2.03 г/см^3. Воспользуемся этими данными при построении фазовой диаграммы железа (см. рис. 4-10). Зависимость температуры плавления железа при высоких давлениях от 50 ГПа до 200 ГПа хорошо изучена экспериментально (кривая 1 на рис. 18-10), она приведена в обзоре (Boehler, 2000). Кривая 2 - «конденсация-испарение» железа может быть продолжена в область температур $T > T_c$ (кривая 2-а) и давлений $p > p_к$, если воспользоваться подходом, развитым Зельдовичем и Райзером (1966), где предложено рассматривать вещество, находящееся при pT параметрах, превышающих критические, как смесь индивидуальных веществ, обладающих различной теплоемкостью c_V: c_V = 3 R_g (конденсированное состояние) и c_V = 3/2 R_g (газ), где R_g - газовая постоянная. Если температура вещества $T > T_p$, то оно находится в газообразном состоянии, если меньше ($T < T_p$), то - в конденсированном. К примеру, для железа нормальной плотности, $T_p \approx$ 20 000 К. При увеличении давления p и сжатии вещества, растет и температура: $T_p \sim p/\rho$ (ρ - плотность). Предельное значение величины T_p, ($T_p \sim U_w/R_g$) железа (Зельдович, Райзер, 1966) оказывается порядка 70 000 К. Таким образом, можно продолжить верхнюю кривую состояния железа в области температур $T_c < T < T_p$ и получить кривую равновесия фаз железа в области температур и давлений, принятых для центра Земли, где $p \approx$ 360 ГПа (кривая 2 на рис. 4-10). Надо заметить, что линия плавления вещества мантии Земли (MgO) примерно соответствует линии плавления железа, но шкала температур в этом случае выше на 1000 К. Этим можно воспользоваться при построении кривых равновесия фаз вещества Земли. Принципиальных различий с кривой железа быть не должно.

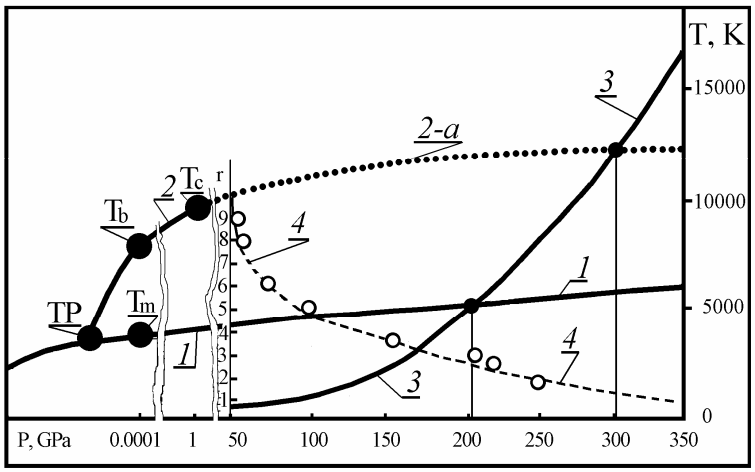


Рис. 4-10. Фазовая диаграмма железа: 1 - линия «плавление – кристаллизация» (Boehler, 2000; 2 - линия «испарение – конденсация», 2-а – продолжение 2 для $T > T_c$.
Ударная адиабата 3 - вещества ядра, согласно модели горячей Земли, 4 - зависимости давления в ударной волне от радиуса шара (dp/dr) в сферическом приближении (Зельдович и др., 1995). Температура: T_m - плавления, T_b - кипения, T_c - критическая, *TP* – тройная точка.

Оценка распределения температуры по глубине Земли представляет достаточно сложную задачу. Дело в том, что известны данные о величине и распределении теплового потока, теплопроводности пород земной коры и температурного градиента, измеренных на очень небольших глубинах. С большей или меньшей правдоподобностью оценивается температура на глубине h = 100 км. Известно также давление на этой глубине. Дальнейшие рассуждения относительно хода температурной зависимости по глубине, как правило, находятся в тесной связи с используемой авторами моделью строения Земли и ее химическим составом. Принятый путь оценок dT/dh основан на представлении об

адиабатическом характере распределения температуры в недрах Земли. Зная *pT*-условия на глубине 100 км и приняв определенный закон, например, адиабату, вычисляют распределение температуры по глубине. Для оценки *dT/dh* используется выражение адиабаты Пуассона:

$$(pV^{\gamma} = const,\ TV^{\gamma-1} = const,\ c_p/c_V = \gamma);\ (\partial T/\partial p)_S = T/c_p\,(\partial V/\partial T)_p, \qquad (4.15)$$

которое преобразуется в: *dT/dh* заменой $dp = -\rho g\, dh$.

Земля диссипативная система, здесь происходит постоянный рост энтропии. По-видимому, адиабата Пуассона, не лучшее приближение к реальности. Для оценки характера поведения температуры в недрах Земли больше подходит аппроксимация температуры законом ударной адиабаты Гюгонио. Этот закон учитывает диссипативные свойства среды, и применим для систем, энтропия которых увеличивается. Ударная адиабата имеет существенное отличие от адиабаты Пуассона (реализуемой в идеальном газе с постоянной теплоемкостью, в недиссипативных процессах с постоянной энтропией).

Адиабата Гюгонио зависит от двух параметров, давления и объема в начальном состоянии. Уравнения ударной адиабаты (Зельдович, Райзер, 1966):

$$\varepsilon_1\,(p_1V_1) - \varepsilon_o(p_o\,V_o) = 1/2\,(p_1 + p_o)\,(V_o - V_1), \qquad (4.16)$$

$$\omega_1 - \varpi_o = 1/2\,(p_1 - p_o)\,(V_o + V_1),$$
$$\varpi = (\varepsilon + pV).$$

Эти уравнения определяют связь между термодинамическими величинами по обе стороны разрыва - “скачка” характеристик среды. Надо заметить, что поверхность разрыва термодинамических характеристик системы (Земли, в нашем случае) часто называют неподвижной ударной волной. Этот факт еще раз подтверждает, что только адиабата Гюгонио может использоваться для оценки характера *dT/dh* Земли. Подставляя:

$$\varepsilon = c_V\,T = pV/(\gamma - 1);\ \varpi = c_p\,T = \gamma/(\gamma - 1)\times pV,$$

решаем уравнения относительно температуры T_1:

$$T_1/T_o = p_1V_1/p_oV_o.$$

На рис. 4-10 (кривая 3) изображена зависимость *dT/dp*, построенная по адиабате Гюгонио:

$$dT = -\,T(\Gamma/V)dV + 1/2c_V[(V_o - V)dp + (p - p_o)dV], \qquad (4.17)$$

здесь Γ - коэффициент Грюнайзена. Пересечение адиабаты Гюгонио, с кривыми, соответствующими кривым равновесия фаз железа "отбивают" границы: в первом случае "твердое-жидкость", во втором - "жидкость-газ".

Применение ударной адиабаты Гюгонио для оценки распределения *dT/dh* предполагает, что Земля образовалась путем очень быстрого процесса самогравитации вещества Земли, при котором основную роль играли ударные процессы сжатия, сопровождающиеся возникновением ударных волн и фазовых границ. Земля при таком процессе образования оказывается достаточно горячей.

В задаче исследования степени соответствия свойств железа и вещества ядра Земли широко используется величина коэффициента Пуассона σ.

$$\sigma = 1/2\,(3K - 2\mu)\,/\,(3K + \mu) = (V_p^2 - 2\,V_S^2)\,/\,2\,(V_p^2 - V_S^2). \qquad (4.18)$$

Причем, если напряжения σ_{xx} и σ_{yy} - однозначно связаны с сжимающей силой *p*:

$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = p\,\sigma/(1 - \sigma)$, то коэффициент Пуассона не должен зависеть от величины давления.

В работе (Кулиев, 2000), посвященной определению коэффициента Пуассона в напряженных средах, утверждается, что величина коэффициента Пуассона должна быть постоянной для рассматриваемого материала и независимой от величины действующих внешних нагрузок. С другой стороны, Falzone и Stacey (1980) полагали, что давление

оказывает весьма заметное влияние на коэффициент Пуассона, причем, настолько, что железо может иметь его равным 0.445. Экспериментальное исследование упругости и реологии железа вплоть до давления в 220 ГПа путем сжатия образца в алмазной наковальне (Mao et al., 1998) показало, что скорости *P* и *S* волн равномерно увеличиваются с ростом давления таким образом, что коэффициент Пуассона остается постоянным вплоть до 200 ГПа и, по аппроксимации авторов (Mao et al., 1998), должен оставаться таким вплоть до давления, характерного для центра Земли (линия 2 на рис. 4-11). Эта линия практически совпадает с линией 1, показывающей ход коэффициента Пуассона в мантии Земли, и в целом по Земле, где величина σ равна 0.5 во внешнем ядре, и σ = 0.45 - во внутреннем. Величина коэффициента Пуассона (σ = 0.45 - во внутреннем ядре) была оценена ранее на основании использования уравнения Адамса и Вильямсона:

Авторы (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000) попытались объяснить слишком высокое значение коэффициента Пуассона (σ = 0.45) нормальной кристаллической структурой внутреннего ядра без привлечения идеи частичного плавления железа из-за громадного давления в центре Земли, что находится в противоречии с экспериментом (Mao et al., 1998).

Оценки величины коэффициента Пуассона были выполнены в экспериментах по ударному сжатию железа (Brawn, McQueen, 1986). Оказалось, что эти данные находятся в противоречии как с данными коэффициента Пуассона Земли, так и статически сжатого железа (см. кривая 3 на нижней панели рис.1-11). Изломанная линия 3 получена путем пересчета данных (Brawn, McQueen, 1986), приведенных авторами для зависимости коэффициента Пуассона от плотности железа, а так же с учетом данных (Steine-Neumann et al., 2001).

Анализ известных данных экспериментов и расчетов характеристик вещества внутреннего ядра и кристаллического гексагонально упакованного железа однозначно показывает, что внутреннее ядро не может состоять из кристаллического железа. Однако, с другой стороны, утверждать, что ядро Земли не может быть железным (с примесями, или без них) так же нет достаточных оснований. Кроме этого, необходимо учесть неоспоримый факт, что внутреннее ядро твердое и оно, возможно, имеет гексагональную упаковку. Более того, если согласиться с точкой зрения на то, каким образом образовалась Земля и допустить, что она сформировалась за счет механизма быстрой самогравитации, то, похоже, вообще в этой ситуации нельзя найти приемлемое решение. Следует учесть, что согласно модели горячей Земли вещество внутреннего ядра находится в газообразном состоянии, вернее, представляет собой плотную слабо ионизованную плазму. Как это ни кажется парадоксальным, именно в том, что внутреннее ядро Земли представляет собой плазму, находится объяснение всем приведенным нами парадоксам. Остается главный вопрос: как же так, твердое ядро состоит из плотной плазмы? Однако в физике плазмы это не является невозможным. Известно, что плотная астрофизическая плазма (Van Horn, 1991) обладает квантовыми свойствами, представляет собой Вигнеровский кристалл (Wigner, 1934), который, как известно, сдвиговые волны пропускает. Более того, в самое последнее время в физике плазмы обнаружено и интенсивно изучается явление, названное пылевой кристаллической плазмой. Экспериментально обнаружено, что такое вещество обладает гексагональной кристаллической структурой, в таком веществе распространяется «пылевой» звук (Maddox, 1994; Thomas et al., 1994; Thomas, Morfill, 1996). Как было обнаружено совсем недавно, в пылевой кристаллической плазме распространяется сдвиговая волна. Этот факт, по-видимому, можно считать подтверждением правомерности нашей модели.

4. 7. Эксперименты со сжатием железа сходящейся сферической ударной волной.

Рассмотрим результаты экспериментов по нагружению сферической ударной волной стального шара (Зедьдович и др., 1995). Стальной шар диаметром 40 мм был

окружен слоем взрывчатого вещества толщиной 20 мм. При подрыве взрывчатого вещества на шар воздействует сферическая ударная волна. По мнению авторов, ударная волна вызывает испарение центральной части шара диаметром около 5 мм, плавление в узкой области толщиной около 1 мм, а так же вязкое течение и наклеп во внешней части шара. На фотографии центральной части разрезанного образца (рис. 4-11) можно выделить три области. Центральная, почти сферическая полость, в которой вещество в момент эксперимента находилось в газообразном состоянии, представляет собой гомогенную структуру. Вокруг неё находится полость, содержащая вещество, прошедшее стадию плавления, последующей кристаллизации и образования дендритной структуры. Внешняя полость шара так же как его центральная часть, гомогенны, но в отличие от центральной части, она вся пронизана радиальными «следами», напоминающими прорывы жидкого вещества в направлении в поверхности шара. Вся картина, изображенная на срезе стального образца, весьма напоминает внутреннее устройство Земли, если, к примеру, обратиться к «японской» модели глобальной геодинамики (Лобковский, Котелкин, 2000), с центральным внутренним ядром, внешним – жидким и мантией, пронизанной следами от всплывающих плюмов.

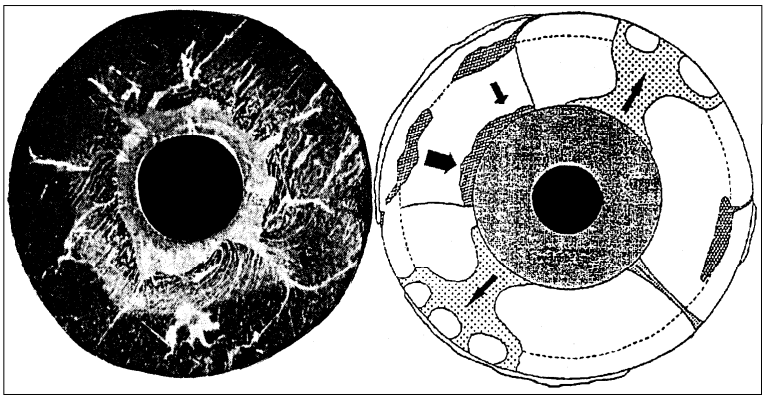


Рис. 4-11. Фотография разреза центральной части железного шара после нагружения ударной волной (Зельдович и др., 1995) - слева; справа - схема внутреннего устройства и глобальной геодинамики Земли (Лобковский, Котелкин, 2000).

Авторы измерили распределение микротвердости H_μ стального шара от расстояния r и давления p до центра (рис. 4-12-a). Твердость стали до нагружения, равна 220 кг/мм^2. После нагружения шара ударной волной, она увеличилась до 300 – 400 кг/мм^2. Измерений скорости звука ни в момент нагружения шара, ни после релаксации его вещества, не проводилось. Хотя, казалось бы, знание распределения скоростей звука по радиусу шара могло бы либо подтвердить, либо опровергнуть аналогию между железным шаром и Землей.

Для того чтобы перейти от известных данных распределения микротвердости к картине распределения скоростей акустических волн по радиусу шара можно построить (возможно, не совсем корректно) зависимость: $V \sim (H_\mu)^{1/2}$ (рис. 4-12-b). Ниже, для сравнения, приведено распределение скоростей P волн в нижней мантии и ядре Земли в трактовке Джеффриса (1960) (рис. 4 -12-c). Рисунки 12-b и 12-c имеют общность, что может служить формальным подтверждением правомерности аналогии между стальным шаром, после нагружения его ударной волной, и внутренним строением Земли.

Совпадение рисунков 4-12-b и 4-12-c, по-видимому, не случайно. Наличие довольно резких изменений величины H_μ вдоль радиуса шара говорит об изменении фазового состояния вещества в момент нагружения. По-видимому, похожая картина происходит и на Земле, где резкие изменения скоростей сейсмических волн показывают изменение состояния фаз его вещества. Легко показать, что энергии взрывчатого

вещества, используемого в обсуждаемом нами эксперименте, недостаточно для того, чтобы полностью испарить все вещество стального шара (массой $M_ш$). Для этого необходима масса взрывчатого вещества $M_{вв} \approx 2\ M_ш\ U_и\ /E_{вв}$, где: $E_{вв}$ – эффективность взрывчатого вещества ($E_{вв} \approx 4$ кДж/г), а коэффициент 2 следует из критерия полного испарения, применение которого было обосновано в (Зельдович, Райзер, 1966). По-видимому, этот коэффициент должен быть ещё больше, так как мы не учитываем того, какая часть энергии взрывчатого вещества будет использоваться на создание ударной волны. Тем не менее, величина $M_{вв}$ оказывается порядка одного кг, в то время как в эксперименте применялось около 300 г.

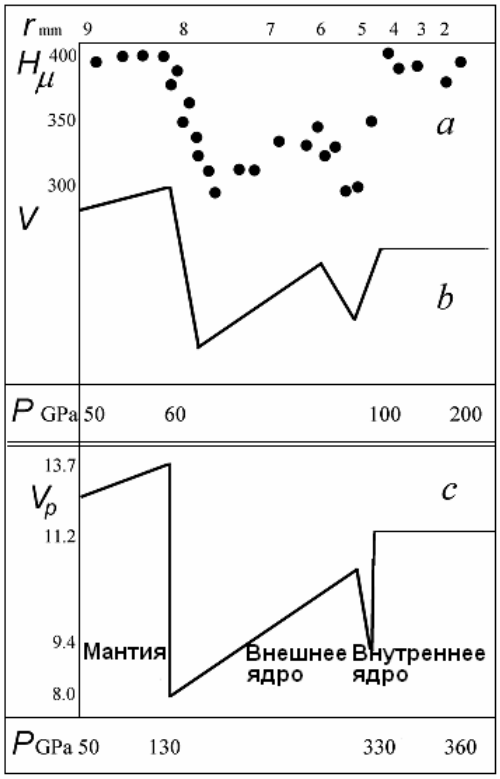


Рис. 4-12. ***a*** - зависимость микротвердости H_μ стального шара от радиуса r и давления p в сферической сходящейся ударной волне (по данным Зельдович и др, 1995); ***b*** - зависимость скорости акустических волн (в отн. ед.): $v \sim (H_\mu)^{1/2}$ от величины давления в ударной волне; ***c*** - скорость P волн от давления в нижней мантии и ядре Земли (по Джеффрису, 1960).

Обсуждение экспериментальных данных. Предположим, что Земля состоит исключительно из железа. Сколько энергии ВВ потребуется для того, чтобы полностью испарить вещество Земли? Подставляем вместо $M_ш$ массу Земли ($6 \cdot 10^{27}$ г) и получаем величину необходимой энергии, равной примерно 10^{39} эрг. Для сравнения, гравитационная энергия Земли: $E = 3/5 \cdot GM^2/R = 2 \cdot 10^{39}$ эрг, здесь: G – гравитационная постоянная, R – радиус Земли. Использование коэффициента 3/5 вместо 1/2, следующего из теоремы вириала, обосновано Магницким (1965). Таким образом, гравитационной энергии Земли вполне достаточно для того, чтобы полностью испарить её вещество. Естественно, это может произойти при условии, что процесс образования Земли шел настолько быстро, что энергия, выделяемая при сжатии её вещества, не успевала излучиться в космос. Условием быстрого сжатия вещества Земли может быть, например, превышение скорости сжатия $(GM/R)^{1/2}$ над скоростью звука $(\gamma RT/\mu)^{1/2}$, где μ - атомный вес вещества Земли (критерий Джинса). При выполнении такого условия процесс

образования Земли должен соответствовать ударному сжатию её вещества, а распределение температуры по радиусу Земли - соответствовать адиабате Гюгонио.

Вернемся к рис. 4-10, где приведено распределение температуры Земли (кривая 3) от давления, рассчитанное по адиабате Гюгонио, а так же кривые плавления (кривая 1) и испарения (кривая 2) железа. Пересечение кривой Гюгонио с линиями уравнения состояния железа, маркируют начало плавления железа на границе внешнего ядра и мантии и испарения его – на границе внутреннего ядра. Результаты ударных экспериментов (Brown, McQueen, 1986) соответствуют температурам железа, большим, чем температура плавления при заданном давлении (Boehler, 2000). Многие из авторов этих экспериментов приходят к выводу относительно того, что железо в них находится в каком то необычном (β) состоянии. Авторы не делали попытки оценить температуру железа в этом эксперименте, по их мнению, часть вещества шара испарилась, а другая – расплавилась, остальная оставалась твердой. Это дает основание считать, что интервал температур в этом эксперименте был достаточно велик и мог пересекать линии «твердое - жидкость» и «жидкость-пар». Возможно, и в других ударных экспериментах интервал значений температур был заметно выше, чем авторы приводят в своих работах. При таком подходе, особое состояние железа, которое многими авторами называется как β-Fe, возможно, представляет собой двухфазную (жидкость + пар) среду, или даже трехфазную (твердое + жидкость + пар) среду. Рассматриваемый нами эксперимент с нагружением стального шара, это, вероятно, именно такой случай.

Все ударные эксперименты имели целью перевести железо в состояние расплава. Этой же цели преследовали эксперименты по лазерному нагреву образцов (Boehler, 2000), находящихся в алмазной наковальне при очень высоких давлениях. Нагревая эти образцы, экспериментаторы стремились воспроизвести явление плавления железа при давлении, равном давлению на границе ядра с мантией. В этих экспериментах негласно предполагалась идея, что Земля состоит только из железа.

Физика явлений, происходящих при pT параметрах вещества и, в частности, железа, при которых p примерно равно давлению в центре Земли, а температура T составляет несколько эВ (10000 – 30000 К) очень сложна, т.к. здесь могут сосуществовать кристаллическая и жидкая фазы вещества, а так же вещество в состоянии неидеальной сжатой плазмы или слабо ионизированного газа (Зельдович, Райзер, 1966). При дальнейшем увеличении давления и температуры, железо будет существовать – только в жидкой и плазменной фазе (Альтшулер и др. 1999). По всей видимости, результаты ударных экспериментов с железом в области давлений 100 – 400 ГПа (Brown, McQueen, 1986) по оценке величины коэффициента Пуассона, показывают, что вещество не было полностью расплавлено. Вполне возможно, что в этих экспериментах часть вещества находилась так же и в состоянии пара. Об этом свидетельствуют следы напыления вещества ударника и мишени на элементах конструкции после проведения эксперимента. Надо заметить, что оценить температуру вещества в ударных экспериментах не всегда можно в достаточной степени корректно. Само понятие температуры, когда вещество находится в метастабильном состоянии не вполне оправдано. Если учесть, что время ударного эксперимента составляет примерно 10^{-6} сек, толщина образца x = 0.1 см, а коэффициент температуропроводности $\zeta = 10^{-2}$ (см^2/с), то время выравнивания температуры $t = x^2 / \zeta$ порядка секунды, что значительно больше времени эксперимента. Это означает, что температура не может быть равновесной по всей толщине образца. Если сделать аналогичные оценки для Земли, то оказывается, что время релаксации её вещества t может достигать 10^{10} -10^{12} лет, что значительно превышает возраст Земли. Эта оценка показывает, что *вещество Земли полностью не релаксировало*.

4. 8. Упругие свойства кристаллической пылевой плазмы.

В последние годы, начиная с выхода работы (Thomas et al., 1994) внимание многих исследователей привлекает экспериментально обнаруженное необычное состояние

вещества, названное пылевой кристаллической плазмой, или плазма - кристаллом. Кристаллическая плазма образуется при искусственном или естественном введении в область газового разряда пылевых частиц, которые обычно приобретают отрицательный заряд (*Z)* равный нескольким сотням зарядов электрона, и, выстраиваясь на равных дистанциях друг от друга, - создают гексагональную кристаллическую структуру. Размер пылинки варьируется от долей микрона до десяти и более микрон, а расстояние между ними составляет несколько сотен микрон (Melzer et al., 1994).

Заметим, что пылевая кристаллическая плазма (ПКП) не является каким-то особым экзотическим состоянием вещества. Считается, например, что она может присутствовать в лабораторных установках, предназначенных для исследования реакции термоядерного синтеза. Здесь ПКП может образоваться в результате воздействия высокотемпературной плазмы на стенки термоядерных устройств (Winter, 2000) и, возможно, оказывать влияние на их работу. Принято считать, что ПКП присутствует в космосе и, к примеру, является одним из главных компонентов пылевых туманностей и планетарных колец (Цытович, 1997). Обнаружено присутствие пылевых частиц в непосредственной близости от Солнца, что может говорить об их относительной устойчивости (Гуляев, Щеглов, 2001). Пылевые частицы и ПКП возникают и оказывают влияние в ряде технологических операций, например, в операции травления - при производстве устройств микроэлектроники (Цытович, 1997) и т.п. Изучению свойств ПКП посвящено большое количество работ (Lampe et al., 2000; Игнатов, 2001; Merlino et al., 1998; Chu, Lin, 1994; Thomas, Morfill, 1996; Melzer, et al., 1994; Stenflo, Shukla, 2000; Shukla, 2000; Stenflo et al., 2000). Проводятся специальные конференции, вышли в свет несколько монографий (см. ссылки в (Stenflo, Shukla, 2000; Shukla, 2000; Stenflo et al., 2000)) и обстоятельных обзоров (Цытович, 1997). Тем не менее, среди известных публикаций нет ни одной работы, в которой бы обсуждался вопрос, насколько ПКП действительно «твердая» и подобна «кристаллу». Этот вопрос можно сформулировать иначе - обладает ли вещество в таком состоянии свойствами, присущими упругим твердым телам? Если бы удалось однозначно ответить на этот вопрос, то, возможно, это бы открыло путь для объяснения ряда свойств вещества, находящегося в ядрах звезд, коричневых карликов и планет. Очевидно, что решение этой проблемы служило бы подтверждением правомерности модели горячей Земли.

Многочисленные попытки создать теорию, или хотя бы непротиворечивую модель ПКП, пока не привели к положительному результату. Основной ключевой вопрос состоит в том, что не находится правдоподобной силы, которая приводила бы к взаимному притяжению частиц пыли, обладающих зарядом одной полярности. Причем, эта сила должна быть не меньше кулоновской силы расталкивания $f_e = Ze^2/R^2$. Здесь e – заряд электрона, R – расстояние между пылинками. Пылинки находятся в плазме, которая, экранируя действие кулоновских сил, уменьшает их в k- раз: $k = exp(-R/\lambda)$, где $\lambda = (kT/4\pi ne^2)^{1/2}$ - дебаевский радиус экранирования, а n – концентрация плазмы. Физики, в «противовес» силам кулоновского расталкивания, привлекают «теневые» (shadowing) силы, якобы возникающие при экранировании пылинками потоков плазмы (Lampe et al., 2000; Игнатов, 1998), аналогично тому, как это было предсказано 200 лет тому назад Лесажем, который пытался создать теорию гравитации на эффекте экранирования гравитирующими телами потока эфира. Идея, согласно которой притяжение между пылевыми частицами возникает за счет экранирования ими потоков плазмы возможно правильная, однако пока она не имеет экспериментального подтверждения. Более того, это объяснение годится только в случае лабораторных экспериментов. В природе экранирующие потоки плазмы находятся далеко не во всех случаях. Например, таким случаем можно считать и внутреннее ядро Земли.

Обратимся к сравнительно малоизвестному эксперименту, в котором исследовались силы притяжения между макротелами. Речь пойдет об эффекте притяжения

между телами, который предсказал Казимир ещё в 1948 г. Эффект, получивший его имя, был многократно экспериментально реализован в различных научных центрах (Лифшиц, 1954; Лифшиц, 1955; Мостепаненко, Трунов, 1990; Дерягин, 1985; Lamoreaux 1997; и др.). Обнаруженная экспериментально сила стала называться силой Казимира. Суть эффекта Казимира состоит в том, что на единицу площади двух проводящих металлических (в пределе идеальной проводимости) плоскопараллельных пластин, расположенных в вакууме на расстоянии R друг от друга должна действовать сила притяжения $f_C = -(\pi^2/240)\cdot(hc/R^2)$, где h – постоянная Планка, c – скорость света. Эта сила уникальна, т.к. она не зависит ни от масс, ни от зарядов, ни от каких-либо иных констант связи.

Первым теорию эффекта, как теорию молекулярных сил притяжения между конденсированными телами с учетом влияния температуры на эти силы, разработал Лифшиц (1954, 1955) ещё до того, как эффект получил свое название. Затем причина появления силы Казимира стала интерпретироваться как изменение спектра нулевых колебаний электромагнитного вакуума из-за обращения в нуль тангенциальной составляющей электромагнитного поля на пластинах. К настоящему времени исследована лишь та разновидность сил Казимира, которая связана с нулевыми колебаниями электромагнитного поля, и по существу совпадает с запаздывающими силами Ван-дер-Ваальса (Мостепаненко, Трунов, 1990).

На начальной стадии экспериментов было обнаружено, как это и предсказывал Казимир, притяжение между металлическими пластинами в вакууме. В последствии экспериментаторы стали испытывать притяжение между различными объектами. В частности, этот эффект экспериментально наблюдался не только в глубоком вакууме, и не при очень низкой температуре, и не между металлами, а и в других возможных ситуациях, в частности, между диэлектриками различной формы (Дерягин и др., 1985). Экспериментально исследованы далеко не все возможные ситуации и способы измерения силы Казимира. Эти исследования продолжаются в различных научных центрах (Lamoreaux, 1997; Mohideen, Roy, 1998).

В нашей модели, при оценке величины упругости ПКП, в качестве потенциала, приводящего к притяжению пылинок друг к другу, т.е. потенциала, противодействующего кулоновскому расталкиванию, будем пользоваться силой Казимира f_C. Зная потенциал взаимодействия пылинок, можно оценить сжимаемость системы пылинок в плазме и, таким образом, оценить величину упругих свойств ПКП. Для оценки упругости ПКП воспользуемся подходом (Михайлов и др., 1964), развитым для вычисления скорости звука в ионных кристаллах. Энергия «кристаллической решетки» ПКП: $U = N\varphi$, где N – число пар пылевых частиц, а φ - потенциал. Здесь стоит N, а не $2N$, поскольку при расчете полной энергии решетки кристалла U, считается каждая взаимодействующая пара только один раз.

Потенциал кристаллической решетки можно выразить: $\varphi = \Sigma\varphi_{ij}$, где φ_{ij} - сумма потенциала сил кулоновского отталкивания и потенциала сил Казимира f_C, отвечающего за притяжение пылевых частиц: $\varphi_{ij} = f_C/R^{\mathrm{n}}_{\mathrm{ij}} - e^2/R_{\mathrm{ij}}$. Подставляя известные значения величин, потенциал ПКП:

$$\varphi = \pi^2 \mathrm{h} cS/240R^3 - [(Ze)^2/R]\, exp(-R/\lambda). \qquad (4.19)$$

Выразим сжимаемость ПКП ($1/\beta$) через вторую производную от энергии по объёму:

$$1/\beta = Vd^2U/dV^2 = V[dU/dR \cdot d^2R/dV^2 + d^2U/dR\,(dR/dV)^2]. \qquad (4.20)$$

Учитывая то, что в большинстве экспериментальных исследований ПКП утверждается, что в плазме газового разряда возникает гексагональная кристаллическая структура, объем ячейки можно выразить: $V \approx 3N\,R^3$. В состоянии равновесия ПКП: $dU/dR = 0$. Учитывая, что $(dR/dV)^2 = 1/81\,N^2\,R^4$, и подставляя значение φ, получаем:

$$U = N[\pi^2 \mathrm{h} cS/240R^3 - [(Ze)^2/R]\, exp(-R/\lambda)],$$

и, отсюда:

$$d^2U/dR^2 = N\,[12\pi^2 hcS/240R^5 - [2(Ze)^2/R^3]\, exp(-R/\lambda)]. \qquad (4.21)$$

Учитывая условие равновесия, выразим параметр $exp(-R/\lambda)$:

$$dU/dR = N[-3\pi^2 hcS/240R^4 + [(Ze)^2/R^2)\ exp(-R/\lambda)] = 0,$$

$$exp\ (-R/\lambda) = \pi^2 hcS/80R^2(Ze)^2.$$

подставляя, получаем выражение второй производной от энергии по объему

$$d^2U/dR^2 = N\ [\pi^2 hcS/40R^5],$$

тогда сжимаемость ПКП равна:

$$1/\beta \approx 10^{-3}\ \pi^2 hcS/R^6. \qquad (4.22)$$

Оценим применимость полученной формулы. Легко показать, что условие $f_C = f_e$ выполняется при: $R \approx \lambda \approx (S)^{1/2}$ и $Z \to 1$, что не всегда соответствует большинству современных экспериментов с пылевой плазмой, в которых наблюдается: $R \approx \lambda >> (S)^{1/2}$ и $Z \to \infty$, но, тем не менее, как будет показано ниже, полученная формула сжимаемости может быть использована в случаях плотной плазмы.

Сравним полученную нами формулу сжимаемости пылевой плазмы, с аналогичной формулой сжимаемости ($1/\beta$) металлов (Михайлов и др., 1964): $1/\beta = A(Ze)^2/18\ R^4$, где A-постоянная Маделунга. Заменим в нашей формуле $hc = e^2/\alpha$, здесь α - постоянная тонкой структуры, которая характеризует электромагнитное взаимодействие (α = 1/137), и получим: $1/\beta \approx \pi^2\ (Ze)^2/10^3 \alpha R^4$ (полагая $S \approx R^2$), получаем качественное совпадение нашего результата с известной формулой сжимаемости металлов.

О величине модулей упругости можно судить по величине скоростей продольных и сдвиговых волн в упругой среде и анизотропии этих скоростей. Распространение волн в кристаллической среде описывается законом Гука, согласно которому выполняется соотношение между создаваемым напряжением T и возникшими в среде деформациями S: $T_{ij} = C_{ijkl}\ S_{kl}$, где $C_{ijkl} = (\partial T/\partial S)$ - тензор модулей упругости. Тензор модулей упругости гексагональной кристаллической структуры:

C_{11}	C_{12}	C_{13}	0	0	0
C_{12}	C_{11}	C_{13}	0	0	0
C_{13}	C_{13}	C_{33}	0	0	0
0	0	0	C_{44}	0	0
0	0	0	0	C_{44}	0
0	0	0	0	0	½ (C_{11} - C_{12})

Скорости продольных V_P и сдвиговых V_S волн гексагональной структуры равны соответственно: для волн, распространяющихся вдоль оси Z: $V'_P = (C_{33}/\rho)^{1/2}$, $V'_S = (C_{44}/\rho)^{1/2}$ и распространяющихся поперек оси Z: $V''_P = (C_{11}/\rho)^{1/2}$, $V''_S = ((C_{11} - C_{12})/2\rho)^{1/2}$.

Для гексагональной структуры модуль объемного сжатия $1/\beta$ (K) можно выразить через модули упругости (Steine-Neumann et al., 1999):

$$1/\beta = K = [(C_{33}\ (C_{11} + C_{12}) - 2C^2_{13}\ ]/C_S, \text{ где } C_S = C_{11} + C_{12} + 2C_{33} - 4C_{13}.$$

Эти формулы позволяет вычислить модули упругости гексагональной кристаллической структуры, к которой относят и КПК.

В эксперименте (Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002) измерены скорости V'_P и V'_S. Следовательно, мы могли бы вычислить только модули C_{33} и C_{44}. Однако, учитывая то, что мы рассматривали гексагональную решетку, а в эксперименте (Nosenko et al., 2002) – 2D решетка, эти оценки не совсем правомерны, тем не менее, несомненный интерес представляет сравнение порядка величины модуля сжатия K полученного из эксперимента и оцененного по формуле (4.22).

Сделаем оценку модуля упругости ПКП для типичного эксперимента с пылевой плазмой. При размере пылинки 0.01 мкм ($S = 10^{-12}$ см^2) и расстоянии между ними R = 10 мкм, величина сжимаемости $1/\beta \approx 10^{-12}$ дин/см^2. Принимая плотность ПКП равной 10^{-4} г/см^3, скорость звука в плазме оказывается порядка 10^{-4} см/с. Много это или мало? В (Цитович, 1997) утверждается, что скорость пылевого звука обычно на много порядков меньше скорости обычного звука, однако - на сколько порядков эта скорость меньше скорости «пылевого звука» пока не оценено.

Эксперимент (Merlino et al., 1998) показывает, что в ПКП распространяются акустические (возможно, пылевые) волны, скорость которых около 10 см/с. Эта скорость больше, чем оцененная нами скорость на пять порядков. Однако сравнивать эти скорости не совсем правомерно т.к. в этом эксперименте размер частиц составлял 0.7 микрон, расстояние между ними ≈ 50 микрон, а газовый разряд помещен в продольное магнитное поле ≈ 100 Гаусс.

Есть основания считать, что результаты экспериментов с пылевой плазмой, полученные в (Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002) прямо свидетельствуют о наличии упругих свойств пылевой плазмы. Условия проведения экспериментов: $R \approx \lambda \approx 0.8$ мм; $Q = Z\,e \approx 10000\,e$; масса пылинки $m = 5\ 10^{-10}$ г; диаметр 8.7 микрон. Авторы измерили скорости волн сжатия и сдвига в пылевой лабораторной плазме: $C_L = 24.2 \pm 1.7$ мм/с и $C_T = 5.4 \pm 0.5$ мм/с. Переводя используемые авторами обозначения скоростей на общепринятый в сейсмологии язык: $V_P = C_L;\ V_S = C_T,\ x = V_P/V_S = C_L/C_T$, оценим величину коэффициента Пуассона:

$$\sigma = (V_p^2 - 2\,V_S^2)/2\,(V_p^2 - V_S^2) = (x^2 - 2)/2(x^2 - 1).$$

Получаем: $x = 4.48$ и $\sigma = 0.47$. Напомним, что $\sigma = 0.28$ для железа, 0.5 – жидкости, 0.48 – резины, 0.45 – вещества внутреннего ядра.

Зная величины скоростей V_P , V_S и плотности плазмы ρ ($\rho \approx 5 \cdot 10^{-4}$ г/см^3), можно оценить модуль сжатия $1/\beta$: $K = 1/\beta \approx V^2_P \cdot \rho \approx 5 \cdot 10^{-6}$ дин/см^2 и модуль сдвига: $\mu \approx V^2_S \cdot \rho \approx 0.25 \cdot 10^{-6}$ дин/см^2.

Для сравнения, оценим K по формуле (4.22), полагая: $Z \approx 10000$, $e \approx 4.8\ 10^{-10}$ CGSE, $(Ze)^2 \approx 2\ 10^{-11}$, $R = 0.08$ см. Величина $K = 1/\beta \approx 10^{-6}$ дин/см^2.

Как видно, K из эксперимента, и K, полученный по формуле (4.22), по порядку величины совпадают. Здесь предполагалось выполнение условия $S \approx R^2$. Эти расчеты позволяют оценить порядок величины K для вещества внутреннего ядра, или, точнее, полагая, что $K = 1/\beta \approx 10^{12}$ дин/см^2, оценить характерные размеры R элементарной кристаллической ячейки (аналога пылевой частицы). Предполагая, что формула (4.22) справедлива и в области мегабарных давлений, характерный размер R можно оценить приближенно таким образом:

$K \approx 10^{-3}\,\pi^2 hcS/R^6$, учитывая $S \approx R^2$, получаем: $K \sim 1/R^4$.

Полагая характерный размер «пылинки» кристаллической лабораторной плазмы R порядка 100 микрон, при увеличении K в 10^{18} раз, характерный размер «пылинки» - элементарной кристаллической ячейки «кристаллического вещества» внутреннего ядра будет составлять примерно 3 Å. (Очевидно, что это очень грубая оценка, определяющая только порядок величин. Тем не менее, она показывает принципиальную возможность существования «твердого, кристаллического» вещества, состоящего из слабо ионизованной плазмы, сжатой мегабарным давлением. Обычную плазму принято считать четвертым состоянием вещества. По-видимому, плотную, кристаллическую, пылевую плазму, возможно, следует выделить в особое, пятое состояние).

В ряде работ по кристаллической плазме авторы утверждают, что в плазме образуется кристалл Юкавы - Yukawa crystal (Hamaguchi, Farouki, 1994; Farouki, Hamaguchi, 1994; Ohta, Hamaguchi, 2000; Pramanik et al., 2002; Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002). В теории используется потенциал типа потенциала Юкавы:

$$\varphi \sim 1/R \; exp\,(-R/\lambda_B), \qquad (4.23)$$

где λ_B - (как и в нашей работе) дебаевский радиус экранирования. В потенциале Юкавы λ_B - это комптоновская длина волны промежуточного (виртуального) бозона. Для миллиметровой области действия, примерно соответствующей нашей модели, масса бозона с $\lambda_B \sim 1$ мм, $m_B \leq 10^{-4}$ эВ/с^2. Если использование потенциала Юкавы правомерно в нашей модели, то это позволяет конкретизировать механизм взаимодействия между частицами типа Казимира путем обмена между пылинками массовыми бозонами. Сила Юкавы, так же как и сила Казимира, способна обеспечить притяжение частиц, расталкивающихся под влиянием кулоновских сил.

Реализация экспериментов с пылевой кристаллической плазмой в области больших мегабарных давлений и плотностей, позволила бы по-новому взглянуть на существующие в настоящее время представления о физике плазмы, и о физике кристаллического состояния вещества. Осуществление таких экспериментов дало бы новый стимул в изучении физических свойств вероятных компонентов и состояния вещества ядра Земли, а также, возможно, в понимании природы шаровой молнии (Кузнецов, 2004).

Как отмечалось, формула (4.22) для оценки упругости пылевой плазмы применима при выполнении условия: $R \approx \lambda \approx (S)^{1/2}$ и $Z \rightarrow 1$. Это условие ближе всего соответствует соотношениям, характерным для шаровой молнии, где вместо пылинок рассматриваются капли воды, размер которых < 1 мкм, а расстояние между каплями $R \approx 5$ мкм. Величина не скомпенсированного электрического заряда капли (Z) не известна, но она не должна быть очень большой. Для плазмы шаровой молнии можно применить нашу формулу, если величина Z порядка нескольких единиц. Если предположить, что поверхностное натяжение шаровой молнии (α_S) обязано наличию силы Казимира, то можно оценить эту величину: $\alpha_S = f_C/r$, r – радиус шаровой молнии. Подстановка известных констант, величин S, R, и $r = 5$ см, дает величину $\alpha_S \approx 10^{-5}$ дин/см (α_S воды 70 дин/см).

Условие: $R \approx \lambda \approx (S)^{1/2}$ и $Z \rightarrow 1$ выполняется и для астрофизической плазмы (Van Horn, 1991), упругие свойства которой, вполне возможно, определяются силами Казимира. Если в астрофизической плазме $R \approx 10^{-8}$ см (1 Å), то её плотность и упругие свойства будут близки к аналогичным величинам, характерным для металлов.

4. 9. «Кристаллическая» ячейка вещества внутреннего ядра Земли.

Внутреннее ядро, согласно общепринятой модели холодной Земли, представляет собой твердое кристаллическое железо, которое образовалось внутри расплава железа. Как мы показали выше, эта модель при ближайшем рассмотрении оказывается несостоятельной. В нашей, альтернативной модели вещество внутреннего ядра находится в состоянии плотного газа (пара, плазмы). По данным о прохождении сейсмических скоростей это «твердое и кристаллическое» вещество, обладающее гексагональной структурой. Кроме этого, внутреннее ядро обладает анизотропией: скорость продольных волн вдоль оси вращения во внутреннем ядре примерно на 1-2 % больше чем скорость волн, проходящих в плоскости экватора. Мы пришли к выводу, что оказывается можно соединить в единое целое два таких противоречивых свойства, как гексагональная структура и состояние плазмы. Остается выяснить, что это за «кристалл», который существует при давлении 3.6 Мбар, температуре «газа» порядка 3 эВ, и «молекулярный» вес его $\mu \approx 10$. Мы уже отмечали, что $\mu \approx 10$ может быть получен, если вещество состоит из железа ($\mu \approx 56$) и водорода ($\mu \approx 1$) в пропорции: один атом железа на 5 атомов водорода.

В модели горячей Земли постулируется, что Земля (как и другие планеты) образовалась в едином процессе формирования звезды – Солнца. Состав вещества прото Земли в момент её образования идентичен составу вещества Солнца. В процессе образования Земля потеряла практически весь водород, в то время как более тяжелые элементы остались в её составе. При оценке относительной концентрации атомов в веществе, из которого состоит Солнце, за единицу принята концентрация водорода $N = 10^{12}$ частиц.

Полагая, что гелий является продуктом термоядерного синтеза, происходящего на Солнце, его не может быть в ядре Земли, учитывать в дальнейшем гелий не будем. Примем, что железо «традиционно» присутствует в ядре, а элементы, относительная концентрация которых меньше чем у железа (Na, Al, K, Ca) – исключим из рассмотрения. Примем концентрацию железа за единицу, (N_{Fe} = 1) тогда относительная (на один атом железа) концентрация других элементов на Солнце (округленно):

- серы: $N = 10^{(7.3 - 6.6)} = 5$
- магния: $N = 10^{(7.4 - 6.6)} = 6$
- кремния: $N = 10^{(7.5 - 6.6)} = 8$
- углерода: $N = 10^{(8.7 - 6.6)} = 126$
- кислорода: $N = 10^{(9 - 6.6)} = 250$
- водорода: $N = 10^{(12 - 6.6)} = 2.5\ 10^5$ (~237 - в ядре Земли)

Согласно нашей модели, концентрация водорода, за счет захвата его Солнцем, как более легкого, уменьшилась в момент образования Земли примерно на 3-4 порядка (см. в сл. разделе), в то время как относительная концентрация других элементов оставалась неизменной. При выполнении этого условия можно оценить концентрацию более тяжелых (чем водород) элементов, исходя из того, что средний «молекулярный» вес вещества ядра $\mu \approx 10$. Будем полагать: $\mu = 1/n\ \Sigma\ N_i\ n_i$, что для Fe + S + Si + Mg; $n = 1 + 5 + 8 + 6 = 12$; $\Sigma\ N_i\ n_i = 1 \cdot 56 + 5 \cdot 32 + 8 \cdot 28 + 6 \cdot 24 = 584$; отсюда получаем μ тяжелого элемента (ТЭ) = 584/20 = 19. Выясним, что представляет собой ТЭ: μ (C + O + ТЭ) = $\Sigma\ N_i\ n_i$ =12 126 + 16 250 + 19 20 = 1512 + 4000 + 584 = 6096. μ всех элементов без водорода = 6096/396 = 15.4

Для того чтобы $\mu = 10$, количество атомов водорода ≈ 237: $\mu \sim (6096 + 237) / (396 + 237) = 6333/633 = 10$ (количество нуклонов, деленное на количество атомов). Если $\mu < 10$, количество атомов водорода, естественно, увеличивается.

Один «кластер» (= 633 атома) обладает общим весом $6333 \cdot 1.6\ 10^{-24}$ г = 10^{-20} г. В см^3 вещества находится ≈ $13 \cdot 10^{20}$, «кластеров», следовательно, один «кластер занимает объем $7.7 \cdot 10^{-22}$ см^3. На один атом приходится (в среднем) $770/633 = 1.2 \cdot 10^{-24}$ см^3, т.е. среднее расстояние между атомами составляет около 1 Å.

При температуре ~ 3 эВ степень ионизации (по Саха) не превышает 1 %, принято считать, что это слабоионизованная плазма. Это позволяет нам не учитывать, в первом приближении, коллективные свойства электрического расталкивания плазмы.

При изменении давления от 3.2 до 3.6 Мбар, скорость продольных волн не меняется и остается равной 11.2 км/с, скорость сдвиговых волн = 3.6 км/с, коэффициент Пуассона = 0.45. Упругие модули внутреннего ядра, оцененные по величинам скоростей сейсмических волн в предположении гексагональной структуры внутреннего ядра, приведены в третьей строке таблицы 4.4 (см выше). Напомним, что в первой строке таблицы 4.4 приведены модули железа, измеренные в прямом эксперименте по статическому сжатию монокристалла гексагонального (h.c.p.) железа (Mao et al., 1998), во второй - модули железа, рассчитанные теоретически (Steine-Neumann et al., 2001) по схемам, приведенным в (Steine-Neumann et al., 1999). Очевидно несовпадение данных, приведенных в этой таблице, в которой представлены, для сравнения, реальные модули вещества внутреннего ядра и данные экспериментов и расчетов. Авторы (Steine-Neumann et al., 2001) в своей счетной модели стремились получить совпадение величин коэффициентов Пуассона ($\sigma = 0.45$). В экспериментах (Mao et al., 1998) величина σ железа не меняется в широком диапазоне давлений (до 220 GPa), оставаясь равной 0.28.

В нашем «кластере», как отмечалось выше, 633 атома, из них железо и магний – обладают наименьшим потенциалом ионизации ≈ 7.6 – 7.8 эВ (см. таблицу 4.5). Степень ионизации – не более 1 %, что составляет 6 - 7 ионов кластера. Таким образом, в «кластере» атомы железа и магния – ионизованы, и саму систему можно рассматривать как ионный кристалл, в котором находятся нейтральные атомы кислорода, водорода, углерода, серы и кремния.

Таблица 4.5

	H	C	O	Mg	Si	S	Fe
E, эВ	13.59	11.26	13.61	7.46	8.15	10.35	7.89

Рассмотрим упрощенный вариант модели. Исключим из состава ядра элементы, обладающие малой концентрацией. Оставим: кислород, углерод и водород, причем, примем, что водорода и кислорода примерно поровну, а углерода – в два раза меньше. Предположим, что именно эти элементы образуют гексагональную решетку, аналогичную описанной в (Jephcoat, Refson, 2001) для h.c.p. железа, как основного компонента ядра Земли. В этой решетке - 17 узлов (см. рис. 4-13). Будем считать, что из них 5 центральных принадлежат водороду (маленькие точки на рисунке). Для выполнения условия: $\mu \approx 10$, необходимо 4 атома углерода (большие кружки) и 8 атомов кислорода (квадраты). Число нуклонов = 171, $\mu = 10.6$. Общий вес решетки: $181 \cdot 1.6\ 10^{-24}$ г = $290 \cdot 10^{-24}$ г. При плотности внутреннего ядра $\rho = 13$ г/см^3, её объем $V = 22 \cdot 10^{-24}$ см^3. Полагая расстояние между узлами основания решетки равным a, высоту решетки ≈ 1.5 a, её объем $V \approx 4\ a^3$, (a ≈ 1.75 Å), а высота решетки ≈ 2.6 Å.

Скорость объемных волн вдоль направлений a и b = 11.2 км/с, а вдоль высоты (c) - примерно на 1 – 2 % выше (анизотропия ядра). Решетка сжата давлением порядка 3.5 Мбар.

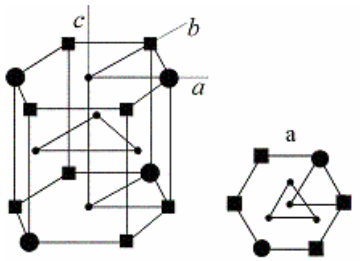


Рис. 4-13. Возможная объемная конфигурация ячейки кристаллической, плазменно-пылевой структуры вещества внутреннего ядра Земли.

Для того чтобы обсуждаемая модель обладала необходимой доказательной силой, требуется в дальнейшем:

- Рассчитать упругие модули кристаллической гексагональной структуры «кластера».
- Сравнить модули и коэффициент Пуассона с реальными параметрами внутреннего ядра. Меняя параметры (например, концентрацию водорода) подобрать наиболее близкие величины модулей.
- Оценить электропроводность такого «кристалла».
- Выяснить, что представляет собой «расплав» такого «кристалла» и можно ли считать, что на его границе реализуется экзотермический фазовый переход - конденсация?

Литература

Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д. и др. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений. УФН. 1999. Т. 169. № 3. С. 323-344.

Бай Ши-и. Динамика излучающего газа. М.: Мир. 1968. 323 с.

Бернал Дж., Фаулер Р. Структура воды и ионных растворов. УФН. Т. 14. Вып. 5. 1934. 586-644.

Бражкин В.В., Ляпин А.Г. Универсальный рост вязкости металлических расплавов в мегабарном диапазоне давлений: стеклообразное состояние внутреннего ядра Земли. УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 535-551.

Булах А.Г., Кривовичев В.Г., Золотарев А.А. Общая минералогия. М.: Академия. 2008. 410

Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра, 1984, 110 с.

Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука. 1985. 399 с.

Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и строение. М.: ИЛ. 1960. 484 с.
Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966. 686 с.
Зельдович В.И., Литвинов Б.В., Пурыгин Н.П. и др. Квазисферическое взрывное нагружение стали с давлением до 200 ГПа . ДАН. 1995. Т. 343. № 5. С. 621-624.
Игнатов А.М. Квазигравитация в пылевой плазме. УФН. 2001. Т. 171. С. 213-217.
Кулиев Г.Г. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах. ДАН. 2000. Т. 370. № 4. С. 534-537.
Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 216 с.
Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений Новосибирск: Наука.1992. 92 с.
Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли. УФН. 1997. Т. 167. № 9. С. 1001- 1012.
Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли // Геомагнетизм и Аэрономия, 1998-а, Т. 38, С. 166-172.
Кузнецов В.В. Земля как термодинамическая система // Геология и геофизика, 1998-б, Т. 39, № 7, С. 987-1007.
Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели. Сб. докладов. ИКИР. 2004.
Кузнецов В.В. Принцип минимизации гравитационной энергии Земли и механизмы его реализации // URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_fgggms/1-2005/dis-1.pdf 2005.
Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука. 1964. 567 с
Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между конденсированными телами. ДАН СССР. 1954. Т. 97. С. 643-646. ДАН.
Лифшиц Е.М. Влияние температуры на молекулярные силы притяжения между конденсированными телами. ДАН СССР. 1955. Т. 100. С. 879-881.
Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Двухярусная термохимическая модель конвекции в мантии и её геодинамические следствия. В сб. Проблемы глобальной геодинамики. М.: Геос. 2000. С. 29-53.
Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.
Макаренко Г.Ф. Вулканические моря Земли и Луны. М.: Недра. 1983. 143 с.
МёрнерН.А. Эвстазия, изменение геоида и взаимодействия многих геофизических факторов. Сб. Катастрофы и история Земли. М.: Москва. 1986. С. 394-412.
Михайлов И.Г., Соловьев В.А. Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики М.: Наука. 1964. 514 с.
Мостепаненко В.М., Трунов Н.Н. Эффект Казимира и его приложения. М.: Энергоатомиздат. 1990. 215 с.
Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 412 с.
Печерский Д.М. Инверсии геомагнитного поля, плюмы и изменения органического мира в фанерозое: удивительные совпадения // Физика Земли, 2003, № 1, С. 53-56.
Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.- Ижевск: РХД. 2001.
Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра. 1984. 250 с.
Сакс В.Н. Климаты прошлого на севере СССР. Природа. 1947. №12. С. 19-32.
Салоп Л.И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра. 1982. 460 с.
Скрипов В.П. Файзулин М.З. Вязкость жидкостей на линии плавления и в переохлажденном состоянии. ДАН. 2001. Т. 378. С. 620-623.
Физическая энциклопедия (ФЭ) т. 3. М.: БРЭ. 1992. с.78-81.
Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. и др. Земля: введение в общую геологию. Ч. 2. М.: Мир. 1974. 845 с.
Харленд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г. и др. Шкала геологического времени. М.: Мир, 1985. 140 с
Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы и облака. УФН. 1997. Т. 167. С. 57-99.

Шульдинер В.И. Свидетели ранней истории Земли. Природа. 1985. № 4. С. 72-79.

Brown J.M., McQueen R.G. Phase transitions, Gruneisen parameter and elasticity for shocked iron between 77 GPa and 400 Gpa. J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 7485-7494.
Boehler R. High-pressure experiments and phase diagram of lower mantle and core materials. Rev. Geophys. 2000. V. 38. N. 2. P. 221-245.
Carey S.W. The expanding Earth. Amsterdam: Elsevier, 1976, 488 p.
Chu J.H., Lin I. Coulomb lattice in weakly ionized colloidal plasma. Physica A. 1994. V. 205. P. 183-190.
Chandrasekchar S. Hydrodynamics and hydromagnetic stability. Oxford: Clarendon Press. 1961. 654 p.
Deleuil D. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission Xx. CoRoT-20-b: A very high density, high eccentricity transiting giant planet. arXiv:1109.3203v1. 14 Sep. 2011.
Deuss A., Woodhouse J.H., Paulssen H., Trampert J. The observation of inner core shear waves. Geophys. J. Int. 2000. V. 142. P. 67-73.
Falzone A.J., Stacey F.G. Second-order elasticity theory: explanation for the high Poisson's ratio of the inner core. Phys. Earth Planet. Inter. 1980. V. 21. P. 371-377.
Farouki R.T., Hamaguchi S.J. Thermodynamics of strongly-coupled Yukawa systems near the one-component-plasma limit. II. Molecular dynamics simulations. Chem. Phys. 1994. V. 101. P. 9885-9893.
Fuller M., Weeks R. Superplumes and superchrons. Nature 1992. V. 356. P. 16-17.
Hamaguchi S. J., Farouki R.T. Thermodynamics of strongly-coupled Yukawa systems near the one-component-plasma limit. I. Derivation of the excess energy. Chem. Phys. 1994. V. 101. P. 9876-9884.
Hilgenberg O. Vom wachsenden Erdball. B. 1933, 56 p.
Jephcoat A., Refson K. Core beliefs. Nature 2001. V. 413. P. 27-30
Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. Nature. 1990. V. 347. 272-273.
Lamoreaux S.K. Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 μm range. Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. P. 5-8.
Lampe M., Joyce G., Ganguli G., Gavrishaka V. Interactions between dust grains in a dusty plasma. Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 3851-3861.
Langer J.S. Instabilities and pattern formation in crystal growth. Rev. Mod. Phys. 1980. V. 52. P. 1-28.
Larson R.L. Geological consequences of superplumes. Geology. 1991. V. 19. P. 963-966.
Maddox, J. Plasma dust as model crystals. Nature 1994. V. 370. P. 411.
Mao H., Shu J., Shen G., Hemley R.J., Li B., Singh A.K. Elasticity and rheology of iron above 220 GPa and the nature of the Earth's inner core. Nature 1998. V. 396. P. 741-743.
Melzer A., Trottenberg T., Piel A. Experimental determination of the charge on dust particles forming Coulomb lattices. Phys. Lett. A. 1994. V. 191. P. 301-308.
Merlino R.L., Barkan A., Thompson C., D'Angelo N. Laboratory studies of waves and instabilities in dusty plasmas. Phys. Plasmas. 1998. V. 5. P. 1607-1614.
Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth // Science, 1969, V. 166, P. 609-611.
Mohideen U., Roy A. Precision measurement of the Casimir force from 0.1 to 0.9 μm. Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 4549-4552.
Nosenko V., Goree J., Ma Z.W., Piel A.Observation of shear-wave mach cones in a 2D dusty-plasma crystal. Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 135001-4.
Ohta H., Hamaguchi S. Wave dipersion relations in Yukawa fluids. Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 6026-6029.

Okal E.A., Cansi Y. Detection of PKJKP at intermediate periods by progressive multi-channel correlation. Earth Plan. Sci. Lett. 1998. V. 164. P. 23-30.
Owen H.G. The Earth is expanding and we don't know why // New Scientist, 1984, P. 27-29.
Piel A., Nosenko, Goree J. Experiments and molecular-dynamics simulation of elastic waves in a plasma crystal radiated from a small dipile source. Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 085004.
Pramanik J., Prasad G., Sen A., Kaw P.K. Experimental observations of transverse shear waves in strongly coupled dusty plasmas. Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88**.** P. 175001-4.
Shukla P.K. Generation of zonal flows by drift waves in a dusty plasma. Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 3822-3825.
Steine-Neumann G., Stixrude L., Cohen R.E. First-principles elastic constants for the hcp transition metals Fe, Co, and Re at high pressure. Phys. Rev. B. 1999. V. 60. P. N 791-799.
Steine-Neumann G., Stixrude L., Cohen R.E., Gulseren O. Elasticity of iron at the temperature of the Earth's inner core. Nature 2001. V. 413. P. 57-60.
Steiner J. An expanding Earth on the basis of sea-floor spreading and subduction rates. Geology. 1977. V. 5. P. 313-318.
Stenflo L., Shukla P.K. Dust acoustic waves in thin dusty layers. Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 3472-3473.
Stenflo L., Shukla P.K, Yu M.Y. Dust acoustic surface waves on a dusty plasma slab. Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 2731-2732.
Terasaki H., Kato T., Urakawa S., et al. The effect of temperature, pressure, and sulfur content on viscosity of the Fe-FeS melt. Earth Planet. Sci. Lett. 2001. V. 190. P. 93-101.
Thomas, H., Morfill G.E., Demmel V. et al. Plasma crystal: coulomb crystallization in dusty plasma. Phys. Res. Lett. 1994. V.73. P. 652-655.
Thomas H., Morfill G. Melting dynamics of a plasma crystal. Nature 1996. V. 379. P. 806-809.
Van Horn H.M. Dense astrophysical plasmas. Science 1991. V. 252. P. 384-389.
Wells J.W. Coral growth and geochronometry. Nature 1963. V. 197. P. 948-950.
Wigner, E. On the interaction of electron in metals. Phys. Rev. 1934. V. 46. P. 1002-1011.
Winter J. A new challenge in nuclear fusion research? Phys. Plasmas 2000. V. 7. P. 3862-3866.

Глава 5*. Термодинамика горячей Земли.

В главе 5 рассмотрены оценки величин термодинамических параметров: температуры, начального радиуса Земли, величины начальной плотности, молекулярный вес и т.п. Роль фазовых переходов Критические параметры. Энтропия, тепловой поток. Уравнение состояния вещества. Распределение температуры. Скорости процессов конденсации и испарения. Цикличность. Гидродинамика F-слоя. Обсуждается физика возникновения месторождений полезных ископаемых (металлов, нефти и алмазов).

5. 1. Оценки величин термодинамических параметров.

Термодинамика холодной Земли базируется на идее расплавленного железного ядра, внутри которого находится кристаллическое твердое железное ядро. Собственно, эта модель «определяет» «реперные точки» температуры и общий ход её по глубине Земли. Ещё раз отметим, что это искусственная модель, которую до сих пор никто никогда не смог получить, ни экспериментально, ни численно. Действительно, попробуйте внутри ведра с водой образовать лед или получить кристаллическое железо внутри расплава. Этого, при условии, что вязкость расплава останется неизменной, а форма кристаллизующегося тела – сферической, никогда не удастся сделать. Например, Мясников и Фаддеев (1980), создавая численную модель образования жидкого ядра, не смогли получить в центре его твердое внутреннее ядро, какие бы термодинамические условия и уравнения состояния вещества они не задавали (частное сообщение В.П. Мясникова). В первой и третьей главах этой книги обращалось внимание на то, что идея затвердевания (кристаллизации) внутреннего ядра внутри расплавленного внешнего находится в противоречии с решением задачи Стефана. Всё это еще раз может говорить о несостоятельности модели холодной Земли.

Следуя холодной модели, температура, по мере увеличения давления, должна возрастать все с меньшим и меньшим градиентом и, в конце концов, выйти на асимптоту. Наилучшим описанием такого хода является адиабата Пуассона. Однако адиабата Пуассона характеризует поведение не диссипативной среды - идеального газа. Очевидно, что Земля, - это диссипативная структура и её вещество далеко не всегда можно представлять идеальным газом. В такой термодинамической структуре, по мере её эволюции, постоянно растет энтропия. По всей видимости, адиабата Пуассона, не лучшее приближение к реальности. На наш взгляд, для описания характера поведения температуры в недрах Земли больше подходит аппроксимация температуры законом ударной адиабаты, или, ее называют еще, адиабатой Гюгонио. Этот закон учитывает диссипативные свойства среды, и применим для систем, энтропия которых увеличивается. Отсюда следует вывод, что горячая модель Земли требует создания своей термодинамики (Кузнецов, 1998).

Оценка температуры. Гравитационная энергия Земли: $E = 3/5\ GM^2/R$, (G - гравитационная постоянная, M - масса, а R - радиус Земли) равна, по оценке Магницкого (1965), $E = 2.25\times10^{39}$ эрг. Поделим эту энергию на массу Земли и на приемлемую величину теплоемкости её вещества (c_p = 0.3 кал/г град.). Температура земного вещества оказывается порядка 30 000 К. При этом, Магницкий делает такой вывод: "Однако такая оценка бессмысленна, так как разогрев Земли целиком определяется принятой схемой образования планеты из протопланетного облака, поскольку при этом возникают огромные потери тепла через излучение" (Магницкий, 1965, стр. 41). Как было показано выше, и будет ясно из последующего, наша модель горячей Земли базируется на утверждении о том, что начальная температура вещества Земли (и планет) была именно такой большой.

Очевидно, что вещество, имеющее такую высокую температуру, будет находиться в газообразном состоянии, точнее, в состоянии перегретой жидкости, ещё точнее, -

слабоионизованного газа - плазмы. Земное вещество может нагреться до такой температуры при его сжатии за счет самогравитации. Внутреннее (газокинетическое) давление вещества, по мере увеличения его температуры, будет возрастать. Сжатие остановится в тот момент, когда газокинетическое давление станет равным давлению самогравитации (в соответствии с известным критерием Джинса). Воспользуемся этим критерием для оценки термодинамических параметров вещества Земли в момент ее образования. Сделаем одно весьма существенное для нашей модели предположение. Будем считать, что в настоящее время земное вещество в "первородном" состоянии находится во внутреннем ядре. Мы отмечали, что это очень важное предположение. Если это действительно так, то все остальное в нашей модели является его физически непротиворечивым следствием. Температура T = 30 000 К взята нами как исходная. В последствии, мы постараемся оценить интервал допустимых температур в т.н. “реперных” точках Земли: в центре и на границах внутреннего и внешнего ядра.

Начальный радиус Земли. Согласно критерию Джинса, гравитационное сжатие вещества Земли остановится в тот момент, когда скорость звука в среде, то есть в идеальном газе: $(\gamma R_g T/\mu)^{1/2}$, будет равна т.н. альвеновской (гравитационной) скорости:

$$(R_g T\ \gamma/\mu)^{1/2} = (GM/R)^{1/2}, \qquad (5.1)$$

здесь $\gamma = c_p/c_v$ - показатель адиабаты, R_g - газовая постоянная, μ - молекулярный (атомный) вес вещества. Скорость звука это, иначе, скорость прохождения Р-волн. Она, как известно, во внутреннем ядре равна: v_p = 11.2 км/с. (Обратим внимание на такой факт: скорость v_p практически постоянна вдоль радиуса внутреннего ядра, что соответствует газу, а не веществу в конденсированном состоянии).

Будем считать, что мы более или менее верно оценили начальную температуру вещества Земли (T = 30 000 К), будем полагать, что величина γ не слишком отличается от единицы. При этом можно приближенно оценить атомный вес вещества, который оказывается равным: $\mu \approx 10$, полагая начальный радиус Земли $R_o \approx 3.5$ тыс. км. Выше мы отмечали, что в пользу правдоподобия последней оценки говорит такое весьма интересное наблюдение: радиус внешнего ядра Земли равен 3.5 т. км. Площадь поверхности внешнего ядра точно равна суммарной площади материков. Это обстоятельство может говорить, например, о том, что Земля имела первоначальный размер, равный размеру ее внешнего ядра, а материки занимали полностью всю ее поверхность.

Величина начальной плотности. Поделив массу Земли на объем внешнего ядра, можно получить оценку начальной плотности вещества Земли и, возможно, плотности вещества внутреннего G-ядра. Величина начальной плотности ρ_G может достигать 35 г/см^3. Порядок величины плотности вещества внутреннего ядра можно оценить другим способом. Для этого положим газокинетическое давление nkT (k - постоянная Больцмана) равным литостатическому давлению в центре Земли ($p \approx 3.5$ Мбар). Подставляя вместо плотности газа n выражение $n = \rho_G/m\mu$ (m - масса протона), получаем примерно такую же величину плотности вещества внутреннего ядра ($\rho_G = p\mu m/kT$). Заметим, что оцененная нами выше величина молекулярного (атомного) веса вещества Земли (μ = 10) показывает, что в ее составе значительное место принадлежит водороду. В качестве примера представим, что внутреннее ядро Земли состоит из водорода и железа. Выше мы уже отмечали, что молекулярный вес μ "молекулы", составленной из атомов железа и водорода, будет равен примерно 10, если один атом железа (или молекулы SiO_2) будет "окружен" пятью атомами водорода. Для того чтобы плотность такого вещества была равной, оцененной нами для вещества внутреннего ядра (ρ_G = 35 г/см^3), линейный размер такой "молекулы" не должен быть больше 0.8 Å (1 Å = 10^{-8}см).

Сравним полученную величину размера "молекулы" с известными размерами атомов и ионов водорода и железа. Размеры: атома железа = 1.26 Å, иона Fe^{+2} = 0.8 Å,

иона Fe^{+3} = 0.67 Å; иона водорода H^- = 1.36 Å, атома водорода = 0.28 Å. Очевидно, что "создавая" такую "молекулу", необходимо заметно уменьшить первоначальные размеры исходных элементов "ободрав" с них верхние электроны. Такой способ "обдирки" атомов очень высоким давлением известен (Ландау, Лифшиц, 1964; Зельдович, Райзер, 1966). В экспериментах по лазерному термоядерному синтезу удавалось сжать вещество, увеличив его плотность в 100 раз по сравнению с исходной плотностью. Теоретический предел такого сжатия оценен в 10 000 раз (Басов и др., 1982).

Очевидно, что вещество в таком газообразном, сжатом состоянии с плотностью в 35 г/см^3 не встречается свободно в природе. Считается, что вещество при такой плотности находится в метастабильном состоянии и, со временем, релаксирует, превращаясь в нормальное, конденсированное состояние. Атомы вещества восстанавливают прежнюю форму электронных оболочек и занимают соответственно больший (чем в метастабильном состоянии) объем. Вещество при этом расширяется, а его плотность принимает “нормальное” значение (для вещества ядра Земли - порядка 10 г/см^3). Плотность вещества Земли при фазовом переходе его из метастабильного состояния в нормальное конденсированное может уменьшиться на ~ $\Delta\rho$ = 25 г/см^3. Такое явление обязано перестройке электронных оболочек атомов сжатых мегабарным давлением. При фазовых переходах первого рода (конденсации и испарении) вещество изменяет свое агрегатное состояние, т.к. сжать вещество значительно проще в том случае, когда оно находится в газообразном состоянии.

В качестве иллюстрации сказанному, приведем пример такого состояния вещества, воспользовавшись идеями, изложенными в (Кузнецов, 1985). Представим себе кусок медной проволоки, который используется в качестве электрического предохранителя. Сжать медную проволоку до сколь угодно большой плотности никаким давлением не удастся. Пропустим через нее ток такой величины, что проволочка мгновенно испарится. Она еще не успела разлететься как пар и пока "держит" форму. Что она представляет собой, металл или диэлектрик? Проволочка представляет собой вещество в газообразном состоянии или, точнее, в состоянии перегретой жидкости (т.е. уже не металл) и если воздействовать на него внешним давлением, то его можно сжать до сколь угодно высокой плотности. Если снять (отпустить) внешнее давление, то пары металла будут расширяться, расширяясь, - охлаждаться, и, охлаждаясь, - конденсироваться. Вещество, находящееся в конденсированном состоянии при мегабарных давлениях и высокой температуре, при перегреве, способно испариться, и может быть сжато внешним давлением до высокой плотности. Эти достаточно простые представления составляют основу преобразований агрегатного состояния вещества, на которых базируется предлагаемая здесь модель "горячей" Земли.

Согласно нашей модели, как неоднократно упоминалось выше, начальная плотность вещества Земли могла достигать 35 г/см^3, а молекулярный вес μ ~ около 10. Принципиальный момент нашей модели состоит в том, что ядро и мантия состоят из одного вещества, скорее всего, это SiO_2. Иллюстрируем сказанное рисунком 5-1. На врезке рис.5-1 приведены расчетные данные (Cavazzoni, et al. 1999) по плотности воды при давлении, близким к давлению в центре Земли (360 ГПа). Плотность H_2O при давлении 300 ГПа оказывается порядка 4 г/см^3. В логарифмическом масштабе, это – прямая линия. Аналогичные зависимости для H_2 и SiO_2 приведены на том же рисунке (см. рис. 5-1). Отсюда следует, что плотность окиси кремния достигает плотности внутреннего ядра при соответствующем давлении (линия 1 на рис. 5-1). Как следует из нашей модели, начальное давление было в 10 – 15 раз выше современного (линия 2), тогда начальная плотность SiO_2 могла достигать 35 г/см^3.

Оценим величину «молекулярного» веса μ «смеси» из H_2 и SiO_2. Водород при давлении внутреннего ядра имеет плотность 1 г/см^3, добавка его к SiO_2 плотность практически не изменит, а величину μ - изменит значительно. Обозначим μ_1 – вес водорода (1), μ_2 - вес окиси кремния (60), тогда молекулярный вес «смеси» $\mu = \mu_1(\rho_2/\rho_1 + 1)$

= 13, где ρ_2 = 12, а ρ_1 = 1 г/см^3, что примерно совпадает с нашими прежними оценками (μ = 10).

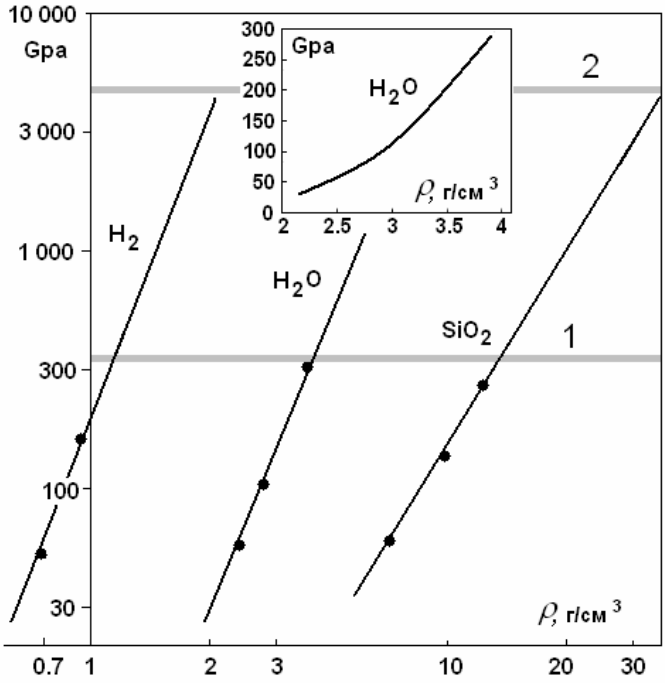


Рис. 5-1. Зависимость «плотность – давление» для водорода, воды (Cavazzoni, et al., 1999) и окиси кремния.

Роль фазовых переходов. Согласно нашей модели, в момент образования Земли ее вещество представляло собой пересжатый, слабоионизованный газ (плазму). Как мы отмечали, начальный радиус Земли был равен 3.5 т. км. Вещество охлаждалось, при этом переходило из газообразного состояния в конденсированное, формируя, таким образом, внешнее ядро, и, охлаждаясь еще, - кристаллизовалось на границе внешнего ядра, образуя мантию. Таким образом, от поверхности внешнего ядра во внутрь его перемещался фронт фазового перехода (ФФП) - конденсация, в то время как на этой же границе "действовал" фронт кристаллизации.

Рассмотрим требуемый характер перемещения масс внутри планеты, с той целью, чтобы это движение привело к наименьшему значению гравитационной энергии. Масса и момент инерции при этом должны оставаться неизменными. Иначе, нам следует выяснить, какой должна бы быть структура вариации плотности. Перемещение массы вдоль радиуса, происходящее при превращении однородной модели в многослойную, должно сопровождаться ответным «перемещением» масс в обратном направлении, таким образом, чтобы соблюдалось постоянство момента импульса.

Движение вещества через ФФП можно представить как дрейф, с одной стороны, и, т.к. на границе ФП всегда имеет место "скачек" плотности, - в виде стационарной ударной волны (Ландау, Лифшиц, 1986) – с другой. Скорость такого дрейфа определяется скоростью отвода тепла из области ФП. Здесь механизм отвода тепла (конвективного или кондуктивного) играет роль перколяции - просачивания.

Размер внутреннего ядра в процессе эволюции Земли постоянно уменьшался, радиус внешнего ядра оставался постоянным, его объем, естественно, возрастал, в то время как толщина мантии постоянно увеличивалась. В такой постановке, в системе должно выполняться правило сохранения моментов импульса, или, если скорости обеих процессов (конденсации, направленный внутрь Земли и кристаллизации, - наружу) равны, должен выполняться закон сохранения массы. Масса мантии должна быть равна массе разуплотненной части вещества внешнего ядра. Масса мантии, как известно, равна 4×10^{27} г. Масса разуплотненного вещества равна примерно $4/3\pi R_o^3\Delta\rho$. Оценка величины $\Delta\rho$,

полученная таким способом, дает то же, что и полученное нами выше, значение: $\Delta\rho = 25$ г/см^3.

Критические параметры. Допустим, что состояние постулированного нами вещества в сверхсжатом газообразном состоянии можно описать уравнением Ван-дер-Ваальса. Это допущение не должно вызвать особых возражений, тем более что это известное уравнение используется для описания явлений, связанных с фазовыми переходами. Это допущение позволяет оценить порядок критической температуры вещества Земли. (Известно, что при критической температуре T_K исчезает грань между фазами: всё вещество находится в газообразном состоянии). Уравнение Ван-дер-Ваальса дает связь между критическими параметрами: T_K, давлением p_K и объемом V_K: $p_K V_K/R_g T_K = 3/8$. (Закон соответственных состояний). Подставляя вместо p_K давление в центре Земли (3.5 Мбар), а вместо $V_K = \mu/\rho_G$ (μ в молях) получаем: $T_K \approx 3\times10^4$ К. Величина T_K примерно в три раза превышает критическую температуру железа в нормальных условиях. Полученную нами оценку, ни каким образом, нельзя считать попыткой определения критической температуры какого-то индивидуального вещества в общепринятом смысле. Критические параметры конкретных веществ индивидуальны и в большинстве случаев известны и помещены в справочниках.

Сравнивая pT параметры вещества внутреннего ядра ($T = 3\times10^4$ К, $p = 3.5$ Мбар) с критическими параметрами железа ($T_K \approx 10^4$ К, $p_K \approx 5$ кбар) видно их несоответствие: давление и температура во внутреннем ядре (согласно модели горячей Земли) значительно выше критических параметров железа. Это может вызвать недоумение. Может возникнуть неправильное впечатление, что при давлении и температуре, превышающих критические, раздела фаз нет и железо находится только в газообразном состоянии. В действительности это не так. Этот вопрос оригинально решен Зельдовичем и Райзером (1966): вещество, находящееся при pT параметрах, превышающих критические, следует рассматривать как смесь индивидуальных веществ, обладающих различной теплоемкостью c_V: $c_V = 3\ R_g$ и $c_V = 3/2\ R_g$, где R_g - газовая постоянная. Как известно, теплоемкость $c_V = 3/2\ R_g$ характеризует газ, а $c_V = 3\ R_g$ - вещество в конденсированном состоянии. Если температура вещества $T > T_p$, то оно находится в газообразном состоянии, если меньше ($T < T_p$), то в конденсированном. К примеру, для железа нормальной плотности, $T_p \approx$ 20 тыс. К. При увеличении давления p и сжатии вещества, растет и температура $T_p \sim p/\rho$ (ρ - плотность). Предельное значение величины T_p (Зельдович, Райзер, 1966) $T_p \sim U/R_g$, что для железа оказывается порядка 70 тыс. К.

Энтропия. Полученная оценка критической температуры для мегабарных давлений показывает, что в этих условиях вещество будет находиться в газообразном, плазменном состоянии. Оценка величины полной энергии системы E, температуры T, давления p и величины объема мантии dV, позволяет определить порядок значений изменения энтропии системы dS. Для этого воспользуемся известной связью энергии диссипативной структуры с ростом (продуцированием) в ней энтропии: $dE = T\ dS - p\ dV$. Подставляя определенные нами величины термодинамических параметров системы, получаем $dS \approx 1$ Дж/г град. Для сравнения, приводим критические энтропии ряда металлов: меди - 1.97; алюминия - 4.59; свинца - 0.87 Дж/г град. и т.п. (Кузнецов, 1985). Анализ оценки величины энтропии позволяет утверждать, что Земля представляет собой диссипативную систему, в которой продуцируется, возрастает энтропия.

Как известно, фазовые переходы первого рода, такие как конденсация, испарение, (плавление и кристаллизация), происходят с выделением (или поглощением) скрытой теплоты фазового перехода U. Величина U_K (конденсации, испарения) для некоторых металлов (медь, железо, алюминий и пр.) составляет примерно от 5 до 10 кДж/г (Кузнецов, 1985). Теплота перехода $U_П$ (плавление, кристаллизация) примерно в 20 - 30

раз меньше. Для дальнейших оценок примем величину U_K = 10 кДж/г. Это вполне приемлемое значение, т.к. известно, что $U \approx T\,dS$, и полагая, что температура вещества F-слоя порядка 10 000 К, получаем именно это значение.

Согласно Климонтовичу (1996), такая характеристика, как энтропия, может быть использована в качестве степени упорядоченности состояний открытой системы, к которой можно отнести и Землю. Переход ее вещества из газообразного и жидкого в кристаллическое, т.е. в более упорядоченное состояние, является фоном для реализации процесса самоорганизации.

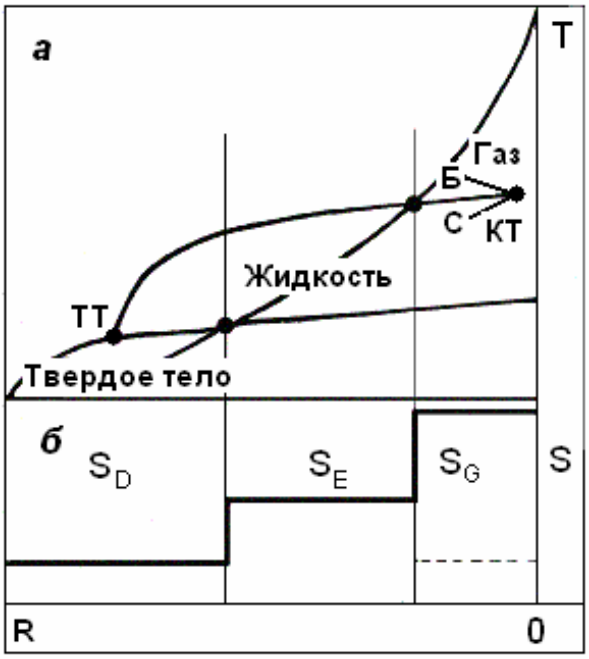


Рис. 5-2. Распределение температуры (а) и энтропии (б) по оболочкам Земли. а: диаграмма состояния вещества Земли и распределение температуры по адиабате Гюгонио, ТТ – тройная точка, КТ – критическая точка, Б – бинодаль, С – спинодаль.

Как отмечалось в Главе 4, Земля открытая диссипативная, самоорганизующаяся структура, в которой происходит постоянный рост энтропии. Казалось бы, энтропия центральной части Земли должна быть самой большой, и она должна уменьшаться по мере движения вдоль радиуса Земли в сторону его увеличения. Этому очевидному правилу из необратимой термодинамики противоречит модель кристаллизации внутреннего ядра внутри расплавленного железного внешнего ядра.

Для обсуждения модели Земли с позиции второго начала термодинамики, ещё раз запишем основное термодинамическое равенство:

$dE = T\,dS - p\,dV,$

откуда следует выражение для энтропии системы:

$$S = 1/T\int dE + 1/T\int pdV + \mathrm{C}. \qquad (5.\ 2)$$

Охлаждение системы, равно как и увеличение объема, приводит к росту энтропии. Итак, в процессе эволюции диссипативной, открытой, самоорганизующейся системы, такой как Земля, должно происходить увеличение энтропии (S). Как известно, Земля состоит из внутреннего – G, внешнего - E ядра и мантии - D. Энтропия Земли складывается из суммы энтропий её компонент: $S = S_G + S_E + S_D$. Распределение температуры по радиусу Земли очевидно: $T_G > T_E > T_D$ (см. рис. 5-2-а). Казалось бы, что в процессе эволюции таким же должно было бы быть и распределение энтропий: $S_G > S_E > S_D$. Следствием этого распределения должно быть газообразное (плазменное) состояние вещества внутреннего ядра. С точки зрения баланса энтропии схема устройства Земли, в которой: мантия состоит из вещества в кристаллическом состоянии, внешнее ядро, – в

жидком, а внутреннее ядро – в газообразном, представляется вполне логичной. Подобная система может эволюционировать посредством “работы” двух фазовых переходов первого рода: “конденсация-испарение” – на границе внутреннего ядра и “кристаллизация-плавление” – на границе ядро-мантия. На каждом таком фазовом переходе происходит резкое уменьшение энтропии, если “смотреть” из центра Земли к её периферии. Совсем не так выглядит распределение энтропии в случае т.н. модели холодной Земли, согласно которой внешнее ядро представляет собой расплав, а внутреннее ядро и мантия – кристаллическое состояние: $S_G < S_E > S_D$ (рис. 5-2-б), что, как мы отмечали в Главе 4, маловероятно.

Тепловой поток. Оценим порядок величины энергии E_U, выделившейся на Земле за время ее эволюции (t = 4.5 млрд. лет) посредством фазового перехода, полагая, что все вещество мантии сначала конденсировалось, а затем кристаллизовалось, а вещество внешнего ядра - конденсировалось. Для грубых оценок можно считать, что практически все вещество Земли (за исключением вещества внутреннего ядра, которое составляет ее незначительную часть, порядка 1 - 2 %) претерпело фазовый переход. В этом случае $E_U = 6\times10^{38}$ эрг. Это составляет примерно 1/3 - 1/4 от полной гравитационной энергии Земли. Энергия E_U практически вся должна пойти на формирование теплового потока Q. Оценим величину потока Q, усредненного за время эволюции Земли t: $Q = E_U/t = 10^{29}$ эрг/год. Полученная величина Q примерно на порядок больше наблюдаемой в настоящее время (1.5×10^{-6} кал/см^{2}с $\approx 10^{28}$ эрг/год), однако это несоответствие не должно особенно смущать, так как известно, что в более ранние геологические эпохи температурный градиент dT/dp, а, следовательно, и Q, были значительно выше. (В такой постановке равенство теплового потока на материках и океанах очевидно).

Сравним: годовая мощность теплового потока Земли равна примерно 3×10^{13} Вт, мощность магнитного поля Земли составляет $\approx 10^{12}$ Вт, наибольшая выделяющаяся при землетрясениях и извержении вулканов мощность $\approx 3\times10^{11}$ Вт. Видно, что у тепловой машины "Земля" механический кпд невелик (порядка процента, как у паровоза), кпд преобразования энергии в магнитное поле выше и т.д.

Диссипативная функция. Диссипативная функция (ДФ) имеет смысл мощности в системах, в которых происходит продуцирование энтропии. В нашем случае можно полагать, что диссипативная функция, это ни что иное, как тепловой поток. Что может дать нового введение этой функции в рассмотрение термодинамики Земли? ДФ обычно вводится для учета перехода энергии упорядоченного движения в тепловую, характеризует степень убывания энергии системы. ДФ, деленная на температуру, определяет скорость возрастания энтропии в системе. Если тепловой поток, это ДФ, то, разделив его значение на величину T, получим скорость продуцирования энтропии: $Q/T = dS/dt = 10^9$ Дж/°К×с для всей Земли. За время эволюции Земли произведено 10^{26} Дж/°К, поделив эту величину на M, получаем, что оцененная таким образом dS меньше, чем полученное выше значение. Это означает, что раньше величина Q была в несколько раз больше современного значения.

Давление. Как отмечалось, фазовые переходы, реализующиеся в нашей схеме в F-слое, происходят с выделением (конденсация) или поглощением (испарение) энергии, а также с увеличением объема (конденсация и кристаллизация), либо с его уменьшением (испарение и плавление). Принципиальной особенностью нашей схемы, отличающей ее от схем обычных, - является то, что плотность вещества в газообразном состоянии выше, чем в конденсированном. Плотность вещества в конденсированном состоянии выше, чем в – кристаллическом. Иначе, плотность вещества мантии, меньше плотности вещества внешнего ядра. Удельные объемы ($V = 1/\rho$): $V_Ж > V_Г$, что обычно бывает наоборот.

Полагая, условно, что вещество Земли «чистое, и не является смесью веществ», воспользуемся известным уравнением Клапейрона - Клаузиуса:

$$dP/dT = U/T(V_Г - V_Ж). \quad (5.3)$$

Выражение в скобках имеет знак "минус", и это должно вызывать появление отрицательного давления - Δp. Величина:

$$\Delta p = (\Delta T/T)\,(U/\Delta V) = (\Delta T/T)\,(U\Delta\rho_G). \quad (5.4)$$

Оценим $U\Delta\rho_G$, она оказывается порядка: $U\Delta\rho_G$ = 2.5 Мбар, т.е. эта величина достаточно близка к значению давления в центре Земли. Отношение ($\Delta T/T$) оценим позже, когда будем обсуждать ход зависимости dT/dp, а пока заметим, что (по нашей модели) в области фазового перехода (в F-слое) градиент dT/dp на кривой фазового состояния вещества должен быть отрицательным. Отсюда следует, что в цикле конденсации, когда величина $\Delta\rho_G$ положительна, давление в области F-слоя возрастает, а в цикле испарения, наоборот, давление уменьшается. Этот факт, без сомнения, должен сказаться на характере движения сплошной среды в земном ядре и, в особой степени, в области F-слоя.

5. 2. Уравнение состояния вещества.

Зависимость температуры плавления от величины давления. Как следует из нашей модели, исходное вещество, из которого была образована Земля, в значительной степени состояло из водорода. В процессе эволюции водород терялся, диссипируя в космическое пространство. В составе современной Земли, в её ядре и мантии присутствуют преимущественно (кроме водорода) кремний, кислород, железо и т.п.

Уравнение состояния железа при мегабарных давлениях изучено лучше всего. Исследователей интересовала температура плавления железа в зависимости от внешнего давления (Brown, McQueen, 1986; Boehler et al, 1990; Grover, 1990; Mao et al., 1990; Duba, 1992; Boehler, 1993; Saxena et al., 1994). В дальнейшем будем пользоваться этими данными. Однако из этого никак не следует, что в нашей модели ядро обязательно целиком железное, а мантия состоит из окиси кремния. Эти и другие элементы в различных концентрациях могут присутствовать в различных, земных оболочках (и во внутреннем ядре, естественно).

«Стеклянное» ядро. Как известно, скорость S-волн в G-ядре мала и, естественно, велик коэффициент Пуассона (σ = 0.44), который намного больше, чем у железа (σ = 0.28). К примеру, σ у: SiO_2 = 0.18; льда = 0.35; резины = 0.47; жидкости = 0.5. Если бы во внутреннем ядре находилось железо, то при v_p = 11.2 км/с скорость S-волн должна бы быть около 6 км/с. Бражкин и Ляпин (2000) опубликовали обзор в УФН, где высказали идею, что вещество внутреннего ядра находится в состоянии, подобном стеклянному, т.е. железо там существует не в кристаллическом виде, а в виде металлического стекла. В этом случае, по мнению авторов, можно объяснить большую величину коэффициента Пуассона (0.44), т.к. такая величина для стекол вполне обычна. Надо сказать, что утверждение авторов (Бражкин, Ляпин, 2000) относительно того, что внутреннее ядро может находиться в стеклообразном состоянии и именно этот факт объясняет большой коэффициент Пуассона, не убедительно. В качестве аргумента авторы ссылаются на (Кюнци, 1986), где специально рассматриваются механические свойства металлических стекол. В этой книге обсуждается поведение коэффициента Пуассона σ металлических стекол, для которого имеются результаты непосредственных измерений. Оказывается, «прямое сравнение его значений со значением для кристаллического сплава того же состава пока не проводилось. С другой стороны, в аморфных сплавах значение σ немного больше, чем в чистых кристаллических металлах. Действительно, исходя из наблюдаемых изменений других упругих постоянных, и связи σ с этими постоянными в изотропных телах, можно ожидать, что значения σ в металлических стеклах должны быть на 3 – 7 % больше, чем в кристаллической фазе» (стр. 209). Но не в 1.5 раза!

Обратим ещё раз внимание на то, что скорость Р-волн во внутреннем ядре постоянна, причем это нельзя объяснить тем, что ядро «стеклянное». Кроме этого, как известно, стекло образуется при большой скорости охлаждения, порядка 10^6 К/с (Кюнци, 1986), что, как нам кажется, невозможно реализовать в ядре Земли. И, наконец, для того, чтобы получить стеклообразное состояние, необходимо охладить центральную часть ядра Земли, не охлаждая его периферию, чего сделать невозможно в принципе.

Уравнение состояния. Как следует из литературы по физике ядра Земли, ни один из авторов, исследующих уравнение состояния железа, не проявил интереса к другой его части, не менее важной и информативной. Речь идет о кривой давления паров от температуры, кривой, оканчивающейся критической точкой (КТ см. рис. 5-2-а). На этом рисунке изображена кривая, показывающая, весьма схематично, уравнение состояния условного вещества Земли, в котором, кроме критической точки имеется т.н. тройная точка ТТ (ТТ - температура сосуществования трех фаз, например, у воды ТТ = 0° С).

От КТ под небольшими углами к температурной кривой испарения идут две кривые. Одна из них, обозначенная буквой "Б", показывает линию бинодали, другая, обозначенная буквой "С", - спинодали. Бинодалью называется кривая сосуществования двух фаз "жидкость-пар". Спинодаль - граница термодинамической устойчивости жидкости. Область между спинодалью и бинодалью - метастабильное перегретое состояние вещества. Эта кривая определяет состояние вещества Земли в твердом "Т", жидком "Ж" и газообразном "Г" виде.

«Пятое» состояние вещества. Особенность строения Земли и, в частности, его внутреннего ядра, состоит в том, что оно не может находиться «просто» в газообразном состоянии, как это следует из рис. 5-2-а. Необходимо подобрать такое состояние вещества, которое проявляло бы ещё и свойства, свойственные твердым телам: оно должно пропускать сдвиговые волны, т.е. вести себя как кристалл. Одним из возможных состояний вещества внутреннего ядра могла бы быть астрофизическая плазма, которая, как известно, проявляет квантовые свойства и может быть уподоблена кристаллическому состоянию.

В работе (Van Horn, 1991) приведены фазовые диаграммы $\rho(T)$ железа и водорода, в которых выделены линии $\Gamma = 178$, разделяющие вещество, находящееся в кристаллическом квантовом состоянии ($\Gamma > 178$) и состоянии квантовой жидкости ($1 < \Gamma < 178$). В области параметров (плотности и температуры), характерных для ядра Земли, кривая $\Gamma = 178$ в этой работе для железа точно не определена, она известна для $\rho > 100$ г/см^3 и $T > 10^5$ К, а для водорода, эта кривая пересекает интересующую нас область ρT параметров. Из диаграмм можно оценить: $d\rho/dT$ для железа ($d\rho/dT \approx 10^{-3}$ г/см^3/°К) и водорода ($d\rho/dT \approx 10^{-1}$ г/см^3/°К).

Оценим величину этого параметра в области границы внутреннего ядра Земли по данным известной PEM-модели Земли. Этот параметр ($d\rho/dT$) примерно равен 10^{-3} г/см^3/°К. Из рис. 19-3, построенного по данным Van Horn, видно, что ни железо, ни водород («в одиночку») не могут составлять вещество внутреннего ядра Земли.

Обратим внимание на такой любопытный факт, который может оказаться «спасительным» для нашей модели: В последние годы экспериментально (Thomas et al., 1994) обнаружено принципиально новое состояние вещества, названное авторами плазма-кристаллом (ПК). Газообразному веществу в ПК-состоянии, по-видимому, так же как астрофизической плазме и Вигнеровскому кристаллу (Wigner, 1934), присущи квантовые свойства и ряд других свойств, характерных для кристаллических тел.

Этот факт дает основание рассматривать в качестве вещества внутреннего ядра, “кристаллическую” плазму, где в качестве “пылинок” могут быть частицы железа (или кремния), окруженные свободными электронами, возникающими при ионизации водорода. Именно в этом случае, как и в работе (Thomas et al., 1994), величина Γ может

быть достаточно большой, а это означает, что кулоновские силы значительно превышают силы тепловые. Если предположить, что в центре Солнца так же находится плазма-кристалл и использовать экспериментальные данные из (Thomas et al., 1994), то можно, весьма условно, провести линию $\Gamma = 178$ (ПК) для вещества в состоянии плазма-кристалл (рис. 5-3). ρT-параметры внутреннего ядра оказываются выше этой линии, что могло бы означать «разумность» нашего предположения.

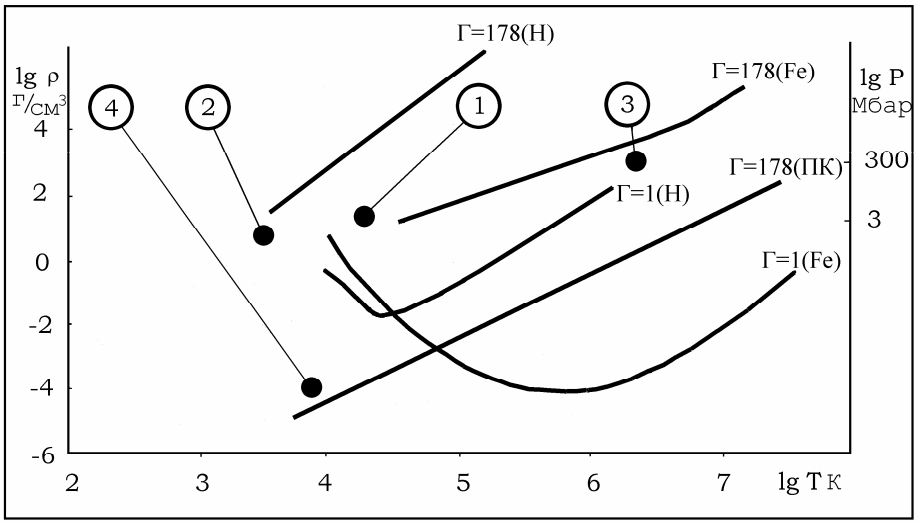


Рис. 5-3. Фазовая диаграмма «плотность-температура» для водорода и железа (по данным Van Horn, 1991). 1 - состояние вещества внутреннего ядра; 2 - параметры железа, полученные (Boehler, 1993) в экспериментах по ударному сжатию; 3 - ρT центральной части Солнца; 4 - лабораторный результат (Thomas et al., 1994).

Этот факт дает основание рассматривать в качестве вещества внутреннего ядра, “кристаллическую” плазму, где в качестве “пылинок” могут быть частицы железа (или кремния), окруженные свободными электронами, возникающими при ионизации водорода. Именно в этом случае, как и в работе (Thomas et al., 1994), величина Γ может быть достаточно большой, а это означает, что кулоновские силы значительно превышают силы тепловые. Если предположить, что в центре Солнца так же находится плазма-кристалл и использовать экспериментальные данные из (Thomas et al., 1994), то можно, весьма условно, провести линию $\Gamma = 178$ (ПК) для вещества в состоянии плазма-кристалл (рис. 5-3). ρT-параметры внутреннего ядра оказываются выше этой линии, что могло бы означать «разумность» нашего предположения.

Надо заметить, что в последние годы в различных лабораториях мира энергично ведутся эксперименты с веществом в состоянии «плазма-кристалл» или, иначе, с «пылевой» плазмой. В России среди важнейших достижений в области физики за 1999 приведено следующее: «В Институте теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур выполнена серия экспериментальных исследований пылевой плазмы в стратах тлеющего разряда постоянного тока. Впервые получены упорядоченные структуры из протяженных цилиндрических макрочастиц длиной 300 микрон, диаметром 15 и 7.5 микрона. Заряженные пылевые частицы образуют структуру, подобную жидкому кристаллу».

Эксперименты с веществом в состоянии плазма-кристалл настолько просты, а результаты очевидны, что это, возможно, открывает принципиальную возможность проверить нашу идею в лабораторном эксперименте. Одним из возможных способов экспериментальной проверки высказанной идеи может быть проведение ударно-волнового сжатия мишени и определение ударных адиабат по измерению скоростей

ударных волн и массовой скорости мишени. В качестве мишени можно было бы использовать металлы, способные поглощать большие объемы водорода, такие как, например, палладий (до 850 объемов водорода), никель, платина и др. Суть таких экспериментов могла бы состоять в выявлении возможности образования плазма-кристалла и условий его «плавления», в оценке величин плотности, молекулярного веса и т.п. По-видимому, «плавление» плазма-кристалла должно характеризоваться резким изменением величины массовой скорости вещества мишени (или скорости звука, если удастся её измерить) при незначительных вариациях начальных параметрах эксперимента.

Суперионное состояние воды. Американские ученые из Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса утверждают, что доказали существование так называемого суперионного состояния воды.

О возможности перехода воды в суперионную фазу впервые заговорили еще несколько лет назад (Cavazzoni, et al. 1999). Теоретически такое состояние возможно при очень высокой температуре (около 1000° Цельсия) и давлении (порядка 100 кбар). В таких условиях вода не может рассматриваться ни как жидкость, ни как твердое тело. Дело в том, что в суперионной фазе атомы кислорода оказываются как бы "замороженными", тогда как атомы водорода способны перемещаться с огромными скоростями. Авторы считают, что именно в таком состоянии находится вода в недрах планет-гигантов, таких как Нептун или Уран.

В ходе эксперимента, проведенного под руководством Лоренса Фрида, американские исследователи попытались воспроизвести вышеописанные условия. Для этого обыкновенная вода сжималась алмазным прессом и одновременно нагревалась посредством инфракрасного лазера. Параллельно снимались данные о частоте колебаний молекул (Marris, 2005). Эксперимент позволил выявить границу какого-то необычного состояния воды по резкому скачку частоты колебаний молекул.

Однако, что именно это было за состояние, удалось выяснить только при помощи компьютерного моделирования. Анализ поведения 60 молекул воды показал, что при высоких температуре и давлении они разрушаются, формируя при этом суперионную структуру. В таком состоянии вода оказывается плотнее льда и горячее пара. Трудно представить, что произошло бы с ней на поверхности нашей планеты, отмечают исследователи.

5. 3. Распределение температуры.

Адиабата Пуассона. Проблема распределения температуры по глубине Земли всегда представляла достаточно сложную задачу. Дело в том, что нам доступна информация о величине и распределении теплового потока, теплопроводности пород земной коры и температурного градиента, измеренного на очень небольших глубинах. С большей или меньшей правдоподобностью оценивается температура на глубине h = 100 км. Известно также давление на этой глубине. Дальнейшие рассуждения относительно хода температурной зависимости по глубине, как правило, находятся в тесной связи с используемой авторами моделью строения Земли и ее химическим составом. Принятый путь оценок dT/dh основан на представлении об адиабатическом характере распределения температуры в недрах Земли. Зная pT условия на глубине 100 км и приняв определенный закон, например, адиабату, вычисляют распределение температуры по глубине.

Большинство авторов для оценки dT/dh пользуются выражением:

$$dT/dh = - (g\beta T)/c_{p,} \qquad (5.5)$$

где g - ускорение силы тяжести, $\beta = 1/V\ (\partial V/\partial T)_p$ - коэффициент температурного расширения. Эта формула получена из известного дифференциального уравнения адиабаты:

$$(\partial T/\partial p)_S = T/c_p\ (\partial V/\partial T)_{p,} \qquad (5.6)$$

которое преобразуется в dT/dh заменой $dp = -\rho g\, dh$. В основе этого выражения используются формулы для адиабаты Пуассона:

$$pV^{\gamma} = const,\ TV^{\gamma-1} = const,\ (c_p/c_v = \gamma). \qquad (5.7)$$

При адиабатическом (пуассоновом) процессе энтропия остается постоянной ($S_2 - S_1 = 0$), а тепло, сообщенное системе в этом процессе, равно нулю ($\delta Q = 0$).

Адиабата Гюгонио. Как мы отмечали, Земля - диссипативная система. В этой термодинамической системе постоянно растет энтропия. По всей видимости, адиабата Пуассона, не лучшее приближение к реальности. На наш взгляд, для выяснения характера поведения температуры в недрах Земли больше подходит аппроксимация температуры законом ударной адиабаты, или, ее называют еще, адиабатой Гюгонио. Этот закон учитывает диссипативные свойства среды, и применим для систем, энтропия которых увеличивается. Ударная адиабата имеет существенное отличие от адиабаты Пуассона (реализуемой в идеальном газе с постоянной теплоемкостью, в не диссипативных процессах с постоянной энтропией).

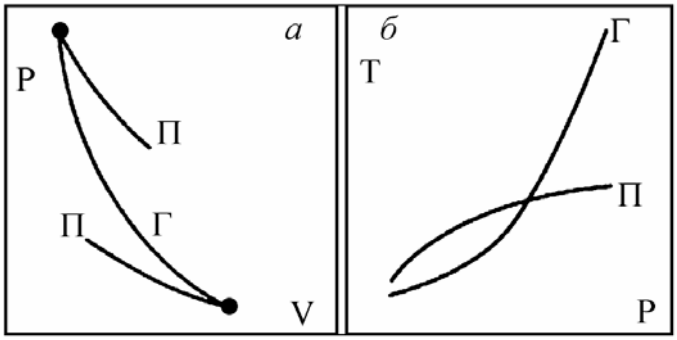


Рис. 5-4. Адиабаты Пуассона (П) и Гюгонио (Г) в координатах: pV - а и pT - б.

Уравнения Гюгонио определяют связь между термодинамическими величинами по обе стороны разрыва - “скачка” характеристик среды. Надо заметить, что поверхность разрыва термодинамических характеристик системы (Земли, в нашем случае) Ландау и Лифшиц (1986) называют неподвижной ударной волной. Этот факт еще раз убеждает нас в том, что только адиабата Гюгонио может использоваться для оценки характера dT/dh, а не адиабата Пуассона. На рисунке 5-4, для сравнения, изображены зависимости адиабат Пуассона ("П") и Гюгонио ("Г") в координатах pV (рис. 5-4-а) и pT (рис. 5-4-б). Из этих рисунков видно, что в pV координатах обе адиабаты различаются незначительно, в то время как характер зависимости температуры от давления имеет принципиальное различие для обеих адиабат. В дальнейшем, в нашей модели, при построении dT/dh, будем пользоваться адиабатой Гюгонио.

Распределение температуры. На рис. 5-5 изображены зависимости dT/dh, или, что то же самое, dT/dp, так как зависимость давления от радиуса Земли однозначна. Кривая (1) построена на основе аппроксимации температуры ("сверху", от $T = 30\ 000$ К и "снизу", от температуры плавления железа) по формуле (5.10). Она в какой-то степени близка к аналогичной кривой (3 на рис. 5-5; 3), построенной по адиабате Гюгонио (Brown, McQueen, 1986):

$$dT = -T(\gamma/V)dV + 1/2c_v[(V_o - V)dp + (p - p_o)dV], \qquad (5.8)$$

здесь γ - коэффициент Грюнайзена. Пересечение линии (2), тоже адиабаты Гюгонио, с кривой, соответствующей уравнению состояния земного вещества (использующей данные по плавлению и критической точки железа), "отбивает" границы земных оболочек: мантии

и внешнего ядра, а так же внешнего и внутреннего ядра. В первом случае адиабата (2) пересекает линию "твердое-жидкость", во втором - "жидкость-газ".

Как выше отмечалось, на кривой состояния фаз в области F-слоя должна наблюдаться особенность, состоящая в том, что градиент температуры в этой области становится отрицательным. Это происходит благодаря тому, что по уравнению (19.3) Клапейрона-Клаузиуса: $dp/dT = U/T(V_г - V_ж)$, в то время как (по нашей модели): $V_ж > V_г$. В подтверждение этому, сошлемся на несколько необычный характер поведения скоростей P-волн в области F-слоя (по трактовке Джеффриса). Это распределение P-волн приведено на вставке в левом верхнем углу рис. 19-5.

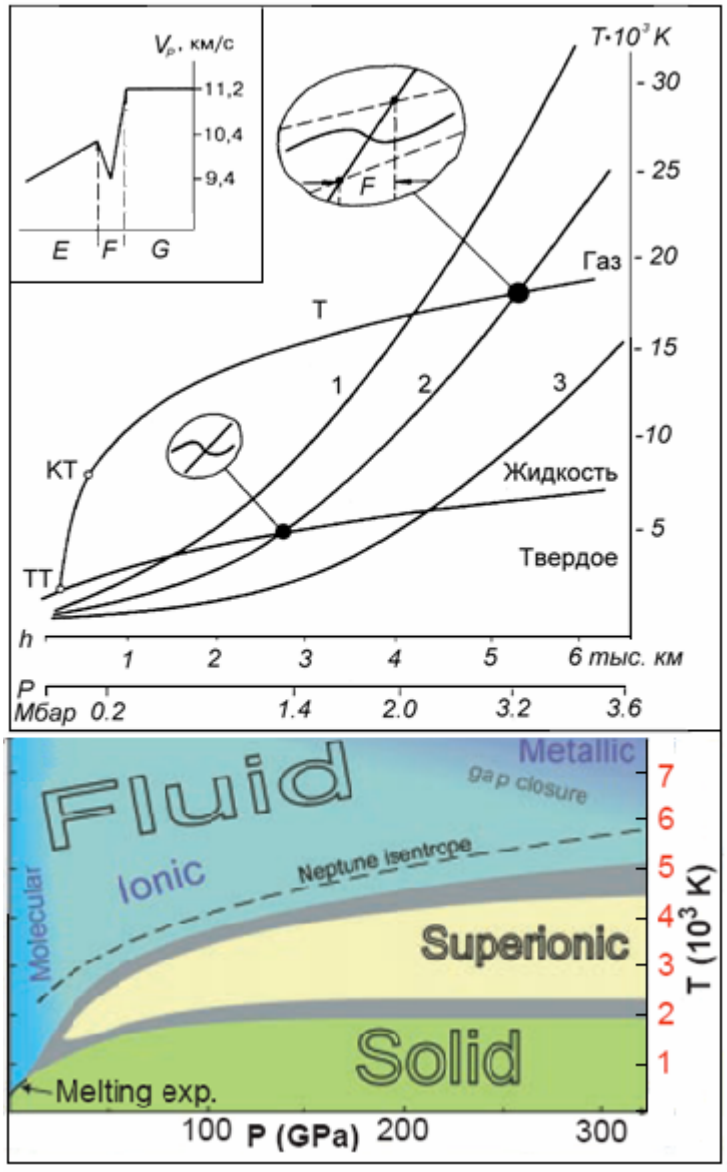


Рис. 5-5. Диаграмма фазового равновесия вещества Земли (ТТ - тройная точка, КТ - критическая точка, T_p - линия разделяющая фазы при $T >$ КТ и $p > p_к$). Адиабаты (А) Гюгонио: 1- рассчитана по формуле (Зельдович, Райзер, 1966), 3- рассчитана по формуле (Brown, McQueen, 1986), 2 - подобрана таким образом, чтобы она пересекалась с диаграммой равновесия на границе ядро-мантия и на границе внутреннего ядра с внешним. В верхнем левом углу - скорости P-волн в области F-слоя (в интерпретации Джеффриса) - вверху. Внизу - фазовое состояние суперионной воды (Cavazzoni, et al. 1999).

Преобразуем полученную нами выше формулу зависимости температуры по адиабате Гюгонио, заменяя $1/V = \rho$ и учитывая, что $dp/d\rho = v^2$, где v - скорость Р-волн. Получаем: $T_1 = T_o(v_1/v_o)^2$. Зная характер поведения Р-волн в области F-слоя и полагая температуру на границе F-слоя и внешнего ядра равной T_F, температура, соответствующая минимуму скорости Р-волн, будет равна 0.8 T_F, а температура на границе F-слоя с внутренним ядром - 1.25 T_F. Если, к примеру, считать, что T_F порядка 10 000 К, то $\Delta T \approx$ 2000 К, а $\Delta T/T \approx 0.2$. Эта оценка понадобится нам в дальнейшем при обсуждении величины Δp.

Заметим, что аналогичная ситуация с поведением температуры вдоль кривой распределения фаз будет наблюдаться и при пересечении кривой адиабатой на границе ядро-мантия, т.е. в области D"-слоя мантии. Здесь, также как в случае F-слоя, имеет место резкое уменьшение величины скорости Р-волн, связанное (по нашей модели) с тем, что плотность жидкой фазы оказывается больше плотности твердой, или $V_T > V_Ж$.

Оценим величину разности температур на внешнем ядре. Эта "реперная" оценка поможет нам определить ту часть из общей величины T, которая "падает" на промежутке между F- и D"- слоями. Согласно нашей модели, во внешнем ядре происходит ламинарная конвекция. В ядре можно выделить 12 конвективных ячеек. Можно оценить, что число Релея в такой конвективной структуре не будет больше чем: Ra = 10 000, а число Нуссельта при этом:

$$Nu \approx 0.18\ (Ra)^{1/3} = 5.$$

Как известно, тепловой поток, проходящий через конвективную структуру:

$$Q = \lambda \Delta T/\delta,$$

где λ - теплопроводность вещества ядра ($\lambda \approx 10^{-2}$ кал/град·см·с), ΔT - перепад температур, δ - эффективная толщина конвективного слоя: $\delta = h/Nu$ (h - толщина внешнего ядра, равная примерно 2 000 км). Полагая величину Q равной $1.5 \cdot 10^{-6}$ кал/см^2·с, перепад температуры на внешнем ядре: $\Delta T \approx$ 6 000 К.

Аналогичным образом можно оценить ΔT на слое мантии. Здесь, по всей видимости, происходит турбулентная конвекция, и число Релея может оказаться выше, чем в случае с внешним ядром. Соответственно, выше в несколько раз будет и число Нуссельта. Так как слой мантии примерно в 1.5 раза больше чем в ядре, то, учитывая все эти обстоятельства, величина ΔT на мантии может быть несколько ниже, чем в ядре и составлять 4 - 5 тысяч градусов. Это означает, что принятая нами выше величина T_F действительно близка к 10 000 К. К сожалению, мы не имеем возможности сделать оценку величины температурного перепада на внутреннем ядре от его центра до границы. Это связано с тем, что постулированное нами состояние вещества в виде переуплотненного пара и, тем более, пылевой плазмы, очень слабо изучено. Конвекции в нем, по-видимому, быть не может, из чего следует, что аналогичным образом оценить ΔT не представляется возможным. Из самых общих соображений, вряд ли ΔT может оказаться больше чем 5 000 К (а если учесть, что скорость Р-волн во внутреннем ядре можно оценить по формуле для идеального газа: $V = (\gamma R_g T/\mu)^{1/2}$, то и того меньше) поэтому максимальное значение температуры в центре Земли может составлять, ориентировочно, не более 15 000 К.

5. 4. Скорости процессов конденсации и испарения.

Как отмечалось, в области фазового перехода, в F-слое по модели, конкурируют два процесса: конденсация и испарение, и ее более высокая стадия - кипение. Скорость конденсации K (с$^{-1}$ см$^{-3}$) можно выразить воспользовавшись формулой Френкеля (1975):

$$K \approx 10^{26}\ exp(-3/ln S_П + ln\ S_П), \qquad (5.9)$$

здесь $S_П$ - пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина $S_П$ определяется температурой пара, его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной

поверхностного натяжения жидкости и т.п. Скорость конденсации K показывает количество элементарных процессов слияния частиц, которое происходит в единицу времени в единичном объеме. Величина K определяет скорость образования и роста капель.

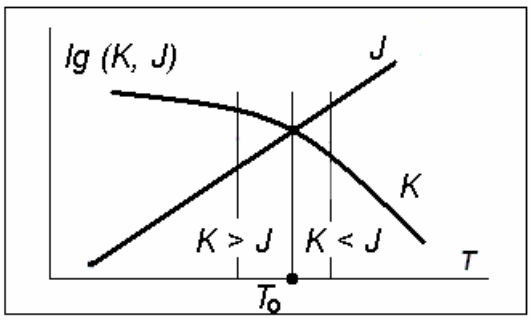


Рис. 5-6. Изменение *lg* скоростей конденсации (K) и испарения (J) в зависимости от температуры T – вверху.

В режиме испарения (кипения) в системе преимущественно рождаются пузыри пара, скорость образования которых:

$$J\,(\text{с}^{-1}\,\text{см}^{-3}) = 10^{37}\,exp\,(-W/kT), \qquad (5.10)$$

где W - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Зависимости K и J от температуры среды T (чисто качественные) изображены на рисунке 19-6. При температуре порядка T_o, скорости процессов становятся равными, это означает, что система, в принципе, может достичь термодинамического равновесия. (Однако, как будет показано ниже, она никогда достичь его не может и поэтому кривая установления температуры к линии T_o - носит исключительно гипотетический характер).

В определенный момент времени t_o - (0) система была перегрета на ΔT до температуры $T > T_o$. Очевидно, что в этом случае преимущество получают процессы испарения ($J > K$). В результате, часть вещества переходит из конденсированного состояния в - газообразное. При этом поглощается теплота фазового перехода. Она тратится на энергию, расходуемую на образование, рост и движение пузырей. Система при этом охлаждается. В области образования "высокоплотных" пузырей возникает отрицательное давление и "свободное" пространство, которое моментально заполняется окружающим веществом. Объем Земли в этот момент уменьшается. В дальнейшем, тепло отводится из зоны фазового перехода путем конвекции в ядре и, возможно, в мантии. С течением времени температура T понижается и может возникнуть ситуация, при которой $T < T_o$. В точке $T = T_o$, происходит смена режима, преимущество получают процессы конденсации ($K > J$). При этом часть вещества конденсируется с выделением теплоты фазового перехода, что приводит к нагреву системы и повышению ее температуры. Цикл смены режимов повторяется вновь.

5. 5. Цикличность.

Оценим длительность цикла. Чем больше разность T - T_o, чем выше производная dT/dt, тем короче цикл и, наоборот, чем более плавно устанавливается термодинамическое равновесие, и чем дольше оно длится, тем длиннее цикл. Длительность цикла: τ = С / [J - K], где С – константа, - связана с концентрацией капель и пузырей. При смене цикла в точке $T = T_o$, происходит не только изменение режима работы фазового перехода и связанное с ним изменение геодинамического режима Земли (о котором пойдет речь ниже), но и изменение полярности геомагнитного поля Земли - инверсия. Причиной инверсии (см. раздел IV) является смена полярности электрического поля E двойного электрического слоя, в котором, по нашей модели, происходит генерация геомагнитного

поля (см. рис. 5-6). Длинные и сверхдлинные циклы, это, по нашей модели, - хроны и суперхроны (по терминологии, принятой в палеомагнетизме). Казалось бы, длительность цикла может быть очень большой, когда, например, $J = K$, а $\tau \to \infty$, однако, как будет показано ниже, такая ситуация невозможна в системе с самоорганизованной критичностью.

Оценим порядки величин, входящих в выражение τ. Если принять: $C \approx 10^{16}$ (1/см^3), число атомов в одном пузыре (капле) равно, примерно, 10^8, тогда длительность цикла τ (в сек) меняется в интервале: 10^{15} - 10^{11} (от суперхрона ≈ 30 млн. лет, до периода смены полярности МПЗ ≈ 3 т. лет). Величины J, K и $[J - K]$ принимают значения от 10 до 10^5. (К примеру, скорость образования пузырей воды во время кипения при температуре 578 К и атмосферном давлении $J = 10^4$ (см$^{-3}$, с$^{-1}$), что говорит о "разумности" приводимых нами оценок).

Модель цикла. Рассмотрим подробнее, как меняются термодинамические параметры системы (p, V, T) в течение цикла. Еще раз отметим, что процессы, обеспечивающие циклический характер эволюции Земли как термодинамической системы, происходят, согласно нашей модели, в F-слое, где, как отмечалось, наблюдается особенность в dT/dh. (Как будет показано ниже, аналогичные процессы могут иметь место и на границе ядро-мантия, где происходит кристаллизация (плавление) вещества мантии). Градиент dT/dh на кривой фазового равновесия, как мы выяснили, в области F-слоя принимает отрицательные значения (рис. 5-5). Очевидно, что эта особенность должна сказаться на характере процессов, происходящих в области фазовых переходов.

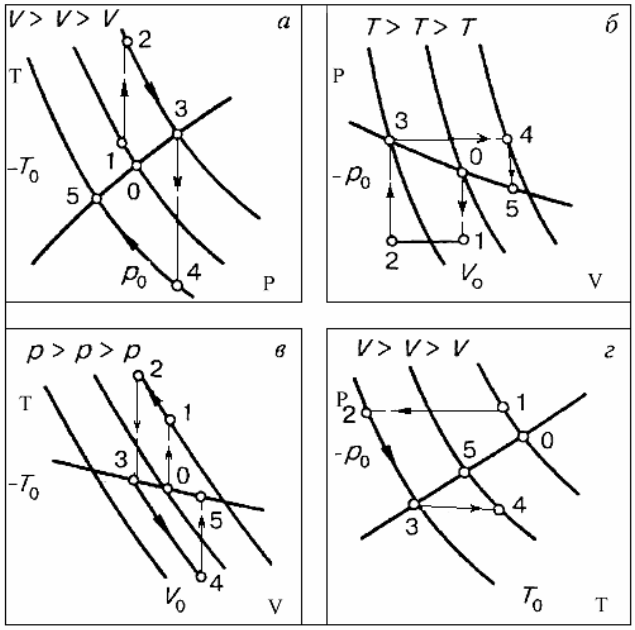


Рис. 5-7. Термодинамические циклы в области F-слоя -*а*, -*б*, -*в* и в области D"-слоя - *г*.

Предположим, что начальная точка [0, (p_o, V_o, T_o)] находится на линии, соответствующей уравнению состояния в термодинамическом равновесии. Допустим, что в силу каких-то причин система была нагрета на величину ΔT, она перешла в состояние, соответствующее точке (1) (рис. 5-7-а). Допустим, что этот нагрев не изменил удельного объема системы V (средней плотности вещества F-слоя ρ). Точка 1 перемещается в этом случае вдоль по адиабате (V = const, см. рис. 5-7 -*а*, -*б*, -*в* и таблицу 5.1). Перегрев системы на ΔT сопровождается преимуществом скорости процессов испарения, над конденсацией (рис. 5-6, $J > K$). Это, в свою очередь, приведет к тому, что некоторая часть вещества,

находящегося в конденсированном состоянии, переходит в газообразное состояние (испаряется) (с большей плотностью). Объем системы уменьшается ($V_2 < V_1$). Рабочая точка системы (показывающая состояние ее термодинамических параметров) перемещается вдоль адиабаты (p = const) в положение 2. В этой точке (2) система имеет максимальные значения температуры и плотности (V - min). Температура системы уменьшается, следуя вдоль адиабаты (V = const) до пересечения ее с кривой уравнения состояния вещества (в точке 3). В этой точке пересыщение S_{II} достигает критической величины и, несмотря на то, что система находится в состоянии термодинамического равновесия ($J = K$), начинается процесс конденсации. Этот процесс идет с расширением объема ($\Delta V = V_4 - V_3$) и уменьшением средней плотности. Система "перескакивает" в точку (4), понижая при этом свою температуру на $\Delta T = T_3 - T_4$. Это понижение температуры, согласно уравнению Клапейрона - Клаузиуса, обязано увеличению давления ($\Delta p = p_3 - p_2$), $\Delta T/T = - \Delta p/\Delta\rho\, U_K$. Выделившееся за счет скрытой теплоты конденсации U_K тепло идет на адиабатический нагрев жидкости: $\Delta T \sim U_K/R_g$ и $\Delta T = T_5 - T_4$. Система возвращается на кривую уравнения состояния (в точку 5), однако, если она "проскочит" эту точку, что вполне вероятно, то рассмотренный нами цикл повторится вновь. Если система будет подходить к точке термодинамического равновесия достаточно плавно, т.е. величина $\Delta p = p_5 - p_4$, должна быть малой настолько, чтобы не вызвать заметного увеличения ΔT в точке (5), то время следующего цикла может быть сколько угодно большим ($K \approx J$ и $\tau \to \infty$).

Таблица 5.1

Переход:	T	p	V
0 → 1	↑	↓	0
1 → 2	↑	0	↓
2 → 3	↓	↑	0
3 → 4	↓	0	↑
4 → 5	↑	↓	0

Знаки ↑ и ↓ означают увеличение или уменьшение параметра, 0 - его постоянство.

К

Как следует из нашей модели и рис. 5-7-*а, -б, -в*, в течение цикла в системе происходит необратимое увеличение объема $\Delta V = V_5 - V_o$ и энтропии $\Delta S = S_5 - S_o$. Энтропия принимает максимальные значения, когда система достигает термодинамического равновесия. На Земле, за время цикла, происходит уменьшение температуры $\Delta T = T_5 - T_o$ и давления $\Delta p = p_5 - p_o$. Изменение величины давления Δp и следующее за ним изменение объема ΔV, играют значительную (определяющую) роль в движении вещества ядра и мантии.

Связь термодинамических циклов с геомагнитным полем. Эволюционные циклы, происходящие в F-слое, имеют (в нашей модели) непосредственную связь с изменением величины и полярности магнитного поля Земли. (Генерация магнитного поля, по модели, происходит в области F-слоя). Фазовые переходы и процессы тепломассопереноса, которые здесь происходят, "трассируются" на земной поверхности свободно проникающим сквозь ядро и мантию магнитным полем. Информация о них "записана" в палеомагнитных данных в виде инверсий, изменений величин склонений и наклонений, дрейфа магнитных полюсов и т.п.

Не вдаваясь в обсуждение модели генерации геомагнитного поля, в дальнейшем будем использовать лишь те его особенности, которые помогут разобраться в термодинамике Земли. В основном, это относится к свойству магнитного поля менять свою полярность при смене цикла конденсации на цикл испарения и наоборот. Кроме этого, как указывалось, магнитное поле легко проникает через толщу Земли и "трассирует" процессы, происходящие в области ФП, в пространстве и во времени.

Очевидно, что если явления «трассировки» действительно имеют место, и они, по сути, - электромагнитные явления, а термодинамические процессы имеют конечное (и небольшое) время, то это налагает вполне определенные условия на величину электропроводности вещества внешнего ядра и мантии. По оценкам, электропроводность не может быть выше, чем 10 – 100 $Ом^{-1}м^{-1}$, что исключает возможность нахождения большого (определяющего) количества железа во внешнем ядре.

Цикличность процессов в D"-слое. На границе ядро-мантия, по нашей модели, реализуется фазовый переход первого рода кристаллизация-плавление. Процессы, происходящие здесь, в некотором роде аналогичны тем, которые мы рассматривали для F-слоя. Действительно, кристаллизация (как и конденсация) происходит с выделением скрытой теплоты фазового перехода $U_П$, а плавление (как и испарение) - с поглощением $U_П$. При кристаллизации объем системы увеличивается, при плавлении - уменьшается, т.к. плотность вещества в расплавленном состоянии в ядре больше плотности вещества мантии. (Здесь прослеживается аналогия с системой "вода-лед", см. Главу 4).

Аналогично предыдущему, используя уравнение Клапейрона-Клаузиуса, получаем, что при выполнении этих условий, в области фазовых переходов уменьшение давления в системе вызывает рост температуры и наоборот. Казалось бы, разумно предположить, что и на этой границе могут реализовываться эволюционные циклы, похожие на рассмотренные нами выше. Если обозначить скорость плавления через M (melting), а скорость кристаллизации через C (crystallization), в тех же единицах ($1/см^3 \cdot с$), то длительность такого цикла, по аналогии, $\tau \sim 1/[M - C]$, должна быть примерно в 20-30 раз больше чем длительность цикла J - K. Различие в длительностях циклов обязано тому, что процессы кристаллизации и плавления заметно медленнее конденсации и испарения, а также тому, что величина $U_П$ примерно в 20 раз меньше чем $U_К$. Еще одним отличием этого цикла от рассмотренного, может служить то, что фазовые переходы первого рода кристаллизация-плавление уже не связаны с генерацией магнитного поля и они полем не "трассируются". Возможно, явления, происходящие в области F-слоя, могут оказывать влияние на циклы, происходящие на границе ядро-мантия (т.е. в области D"-слоя). Рассмотрим этот цикл подробнее.

pT диаграмма состояния вещества может быть представлена в виде семейства кривых ($p \sim 1/T$), характерных для различных удельных объемов V (средней плотности вещества D"-слоя). Эти кривые пересекает линия, показывающая распределение температуры dT/dp (рис. 19-7-г). Представим себе, что начальное состояние системы характеризуется точкой [0, (p_o, T_o, V_o)]. Охладим систему без изменения величины V. Рабочая точка переместится в положение (1) вдоль кривой V- const. Охлаждение приведет к усилению процессов кристаллизации (1→2), связанных с изменением V. Выделившаяся теплота перехода U нагреет систему (2→3, по линии V-const). Нагрев вызовет плавление части вещества (3→4) и связанное с ним охлаждение (4→5). Цикл замкнулся. При этом произошло уменьшение температуры и давления и увеличение объема системы ($\Delta V = V_5 - V_o$).

Обратим внимание на два момента. Если в рассматриваемом нами цикле, когда система находится в точке (3), каким либо способом отвести из системы расплавленное вещество, то она в большей степени, чем раньше, увеличит свой объем ($\Delta V = V_3 - V_o$). (Этот случай может оказаться интересным для модели плюмов). Если на систему, в которой происходит рассматриваемый нами цикл, можно оказать внешнее влияние,

например, путем изменения внешнего (относительно системы) давления, то характер цикла может измениться. Поясним сказанное на примере. Допустим, что на Земле одновременно происходят фазовые переходы в F-слое и D"-слое. Как отмечалось, импульсное давление Δp, возникающее в области F-слоя, передается через внешнее ядро к D"-слою. Это давление может оказать влияние на характер фазовых переходов "плавление-кристаллизация" вещества мантии. Увеличение Δp, если оно происходит в фазе кристаллизации, понижает температуру кристаллизации увеличивая ее скорость и, в конечном счете, увеличивает ΔV. Наоборот, уменьшение Δp в этой фазе цикла приведет к увеличению T и уменьшению ΔV. В фазе плавления должны наблюдаться обратные явления: увеличение Δp понижает температуру плавления, что приводит к уменьшению объема системы и т.д.

Изменения объема системы, иначе, объема мантии, реализуются посредством гидродинамических движений (течений). Эти течения происходят под действием как внутренних, эндогенных сил (рассматриваемых нами в главе Геодинамика), так и под воздействием, например, сил, связанных с вращением Земли. В конечном счете, Земля, ее ядро, мантия и кора должны быть приведены в состояние гидростатического равновесия. Механизмом реализации этого является движение сплошной среды. В частности, в геодинамике, он реализуется, как будет показано в этой главе, как растекание поверхностного слоя литосферы.

5. 6. Гидродинамика F-слоя.

Выше мы рассмотрели роль фазовых переходов (ФП) в эволюции Земли. Смена режима ФП с преимущества конденсации над испарением (или наоборот) вызывает замену цикла расширения циклом сжатия, смену полярности геомагнитного поля и т.д. Однако представляет несомненный интерес понять, как ведет себя такая термодинамическая система как Земля в спокойные периоды времени, в промежутке между этими грандиозными событиями. Это тем более интересно, т.к. сейчас Земля, по-видимому, переживает именно такой период. Как известно, в настоящее время она находится в фазе сжатия, т.е. немного уменьшает свой радиус, а амплитуда геомагнитного поля весьма стабильна и, тоже очень понемногу, - уменьшается. Разумно допустить, что в такой ситуации pT-параметры в области ФП во времени, значительно не изменяются. Предположим, что такая термодинамическая система должна стремиться поддерживать температуру ФП на одном уровне. Очевидно, что особую роль в этом процессе играют гидродинамические и тепловые переносы, происходящие в области F-слоя. Необходимо учитывать, что все эти явления происходят на фоне постоянного охлаждения Земли.

Уравнения теплового баланса. Система, включающая в свой состав фазовый переход первого рода, не может быть стационарной. Даже, если в течение некоторого периода времени, смены режима конденсации на испарение (или наоборот) не происходит, система охлаждается за счет отвода тепла. Температура фазового перехода (ТФП) при заданной величине давления величина постоянная, т.к. она должна поддерживаться на одном уровне, в системе реализуется кондуктивный или конвективный теплоперенос, обеспечивающий постоянство T. В последнем случае, возникает гидродинамический перенос массы. Это, как правило, в сферической системе радиальный перенос. Однако ряд обстоятельств, связанных с неравномерностью нагрева слоя ФП и вращением Земли (рассматриваемой нами системы), приводят к появлению так называемого «теплового ветра», не равномерного по поверхности ФП. Возникновение условий для возбуждения теплового ветра следуют из уравнений теплового баланса, а его гидродинамика, - из соблюдения требований, предъявляемых к вращающемуся «тонкому слою». Запишем основные уравнения:

Уравнение неразрывности:

$$\partial\rho/\partial t + div\,(\rho v) = 0 \qquad (5.11)$$

означает, что скорость локальных изменений плотности балансируется дивергенцией потока массы. Во вращающихся системах (Ω - частота вращения Земли) вместо него используется уравнение геострофического баланса (геострофического равновесия) между ускорением Кориолиса и градиентом давления:

$$2\Omega u = g\,\partial\eta/\partial x, \qquad (5.12)$$

где η - отклонение (возмущение) от потенциальной поверхности, u – скорость гидродинамического переноса.

В системах с ФП этот баланс, возможно, не выполняется в силу того, что сам фазовый переход, когда он «заморожен» (см. ниже) может быть дивергентным.

Уравнение гидростатики:

$$p = \rho g \eta. \qquad (5.13)$$

Уравнение сохранения количества движения в вязкой среде определяется вторым законом Ньютона:

$$\rho\partial v/\partial t = -\,grad\,p + \rho P + \mu\nabla^2 v + (\lambda + \mu)\,grad\,div\,v, \qquad (5.14)$$

где p – сила, приводящая систему в движение со скоростью v, в среде с вязкостью λ и μ.

Эти уравнения необходимо дополнить первым законом термодинамики:

$$\rho de/dt = -p\rho d(\rho^{-1})/dt + k\nabla T + \chi + \rho Q, \qquad (5.15)$$

где e – внутренняя энергия единицы массы, k – коэффициент теплопроводности, χ- приток тепла из-за вязкой диссипации, Q – скорость потока тепла.

Скорости сейсмических волн в F-слое. Как и в случае с плотностью и химическим составом вещества внутреннего ядра, распределение скоростей звука (P-волн) в области F-слоя, пограничного с внутренним ядром, неоднозначно. Воспользуемся трактовкой Джеффриса, согласно которой, скорость звука на границе F-слоя и E-ядра уменьшается от 10,4 до 9,5 км/с, а затем, возрастает до 11,2 км/с на границе F-слоя и внутреннего G-ядра. Заметим, что поведение скорости P-волн в области F-слоя типично для распределения скорости звука в двухфазной среде (Ландау, Лифшиц, 1986): в области фазового перехода на границе жидкость-пар она всегда меньше скорости звука в жидкости (1-я фаза) и меньше скорости звука в газе (2-я фаза): Скорость звука в жидкости с небольшим количеством пара в виде пузырьков ($v_{ж}$):

$$v_{ж} = U\mu p V_1/R_g T\,(c_{p1}T)^{1/2}, \qquad (5.16)$$

V_1 - удельный объем первой фазы. Скорость звука в паре (газе) с незначительным количеством жидкости в виде капелек ($v_{г}$):

$$1/v^2_{г} = \mu/RT - 2/U + c_{p2}T/U^2. \qquad (5.17)$$

Сравнивая скорости $v_{ж}$ и $v_{г}$ со скоростями в жидкости и газе, видим, что они действительно меньше.

Как показано Кутателадзе и Накоряковым (1984), подобное распределение скоростей звука в смеси жидкости и газа может говорить о некоторых особенностях системы с фазовым переходом (ФП). В частности, на величины скоростей звука в двухфазной среде существенное влияние оказывает характер процессов ФП и особенности тепломассобмена между фазами. При написании уравнений термогидродинамики в ряде случаев учитывается наличие источников и стоков вещества в потоке и проницаемость стенки. В случае квазиравновесной парожидкостной смеси используются соотношения термодинамического равновесия. В качестве параметров состояния используются энтальпия (теплота ФП) и давление на линии насыщения. В результате решения уравнений движения получается выражение для скорости движения парожидкостной смеси, как правило, в виде числа Маха (отношения скорости переноса к скорости звука).

Аналогичная картина понижения скорости P-волн наблюдается в области F-слоя. Это обстоятельство подтверждает нашу модель (по крайней мере, ей не противоречит), согласно которой в переходном F-слое имеет место фазовый переход первого рода “конденсация-кипение”. По-видимому, есть основания рассматривать процессы в F-слое в

контексте гидродинамических явлений с ФП в земной атмосфере. Можно допустить, что в двухфазной среде в слое между внутренним и внешним ядром могут образовываться термические геострофические ветры и происходить вязкие переносы вещества.

Для сравнения, рассмотрим точку зрения на эту проблему С.И. Брагинского, который, по мнению Паркинсона (1986, стр. 169) «впервые предложил процесс затвердевания жидкого железа на границе между внутренним и внешним ядром». По мнению Брагинского (1963), внешнее ядро состоит из железа с некоторой более легкой добавкой кремния. В этой смеси больше железа, чем в эвтектике, поэтому после затвердевания твердая фаза состоит из чистого железа; в жидкой фазе остается больше легкой компоненты, и поэтому её плотность меньше плотности окружающей жидкости. Таким образом, если затвердевание происходит на границе внутреннего ядра, оставшаяся в жидкой фазе более легкая составляющая поднимается через внешнее ядро, инициируя движение жидкости в радиальном направлении. Таким образом, происходит вымораживание легкой компоненты при кристаллизации, что является источником тепла и используется для энергетического обеспечения динамо. Брагинский, так же как и в нашей модели, использует гипотезу Джеффриса о падении скорости в F-слое и объясняет этот факт увеличением плотности в слое, связанным с изменением концентрации по линии ликвидуса. Эту точку зрения разделяют многие специалисты. По моему мнению, Брагинским предложен структурный фазовый переход, о возможности использования которого речь шла в 18 главе. Повторим вывод, к которому мы пришли, обсуждая задачу кристаллизации: «полученные Лангером решения задачи Стефана показывают, что только за счет изменения концентрации примесей достичь эффекта кристаллизации невозможно. Поэтому, общепринятый в физике Земли подход к проблеме кристаллизации внутреннего ядра из расплава внешнего, по всей видимости, неверен”.

Уравнение теплового (геострофического) ветра. Как неоднократно отмечалось, в F-слое происходит ФП «испарение-конденсация». Как будет показано в разделе IV, именно в этом слое реализуется механизм генерации геомагнитного поля. Именно в этом слое обнаружена сейсмическая анизотропия. По-видимому, именно в этом слое наблюдается западный перенос анизотропии, именно в этом слое (по модели) реализуется западный дрейф геомагнитного поля, как его не дипольной составляющей, так и фокусов векового хода. В нашей модели генерации геомагнитного поля используется возможная аналогия между гидродинамическими явлениями, происходящими в F-слое, и явлениями в атмосфере, и океане Земли. В этой связи представляет несомненный интерес найти аналогию между геофизической гидродинамикой атмосферы и океана (Педлоски, 1984) и возможными явлениями, происходящими в этом слое. Основанием для такой аналогии являются ряд обстоятельств. Во-первых, это то, что линейный размер циркуляций в F-слое (например, таких как глобальные магнитные аномалии, или фокусы векового хода) значительно превышает толщину слоя (Кузнецов, 1995). Во-вторых, известно, что в атмосфере постоянно происходят процессы конденсации-испарения воды, приводящие, в конечном счете, к возникновению электрических зарядов, разделению их в гравитационном поле Земли и образованию двойного электрического слоя. Этот процесс в атмосфере приводит к возникновению ионосферного динамо (*Sq*-вариации). По-видимому, примерно так же происходит генерация магнитного поля за счет динамо в F-слое. Скорость звука и температура атмосферы в области ФП понижается, аналогично тому, как это имеет место в F-слое, в-третьих, и т.д. Если наша посылка справедлива, то на процессы, происходящие в F-слое, определяющее влияние оказывает вращение Земли и характер градиента давлений (барического градиента). Эти условия определяют т.н. геострофическое приближение (Гилл, 1986):

$$1/\rho\, \partial p/\partial x + lv = 0; \quad -1/\rho\, \partial p/\partial y - lu = 0;$$

где v, u – компоненты скорости геострофического ветра, l –параметр Кориолиса:

$$l = 2\Omega \sin\varphi.$$

Геострофическое приближение весьма грубо описывает реальную ситуацию в атмосфере, тем не менее, основные моменты, связанные с образованием и направлениями ветров, совпадают. Например, на экваторе, где $l \rightarrow 0$, геострофическое приближение не выполняется, поскольку здесь градиент давления $\partial p/\partial n$ не может уравновеситься силой Кориолиса (Динамическая метеорология, 1976). В этой зоне условия равновесия могут достигаться только на круговых изобарах, когда сила барического градиента уравновешивается центробежной силой. Скорость переноса определяется формулой:

$$u = (r/\rho \cdot \partial p/\partial r)^{1/2}.$$

Из формулы следует, что в экваториальной зоне существуют только циклонические образования, т.к. производная $\partial p/\partial r$ должна быть положительной величиной.

Проводя дальнейшую аналогию между процессами, происходящими в F-слое и на поверхности Земли, в атмосфере и океане, приходим к предположению о том, что, как в атмосфере и океане, в слое между внутренним и внешним ядром явления происходят в тонком слое, а не по всей его толщине. Причина здесь та же, что и в гидродинамике атмосферы и океана. Дело в том, что вертикальные ускорения в динамике практически всегда меньше величины g. Поэтому, несмотря на то, что в F слое могут возникать течения, они всегда происходят в тонком слое. Скорость звука в F слое, как мы отмечали, ниже, чем в G и E ядре. В этой связи можно принять, что обе границы можно рассматривать (условно, конечно) как стенки. Вязкий тонкий слой у «стенки», в котором происходит перенос вещества, называется экмановским слоем. Число Экмана E характеризует отношение силы трения к ускорению Кориолиса: $E = \nu/2\Omega L^2$. Если коэффициент кинематической вязкости ν порядка 10^6 см c^{-2} (Кузнецов, 1995), а характерный размер вихря в экмановском слое 100 км, то $E = 10^{-4}$. Конечно, эта оценка примерно на 10 порядков больше, чем экмановское число в океане (Педлоски, 1984), но, тем не менее, оно значительно меньше единицы и говорит о том, что для крупномасштабных движений силами трения можно пренебрегать.

Если: $L/V > \Omega^1$, где Ω - частота вращения Земли, L – линейный размер циркуляций, а V- скорость течения, то это условие эквивалентно:

$$\varepsilon = V/2\Omega L < 1,$$

где ε - число Россби. Оценка числа Россби в F-слое, если положить L равным примерно 100-1000 км, а V равной скорости западного дрейфа (≈ 0.1-1 °/год, или, для F-слоя, это ≈ 0.01-0.1 см/с) показывает, что это условие выполняется и процессы, здесь происходящие, можно рассматривать как гидродинамику в тонком слое. Определяющей в этом случае является сила Кориолиса, а вращение слоя в очень малой степени отличается от твердотельного.

Считается, что горизонтальный градиент давления в атмосфере и океане обязан неравномерности температуры тонкого слоя. Именно наличие градиента температуры является причиной постоянных, западных и восточных ветров в атмосфере и течений в океане. Как известно, смена направления ветров происходит синхронно со сменой времени года. В F слое, по всей видимости, так же существуют ветры: один из них имеет западное направление, другой – восточное. Один существует в слое, расположенном около внешнего ядра, другой – около внутреннего. Если допустить реальность такого предположения, то многие вопросы физики Земли находят простое и непротиворечивое объяснение. В частности, объясняется обнаруженное недавно с помощью splitting функций отсутствие дифференциального вращения внешнего ядра, с одной стороны, и явное наличие какого-то переноса в области границы внутреннего ядра, отмеченное при проведении экспериментов по travel-time. Можно упомянуть западный перенос фокусов векового хода, перемещающихся в F слое (см.раздел IV) и т.д. Наличие двух ветровых переносов, направленных в противоположные стороны, может оказаться основой в динамо-модели генерации геомагнитного поля.

Имеются ли основания для подобного утверждения? Для того чтобы утверждать, что гидродинамический перенос происходит в непосредственной близости от «стенки» –

будь то внутреннее «твердое» ядро, или слабо вязкое (но жидкое) внешнее ядро, необходимо найти причину возникновения необходимых условий. Одно из таких условий мы отмечали, - это неравномерный нагрев внутреннего ядра и возникновение избыточного тангенциального давления. Однако этого не достаточно, необходимо найти причины, по которым "струя" будет прижиматься к стенке. Согласно нашей модели, около внутреннего ядра вещество находится в состоянии «капель в пересыщенном паре», около внешнего ядра, - в состоянии «пузырей пара в кипящей жидкости». Ближе к «стенке» размеры «капель» и «пузырей» - будут больше. Воспользуемся хорошо известным подходом, развитым Чепменом и Энскогом в кинетической теории газов, когда они уподобляли газовые молекулы жестким упругим шарам, размером δ. Вязкость такой среды η: $\eta \approx 0.5\rho v/2\pi n\delta^2$. Здесь v – тепловая скорость молекул, n – их концентрация. Вязкость среды тем меньше, чем больше размер частиц. Этот факт может объяснить прижим гидродинамического переноса к «стенке». Кроме этого, этот факт может объяснить сравнительно небольшую величину вязкости ($\nu < 10^6 см^2/с$), полученную из условия ограничения толщины экмановского слоя (Кузнецов, 1995).

Обсуждая один из самых главных и принципиальных вопросов физики Земли, - её термодинамику, никогда нельзя быть уверенным в том, что все, или, по крайней мере, большинство из проблем решены и достигнута требуемая ясность. Подводя итоги этой главы, можно отметить ряд моментов, установленных с достаточной «прочностью».

Во-первых, это то, что адиабата Пуассона в принципе неприменима для такой структуры, как Земля, а использование адиабаты Гюгонио автоматически приводит нас к модели горячей Земли.

Во-вторых, только горячая модель, где постулируется идея охлаждения Земли, может «обеспечить» наличие циклов, так уважаемых геологами.

В-третьих, положенная в основу модели идея фазового перехода на границе внутреннего ядра, может оказаться весьма плодотворной, так как она дает исследователю единый источник теплового потока, дрейфа материков, геомагнитного поля и т.п. В нашей модели, система стремится поддерживать постоянной температуру ФП. Этот факт, как будет показано в 20-ой главе, обеспечивает практически все свойства геомагнетизма, которые, собственно, имея термодинамическую причину, геомагнитным полем только «трассируются».

Ряд вопросов, обсуждаемых нами в этой главе, имеет явно дискуссионный характер. В первую очередь, и в основном, это относится к идее использования плазма-кристалла, как вещества внутреннего ядра. Оправдывающим автора обстоятельством является тот факт, что никакого другого, более подходящего состояния вещества в природе, по-видимому, нет, или оно физикам (или автору) ещё не известно. Свойства вещества внутреннего ядра столь экзотичны, что пришлось пойти на такой шаг. Железо категорически не подходит в качестве материала для внутреннего и внешнего ядра. Никакие добавки к железу не спасают этого положения, так как иначе приходится нарушать законы термодинамики.

Литература

Басов Н.Г., Захарченков Ю.А., Зорев Н.Н. и др. Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером. Итоги науки и техники. Сер. радиотехника Т. 26. М.: ВИНИТИ 1982. 365с.

Брагинский С.И. О строении слоя F и причинах конвекции в ядре Земли. ДАН СССР. 1963. Т. 149. № 6. С. 1311-1314.

Бражкин В.В., Ляпин А.Г. Универсальный рост вязкости металлических расплавов в мегабарном диапазоне давлений: стеклообразное состояние внутреннего ядра Земли. УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 535-551.

Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир. 1986. 397 с.
Динамическая метеорология. Под ред. Д.Л.Лайхтмана. Л.: Гидрометеоиздат 1976. 607 с.
Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высоко температурных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966. 686 с.
Кузнецов В.В. Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности. Новосибирск: ИГиГ. 1985. 71 с.
Кузнецов В.В. Глобальные магнитные аномалии и фокусы векового хода как гидродинамические вихри Россби. ДАН. 1995. Т. 340. № 5. С. 685-687.
Кузнецов В.В. Земля как термодинамическая система. Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 7. С.987-1007.
Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газо-жидкостных системах. Новосибирск: Наука. 1984. 301 с.
Кюнци Г-У. Механические свойства металлических стекол. В сб. Металлические стекла. Вып. II (Под. ред. Г. Бека и Г. Гюнтеродта) М.: Мир. 1986. С. 199-255.
Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука. 1964. 567 с.
Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 733 с.
Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.
Мясников В.П., Фаддеев В.Е. Модели эволюции Земли и планет земной группы. М.: ВИНИТИ. 1980. 232 с.
Озима М. Глобальная эволюция Земли. М.: Мир. 1990. 164 с.
Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир. 1986. 527 с.
Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. М.: Мир. 1984. 811 с.
Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 345 с.
Федер Г. Фракталы М.: Мир. 1991.
Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 404 с.

Boehler R., von Bargen N., Chopelas A. Melting, thermal expansion, and phase transitions of iron at high pressures. J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N. B13. P. 21731-21736.
Boehler R. Temperatures in the Earth's core from melting-point measurements of iron at high static pressures. Nature. 1993. V. 363. P. 534-536.
Brown J.M., McQueen R.G. Phase transitions, Gruneisen parameter, and elasticity for shocked iron between 77 GPa and 400 Gpa. J. Geophys. Res. 1986. V. 91. N. B7. P. 7485-7497.
Cavazzoni C., et al. Superionic and metallic states of water and ammonia at giant planet condition. Science. 1999. V. 283. P. 44-46. DOI: 10.1126/science.283.5398.44
Duba Al. Earth's core not so hot. Nature. 1992. V. 359. P. 197-198.
Grover R. Experimental and theoretical constraints on the iron equation of state. J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N. B13. P. 21743-21748.
Mao H.K., Wu Y., Chen L.C. et al. Static compression of iron to 300 Gpa and $Fe_{0.8}$ $Ni_{0.2}$ alloy to 260 Gpa: implications for composition of the core. J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N. B13. P. 21737-21742.
Marris E. Water in this bizarre state would be as hard as iron and glow yellow. Nature. 2005. doi:10.1038/news050321-4
Saxena S.K., Shen G., Lazor P. Temperatures in Eart's core based on melting and phase transformation experiments on iron. Science. 1994. V.264. P. 405-407.
Thomas H., Morfill G.E., Demmel V., et al., Plasma crystal: coulomb crystallization in dusty plasma. Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. N. 5. P. 652-655.
Van Horn H.M. Dense astrophysical plasmas. Science. 1991. V.252. P. 384-389.
Wigner E.R. On the interaction of electron in metals. Phys. Rev. 1934. V. 46. P. 1002-1100.

Глава 6. Место Земли в Солнечной системе, закон Тициуса-Боде, соразмерности и резонансы планет и спутников в Солнечной системе: общность и различия, планеты других звезд.

В главе 6 приводятся некоторые сведения о Солнце, о месте Земли в Солнечной системе, об устройстве самой Солнечной системе: законе планетарных расстояний (законе Тициуса-Боде), соизмеримостях и резонансной структуре Солнечной системы, об общих закономерностях движения планет, об эволюции взглядов на устойчивость Солнечной системы. Приводятся сведения об особенности динамической эволюции малых тел Солнечной системы и роли Луны, о хаосе в наклонах осей вращения планет, об эволюции орбит планет на очень больших интервалах времени.

6. 1. Солнце.

Радиус	$6.9599 \cdot 10^{10}$ см
Объем	$1.4122 \cdot 10^{33}$ см^3
Площадь поверхности	$6.087 \cdot 10^{22}$ см^2
Масса	$1.989 \cdot 10^{33}$ г
Средняя плотность	1.409 г/см^3
Ускорение силы тяжести на поверхности	$2.7398 \cdot 10^4$ см/с^2
Центробежное ускорение на экваторе	0.578 см/с^2
Светимость	$3.826 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Поток излучения с единицы поверхности	$6.27 \cdot 10^{10}$ эрг/см^2 с
Момент инерции	$5.7 \cdot 10^{53}$ г·см^2
Угловая скорость вращения (на широте 16º)	$2.865 \cdot 10^{-6}$ рад/с
Момент количества движения	$1.63 \cdot 10^{48}$ г·см^2/с
Энергия вращения	$2.4 \cdot 10^{42}$ эрг
Работа рассеяния вещества Солнца в бесконечность	$6.6 \cdot 10^{48}$ эрг
Полная внутренняя лучистая энергия	$2.8 \cdot 10^{47}$ эрг
Скорость освобождения на поверхности	617.7 км/с
Магнитное поле вблизи полюсов при мин. пятен	1 Гс
Спектральный тип	G2V
Эффективная температура	5770 К
Скорость движения относительно ближайших звезд	19.7 км/с
Возраст	$5 \cdot 10^9$ лет
Температура, плотность, давление в центре	$15 \cdot 10^6$К; 160 г/см^3; $3.4 \cdot 10^{17}$ дин/см^3

***Солнце*,** это звезда спектрального типа G2V, представляет собой плазменный шар в центре Солнечной системы. Солнце содержит 99.86% всей массы системы. Масса Солнца $M_\odot \approx 2 \cdot 10^{33}$ г, радиус $R_\odot = 6.96 \cdot 10^{10}$ см, он в 109 раз больше земного. Солнце состоит на 68 % из водорода и 30 % - гелия. Все остальные элементы составляют 2% его массы. Температура в центре Солнца 16 млн. градусов. Принято считать, что энергия Солнца реализуется за счет термоядерного синтеза гелия из водорода. Плотность солнечного вещества в его центре достигает 160 г/см^3. По мере удаления от центра Солнца температура и плотность газа (плазмы) падают и на расстояниях, больших 0.7 – 0.8 $R_\odot$, уже могут существовать нейтральные атомы, которые оказывают существенное влияние на процессы переноса тепла и излучения от центра Солнца к его периферии (см. рис. 6-1). Рисунок дает представление о внутреннем устройстве Солнца. Очевидно, что чем глубже, тем должно быть горячее. Вопрос вызывает резкое понижение температуры на границе Солнца в т.н. фотосфере. Аналогичная ситуация наблюдается и на Земле, это известное явление температурной инверсии, но она связана с внешним источником – тем же Солнцем. Почему же такое

происходит на солнечной «поверхности»? Это явление обязано интенсивному охлаждению за счет излучения, поэтому самая холодная на Солнце зона называется фотосферой. Следующий выше фотосферы газ нагревается солнечным излучением в хромосфере и медленно охлаждается в солнечной короне, которая распространяется до 5 астрономических единиц (АЕ – расстояние от Земли до солнца), т.е. практически до орбиты Юпитера. Одним словом, мы живем на Земле непосредственно в солнечной короне (СК).

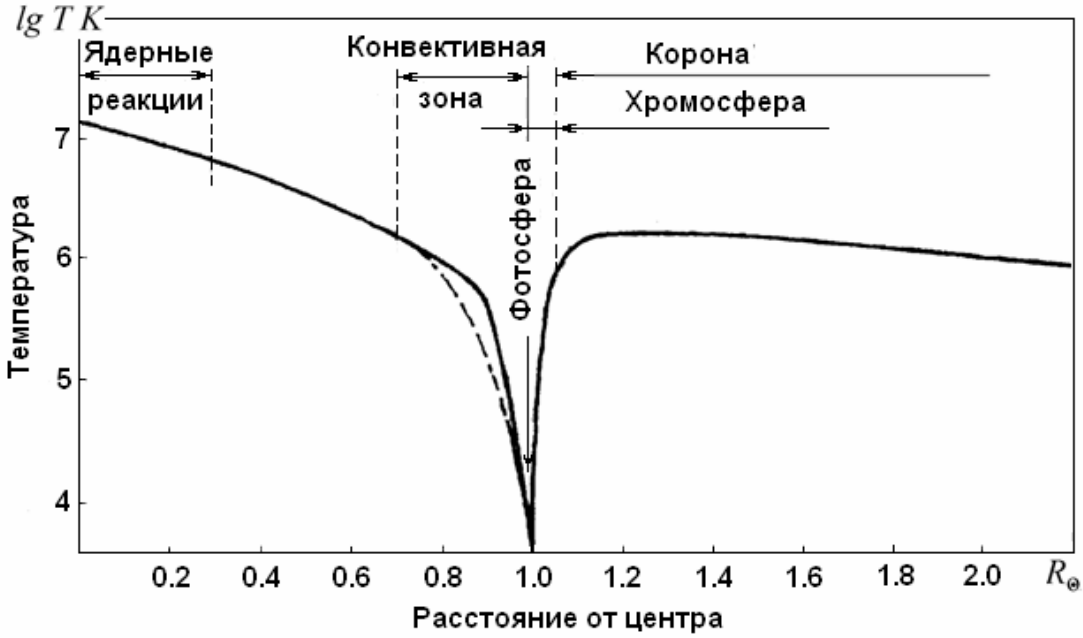


Рис.6-1. Распределение температуры по радиусу Солнца и его ближайшей окрестности.

Солнечная корона – внешняя, наиболее горячая и разреженная часть атмосферы Солнца. Температура СК достигает 2 млн. градусов в непосредственной близости от Солнца и падает до 100 000 К вблизи орбиты Земли. Корональная плазма полностью ионизована, её химический состав практически тот же, как в солнечной фотосфере. Концентрация плазмы солнечной короны очень мала, поэтому она не принимает участие в излучении, и именно потому столь высока её температура. В наиболее активных районах СК возникают солнечные вспышки, корональные дыры, флокулы, спикулы, протуберанцы и т.д. (рис. 6-2).

Солнечная постоянная. Солнечная постоянная (СП), это полное количество лучистой энергии Солнца, падающее вне атмосферы Земли на площадку единичной площади, расположенную перпендикулярно солнечным лучам на расстоянии от Солнца, равном 1 астрономической единице. Она равна 1369 ± 14 Вт/м^2. В начале 80-х годов было обнаружено, что СП меняется во времени с амплитудой 0.1-0.2 % в соответствии с изменением солнечного цикла. Уменьшение СП связано с появлением на Солнце очень больших групп пятен, увеличение СП, - с солнечными факелами. Величина СП + альбедо (способность отражения падающего излучения) Земли – определяют среднюю температуру Земли и оказывают решающее значение на климат.

Солнечная активность. Проявляется во всей совокупности нестационарных процессов на Солнце и его атмосфере: возникновение и исчезновение пятен, протуберанцев, факелов, флокул. Возрастание ультрафиолетового, рентгеновского, радиоизлучения и вспышки на Солнце, так же входят в арсенал солнечной активности (СА). Все эти проявления СА, как правило, тесно связаны между собой.

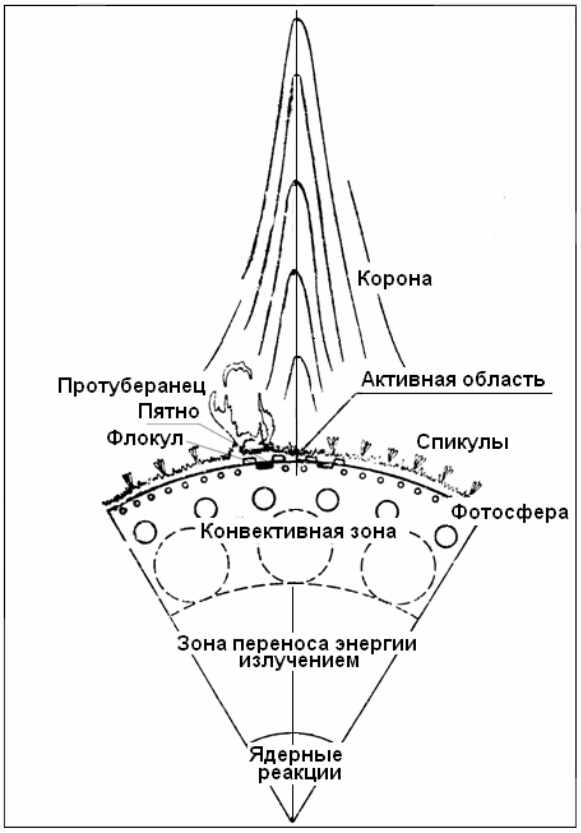


Рис. 6-2. Активные события в хромосфере Солнца.

Солнечные циклы.

Один из ведущих специалистов по солнечно-земной физике профессор университета на Аляске С. Акасофу, подводя итоги 20 века в этой области наук, напомнил, что в 1892 г. Лорд Кельвин писал « .. разработанная Максвеллом электромагнитная теория нашла решение многих проблем… Кажется, мы можем прийти к заключению, что предположение о связи между магнитными бурями и солнечными пятнами нереально ..». С другой стороны, сравнивая записи солнечной и магнитосферной активности, Маундер (1905) заключил: «источник магнитных бурь, это Солнце». Позже он заметил: «солнечные пятна и магнитные штормы родственны друг другу, когда нет магнитных возмущений, значит, не было пятен» (International SCOSTEP Newsletter, V. 2. # 3. 1999). Акасофу отмечает, что, несмотря на весь мировой опыт исследований солнечно-земных связей, неясными остаются такие проблемы, как: природа солнечного ветра, природа солнечной короны, причина появления солнечных транзиентов и т.д. Фактически он перечисляет все основные проблемы этой области физики. Отсюда следует, что основные моменты солнечно-земных связей изучены ещё недостаточно для понимания проблемы.

В этой же заметке Акасофу приводит Солнечные циклы с 18-го по 23-ий, – современный (рис. 6-3), и сравнивает современный цикл с предыдущими - 22-ым и 17-ым. Рисунок 6-3 можно принять за основу при составлении прогноза циклов на несколько следующих лет. Видно, что максимум солнечной активности должен прийти примерно на начало 2001 года, после чего должно наступить её уменьшение.

Солнечный цикл – периодический процесс появления и развития на Солнце активных областей – пятен, мест выхода на поверхность сильных магнитных полей. Этот процесс затрагивает весь диск Солнца и все уровни его атмосферы. Сильнее всего солнечная активность проявляется в широтной зоне $\pm 30°$. Центры активности появляются в начале цикла на широтах около 30°, а затем зона, занятая ими, постепенно смещается к более низким широтам, т.е. в сторону солнечного экватора. Активные области часто

объединяются в комплексы, которые существуют в течение нескольких лет. Это явление впервые было обнаружено Маундером и получило название «бабочек» Маундера (рис. 6-4).

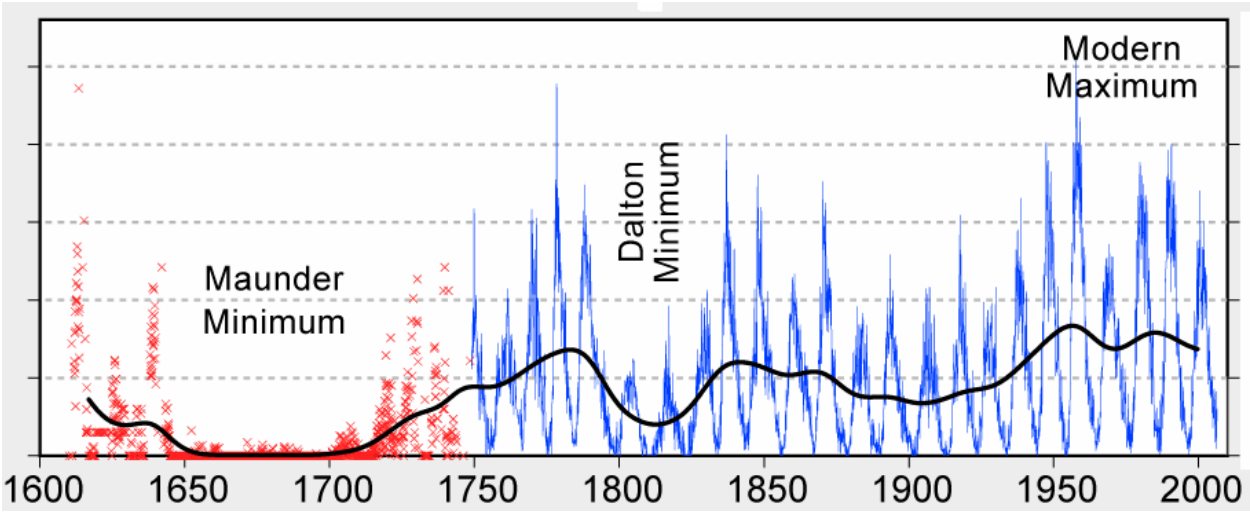


Рис. 6-3.Циклы солнечной активности.

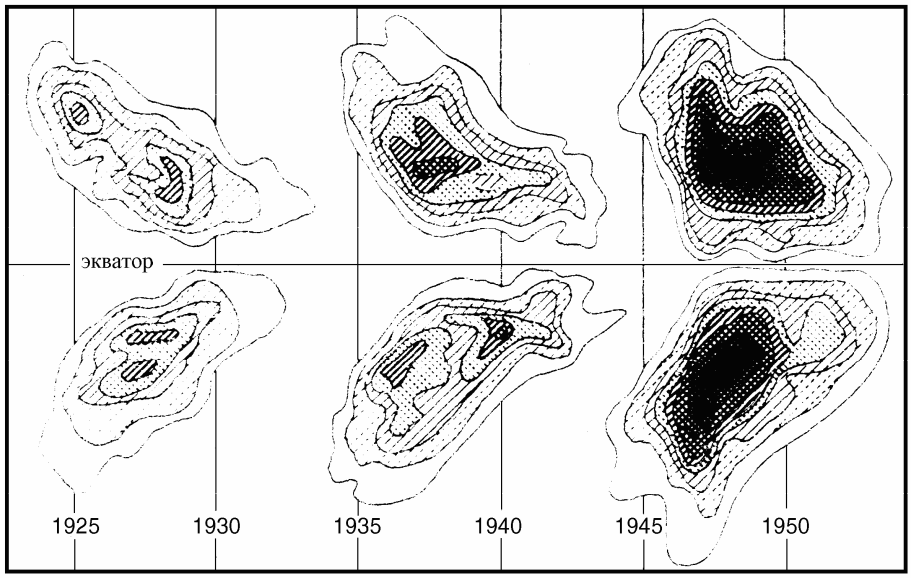


Рис. 6-4. Пространственное и временное распределение солнечных пятен по диску Солнца - «бабочки» Маундера.

Солнечные циклы обозначаются либо числами Вольфа – относительным числом и площадью солнечных пятен, либо интенсивностью потока радиоизлучения Солнца на волне 10.7 см, или рентгеновского излучения, в диапазоне 2 - 8 ангстрем Å (1Å = 10^{-8} см). Солнечные циклы отождествляют с изменением солнечной активности с периодом ≈ 11.2 года. При этом происходит смена полярности магнитного поля Солнца. Возврат к одной и той же картине магнитного поля происходит примерно через 22 года. Этот цикл принято называть магнитным циклом. Следует обратить внимание на то, что авторы работ по солнечно-земной физике, при обсуждении природы и степени влияния солнечных циклов, всегда упоминают только о пятнах, радиоизлучении и ультрафиолете, и никогда не говорят об их 11-летней цикличности. Хотя принято считать, что самые сильные вспышки происходят в годы наибольшей солнечной активности.

Солнечные вспышки. Солнечные вспышки (СВ), это самое мощное из всех проявлений солнечной активности. В больших СВ выделение энергии достигает 10^{32} эрг за время порядка 1000 с. Это сравнительно большая величина по земным масштабам. Энергия сильнейшего извержения вулкана ~ 10^{27} эрг, землетрясения – 10^{26}, взрыва мегатонной ядерной бомбы - 10^{24}. Основная часть энергии вспышки, которая происходит, как правило, в районе пятна, выделяется в виде выбросов плазмы, движущихся в короне со скоростью 1000 км/с, потоков заряженных частиц, жесткого электромагнитного излучения. Мощная СВ наблюдается как локальное увеличение яркости участка хромосферы Солнца. СВ, это не только корональное, а более сложное явление, физика его ещё недостаточно ясна. Значительная часть (> 90 %) излучения вспышки приходится на рентгеновское и ультрафиолетовое излучение. Оптическое излучение возникает как вторичный эффект. Явление СВ обусловлено накоплением свободной магнитной энергии в верхней хромосфере и нижней короне в виде нескомпенсированных токовых слоев. Слои возникают и формируются, нагревая плазму. Плазма расширяется, в ней возникает турбулентность, снижающая проводимость токовых слоев. Происходит разрыв слоя и выделение колоссальной энергии. Исследование СВ играет огромную роль, т.к. именно вспышки существенно влияют на околоземное космическое пространство. Они оказывают влияние на магнитосферу, ионосферу, общее состояние радиационной обстановки, погоду и состояние биосферы Земли.

Солнечные вспышки делятся на несколько классов: по оптическим характеристикам, по рентгеновскому излучению, по потоку высокоэнергетических частиц и т.д. СВ подчиняются закону фликкер-шума, т.е. наблюдается линейная логарифмическая зависимость энергии вспышки и числа вспышек с этой энергией в определенный промежуток времени. Эта закономерность похожа на известный в сейсмологии закон Гутенберга-Рихтера повторяемости землетрясений.

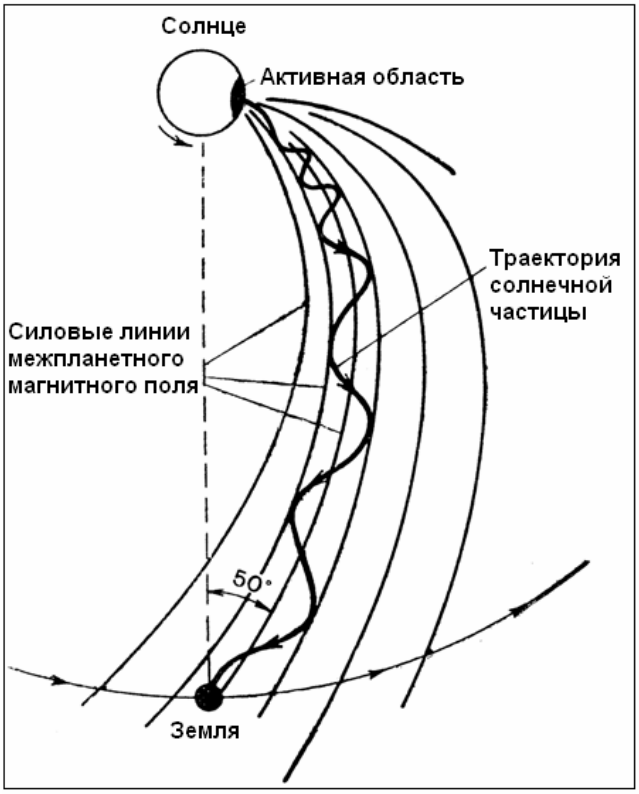


Рис.6-5. Солнце, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле и Земля.

Солнечный ветер - непрерывный поток плазмы солнечного происхождения, распространяющийся приблизительно радиально от Солнца и заполняющий Солнечную систему до гелиоцентрических расстояний R $\rightarrow$ 100 а.е. Солнечный ветер был

теоретически предсказан Паркером, который, анализируя условия равновесия вещества короны, показал, что корона не может находиться в условиях гидростатического равновесия, а она должна расширяться. Впервые потоки плазмы, истекающей из Солнца, были зарегистрированы космическим аппаратом «Луна-2» в 1959 г. и подробно изучены аппаратом «Маринер-2» в течение 1962 года. Солнечный ветер состоит из протонов, двигающихся от Солнца со средней скоростью 400 км/с, концентрацией порядка 10 $см^{-3}$, температурой $5 \cdot 10^4$ К и магнитным полем порядка 10^{-5} Гс. Во время солнечных вспышек скорость частиц в солнечном ветре возрастает до 1000 км/с, возрастает и их концентрация. В плазме солнечного ветра «вморожено» межпланетное магнитное поле ММП. Плазма ветра, взаимодействуя с ММП, вызывает появление ударных волн, которые сжимают магнитосферу Земли, после чего возникают магнитные бури. Линии ММП имеют вид спиралей Архимеда (см. рис. 6-5).

6. 2. Земля в Солнечной системе.

Солнечная система состоит из звезды и обращающихся вокруг неё девяти больших планет, некоторые из них имеют свои спутники, и астероидов. Основная доля вещества сосредоточена в Солнце и лишь около 1/1000 приходится на планеты. Это обстоятельство делает движение планет почти независимым друг от друга на коротких интервалах времени и обусловливает справедливость законов Кеплера:

- орбита каждой из планет представляет собой расположенный в неподвижной плоскости эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце;
- радиус-вектор, соединяющий Солнце с планетой, за равные промежутки времени описывает равные площади;
- квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы их средних расстояний от Солнца.

Таблица 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Планета	Среднее расстояние от Солнца		Сидерический период обращения, земн. годы	Наклонение орбитальной плоскости[1)]	Эксцентриситет орбиты	Экваториальный диаметр, км	Период вращения[2)], земн. сутки	Наклон экватора к орбите	Видимый блеск, зв. вел.	Магнитное поле
	млн. км	а.е.								
Солнце	-	-	-	-	-	1 392 000	24,7	-	26,7	есть
Меркурий	57,9	0,387	0,241	7,0°	0,206	4880	58,7	< 2°	-1,9	есть
Венера	108,2	0,723	0,615	3,4	0,007	12 100	243	177,3	-4,4	нет
Земля	149,6	1,000	1,000	-	0,017	12 756	0,9973	23,5	—	есть
Марс	227,9	1,523	1,881	1,9	0,093	6780	1,026	25,2	-2,8	нет
Юпитер	778,3	5,202	11,862	1,3	0,048	142 800	0,413	3,1	-2,5	есть

Сатурн	1427,0	9,538	29,46	2,5	0,056	120 000	0,443	26,7	-0,4	есть
Уран	2869,6	19,182	84,01	0,8	0,046	50 800	0,718	97,9	+5,7	есть
Нептун	4496,6	30,058	164,79	1,8	0,009	48 600	0,669	29,6	+7,6	есть
Плутон	5900	39,44	247,7	17,3	0,249	2300	6,387	122,5	+14,0	?

[1)] Относительно плоскости орбиты Земли.
[2)] Период сидерического вращения экваториальной области

Таблица 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЦА И ПЛАНЕТ (продолжение)

Планета	Диаметр	Масса	Сила тяжести	Средняя плотность	Атмосфера
	(в единицах земной величины)			($г/см^3$)	
Солнце	109	333 000	28,0	1,41	H, He, и др.
Меркурий	0,38	0,055	0,38	5,42	-
Венера	0,95	0,815	0,89	5,25	CO_2
Земля	1,0	1,0	1,0	5,51	N_2, O_2
Марс	0,53	0,108	0,38	3,96	CO_2
Юпитер	11,2	318	2,5	1,33	H_2, He, и др.
Сатурн	9,4	95	1,1	0,70	H_2, He, и др.
Уран	4,0	14,5	0,9	1,3	H_2, CH_4, и др.
Нептун	3,8	17,2	1,2	1,8	H_2, CH_4, и др.
Плутон	0,18	0,002	∀ 0,06	1,7	CH_4

Таблица 2. СПУТНИКИ ПЛАНЕТ

Название	Радиус орбиты, тыс. км	Период обращения, сут.	Диаметр, км	Кем и когда открыт
Спутник Земли				
Луна	384,4	27,3	3475	-
Спутники Марса				
Фобос	9,4	0,3	21*	Холл 1877
Деймос	23,5	1,3	12*	Холл 1877
Спутники Юпитера				
Метида	128	0,3	(40)	Синнот 1979

Адрастея	129	0,3	(25)	Джюит и др. 1979
Амальтея	181	0,5	195*	Барнард 1892
Теба	221	0,7	(80)	Синнот 1979
Ио	422	1,8	3640	Галилей 1610
Европа	671	3,6	3130	Галилей 1610
Ганимед	1070	7,2	5280	Галилей 1610
Каллисто	1883	16,7	4850	Галилей 1610
Леда	11094	239	(15)	Коуэл 1974
Гималия	11480	251	170	Перрайн 1904
Лиситея	11720	259	(20)	Никольсон 1938
Элара	11737	260	80	Перрайн 1905
Ананке	21200	631	(20)	Никольсон 1951
Карме	22600	692	(30)	Никольсон 1938
Пасифе	23500	735	(40)	Мелотт 1908
Синопе	23700	758	(30)	Никольсон 1914
Спутники Сатурна				
Пан	134	0,6	(20)	Шоуолтер 1990
Атлант	138	0,6	(30)	Террил 1980
Прометей	139	0,6	(110)	Коллинз и др. 1980
Пандора	142	0,6	(100)	Коллинз и др. 1980
Эпиметей	151	0,7	(130)	Фонтейн и др. 1966
Янус	151	0,7	190	Дольфюс 1966
Мимас	186	0,9	390	Гершель В. 1789
Энцелад	238	1,4	500	Гершель В. 1789
Тефия	295	1,9	1060	Кассини 1684
Телесто	295	1,9	(30)	Смит и др. 1980
Калипсо	295	1,9	(30)	Паску и др. 1980
Диона	377	2,7	1120	Кассини 1684
Елена	377	2,7	(35)	Лак и др. 1980
Рея	527	4,5	1530	Кассини 1672
Титан	1222	15,9	5150	Гюйгенс 1655
Гиперион	1481	21,3	300	Бонд и др. 1848
Япет	3561	79,3	1460	Кассини 1671
Феба	12952	550,5	(220)	Пикеринг У. 1898
Спутники Урана				

Корделия	50	0,3	(25)	"Вояджер-2" 1986
Офелия	54	0,4	(30)	"Вояджер-2" 1986
Бианка	59	0,4	(40)	"Вояджер-2" 1986
Крессида	62	0,5	(60)	"Вояджер-2" 1986
Дездемона	63	0,5	(50)	"Вояджер-2" 1986
Джульетта	64	0,5	(80)	"Вояджер-2" 1986
Порция	66	0,5	(110)	"Вояджер-2" 1986
Розалинда	70	0,5	(50)	"Вояджер-2" 1986
Белинда	75	0,6	(70)	"Вояджер-2" 1986
Пэк	86	0,8	(150)	"Вояджер-2" 1985
Миранда	129	1,4	480	Койпер 1948
Ариэль	191	2,5	1160	Лассел 1851
Умбриэль	266	4,1	1170	Лассел 1851
Титания	436	8,7	1580	Гершель В. 1787
Оберон	584	13,5	1520	Гершель В. 1787
Калибан	7169	580	(60)	Глэдман и др. 1997
Сикоракса	12 214	1290	(120)	Никольсон и др. 1997
Спутники Нептуна				
Наяда	48	0,3	(50)	"Вояджер-2" 1989
Таласса	50	0,3	(80)	"Вояджер-2" 1989
Деспина	53	0,3	(150)	"Вояджер-2" 1989
Галатея	62	0,4	(160)	"Вояджер-2" 1989
Ларисса	74	0,6	(200)	"Вояджер-2" 1989
Протей	118	1,1	420	"Вояджер-2" 1989
Тритон	355	5,9	2700	Лассел 1846
Нереида	5513	360,2	340	Койпер 1949
Спутник Плутона				
Харон	19,4	6,4	1200	Кристи 1978
( ) — ненадежное значение * - средний диаметр тела неправильной формы				

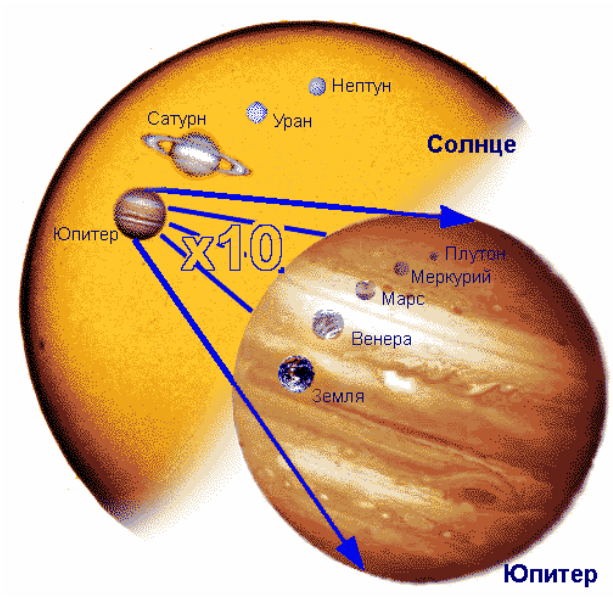


Рис. 6-6. Солнце и планеты. Сравнительные размеры.

Одна из наиболее примечательных закономерностей, свойственных Солнечной системе, это закон планетарных расстояний (от Солнца до планеты) Тициуса-Боде. Он показывает, что расстояние планет от Солнца подчиняется простой эмпирической зависимости:

$$R = 0.4 + 0.3\times 2^{n}.$$

Здесь R – расстояние (в астрономических единицах – а.е.; 1 а.е. равна расстоянию Земли от Солнца, примерно 150 млн. км), n – целые числа (для Меркурия, $n = -\infty$, для Венеры, $n = 0$, для Земли, $n = 1$ и т.д.). Аналогичные закономерности характеризуют расстояния от планеты до спутников в системах Юпитера, Сатурна и Урана (рис. 6-7). Этот факт подчеркивает общность механизмов формирования Солнечной системы и систем спутников этих планет. На рис. 6-7 показана зависимость не в расстояниях от Солнца, а в периодах обращения планет вокруг Солнца T, дело в том, что R^3/T^2 = const для планет и спутников. Эта зависимость следует из третьего закона Кеплера.

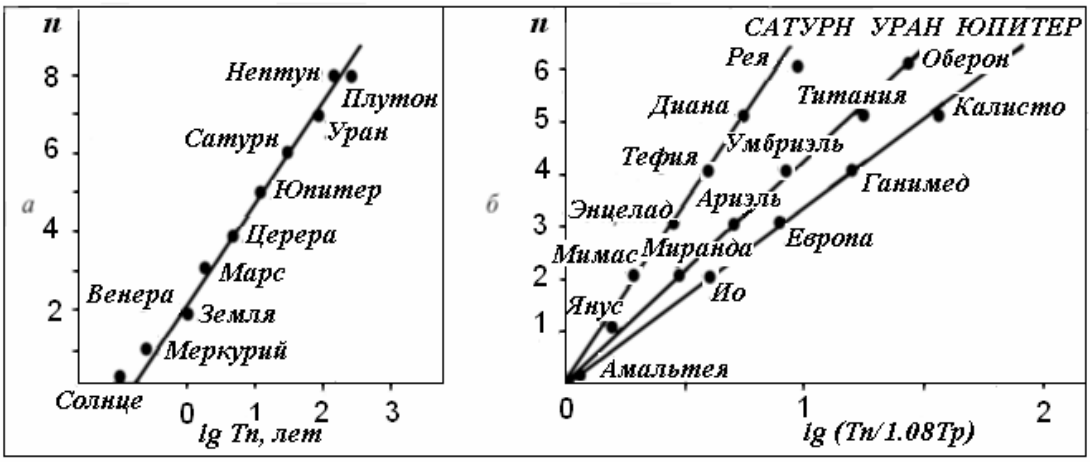


Рис. 6-7. Закон Тициуса-Боде для Солнечной системы и систем Сатурна, Урана и Юпитера.

Астроном Гершель, в соответствии с правилом Тициуса-Боде, открыл планету Уран (n = 6) в 1781 г. Поиски отсутствующей планеты, расположенной между Марсом и Юпитером, привели к открытию в 1801 г. первого из Астероидов – Цереры. После этих замечательных открытий у ученых того времени возникла твердая уверенность в том, что мы имеем дело с законом природы. И даже тот факт, что Нептун и Плутон "не вписываются" в этот закон не поколебал их уверенности. Закономерность, аналогичная правилу Тициуса-Боде справедлива и для многих спутников Юпитера, Сатурна и Урана ($T_n \approx T_o \times A^n$, где T_n – период обращения n-ого спутника вокруг планеты, T_o и A – постоянные), что еще раз подтверждает, что мы имеем дело не со случайным процессом, а с явлением природы. Надо сказать, что многочисленные попытки найти объяснение этим закономерностям не привели к ожидаемому результату.

Правило Тициуса-Боде составлено относительно расстояния (и периода обращения) Земля-Солнце. У. Кэри принимает за единицу расстояние Солнце-Юпитер (Кэрри, 1991). В этом случае соотношения реальных периодов ближе - к соотношениям периодов, полученных по формуле $T_n = 3J \cdot 2^{n-1}$, где J – сидерический период обращения Юпитера (т.е. относительно звезд, в отличие от синодического периода – относительно Земли), а T_n – период обращения относительно Юпитера n-ой планеты, расположенной дальше Юпитера. Для планеты внутри орбиты Юпитера - берется обратная формула (см. таблицу).

Меркур.	Венера	Земля	Марс	Астер.	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
1/48	1/24	1/12	1/6	1/3	1	3	6	12	24
1/49.2	1/19.3	1/11.9	1/6.3	1/3	1	2.5	7.1	13.9	20.9

Возможно, эти законы и правила можно поставить в один ряд с уже давно обнаруженными удивительными т.н. резонансными свойствами частот (периодов) обращения планет (спутников) вокруг Солнца (планеты). Хорошо известный всем пример резонанса, это обращение Луны вокруг Земли. Скорость обращения Луны вокруг своей оси точно равна скорости обращения её вокруг Земли. Именно поэтому мы видим только одну сторону Луны.

В любом случае, правила типа закона Тициуса-Боде, или резонансные свойства Солнечной системы, обязаны одной из двух (либо обеим сразу) причин: Это следствие образования планетной системы, либо результат очень длительного процесса взаимодействия небесных тел между собой.

На рис. 6-6 показаны размеры планет относительно Солнца. Можно видеть, что если в расстояниях планеты от Солнца имеется строгая зависимость, то этого нет в вариации массы всех планет. Правда, можно отметить, что масса ближайших к Солнцу 4-х планет значительно уступает планетам-гигантам, а масса их, в свою очередь, убывает по мере удаления от Солнца. Эти группы планет разделяются между собой поясом Астероидов, вместо которого, как принято считать, должна была бы находиться планета Фаэтон. Плутон и, совсем недавно открытая планета Седна, - с недавних пор планетами больше не считаются.

Исследования последних лет показали, что, по-видимому, не исчерпаны возможности объяснения этих фактов в рамках чисто небесно механической постановки задачи многих тел. При таком подходе объяснение закономерностей движения небесных тел ищут, изучая то, как будут сказываться на их движениях взаимные влияния по закону Ньютона. Стало ясно, что расположение орбит планет и большинства естественных спутников в одной плоскости не является случайным и может быть объяснено действием чисто гравитационных сил взаимного возмущения. Оказывается, что орбиты с большими наклонами очень неустойчивы. Если бы планеты с такими орбитами когда-то и существовали, то они очень быстро должны были бы упасть на Солнце. Например, Луна,

если бы её орбита была нормальна к плоскости эклиптики, только за счет возмущений от Солнца, упала бы на Землю примерно через 4.5 года. Существование спутников Урана с орбитами, наклоненными к его орбите под углом 98°, не противоречит этому результату, так как этот случай объясняется тем, что возмущения от других тел устойчиво скомпенсированы возмущениями от нецентральности поля тяготения Урана, обусловленной его сжатием.

Пока нет достаточно убедительных объяснений малости эксцентриситетов планетных орбит, но для внутренних спутников больших планет она может быть объяснена, если помимо гравитационных сил учесть и приливную диссипацию энергии в этих системах. Известно, что взаимодействие спутника с порождаемым им приливом на планете, приводит к увеличению эксцентриситета его орбиты. Но существует механизм, действующий в обратном направлении, он связан с радиальным приливом на спутнике. Для спутника с синхронным вращением, когда он, подобно Луне, повернут к планете одной стороной (этим свойством обладают все синхронные спутники), радиальный прилив существует только для спутников с эллиптической орбитой. Диссипация энергии на спутнике ведет к уменьшению эксцентриситета орбиты. Преобладание этого механизма в ходе эволюции могло обеспечить малость эксцентриситетов спутниковых орбит. Но такое объяснение не подходит для планет. Если принять для приливной диссипации энергии в теле планеты её современное значение, то она оказывается слишком малой, чтобы обеспечить эволюцию к почти круговым орбитам за время существования Солнечной системы.

Особенно много дискуссий было о законе Тициуса-Боде. Физическая значимость его соотношения и различных модификаций закона не очевидна, поскольку она не является следствием какой-либо теории. Некоторые авторы не исключают возможности случайного происхождения наблюдаемого распределения планетных и спутниковых расстояний от центральных тел. Другие видят в нем отражение начальных условий образования планетной системы. Но большее число исследователей склоняется к мысли о его эволюционном происхождении.

Резонансы в Солнечной системе. Впервые гипотезу о резонансной структуре Солнечной системы высказал А.М. Молчанов (Пудовкин и др. 1977). Основанием для этого послужило то, что закон планетарных расстояний (закон Тициуса-Боде) не совсем адекватен сути явления. Более удачная форма описания явления пропорциональности расстояний между планетами и спутниками, по Молчанову, заключается в представлении этой особенности как соразмерности частот их вращений: планет - вокруг Солнца, а спутников - вокруг планет. Простые целочисленные соотношения более естественно возникают и легче интерпретируются в соотношениях между частотами, а переход к расстояниям планет от Солнца может быть сделан по третьему закону Кеплера. Преимущества такого подхода заключаются в том, что с одних позиций могут быть рассмотрены многочисленные случаи соизмеримости между частотами в Солнечной системе.

В качестве иллюстрации к сказанному, обратимся к рисунку 2-2, на котором приведены периоды обращений планет и регулярных спутников планет-гигантов (Дермот, 1976). Период обращения n-го тела: $T_n \approx T_o A^n$, где T_o и A - произвольные постоянные, различные для каждой из подсистем.

Под соизмеримостью, или резонансностью системы, в которой тела обращаются с частотами ω_i, понимают выполнение линейного соотношения:

$$n_1\omega_1 + n_2\omega_2 + ... + n_k\omega_k = 0,$$

в котором коэффициенты n_i являются целыми числами.

Существование некоторых соотношений такого типа для орбитальных частот небесных тел было известно давно. Эйлер и Лагранж пытались объяснить резонансную связь между частотами Юпитера и Сатурна: $2\omega_{Ю} - 5\omega_{С} \approx 0$. В свое время Лаплас

обнаружил соизмеримость между планетоцентрическими долготами спутников Юпитера - Ио, Европы и Ганимеда: $\lambda_1 - 3\lambda_2 + 2\lambda_3 \approx \pi$, которая означает, что выполняется соотношение: $\omega_1 - 3\omega_2 + 2\omega_3 = 0$.

Вместе с тем существуют соизмеримости другого рода. Известно, что многие спутники планет имеют частоты вращения, совпадающие с частотой их обращения вокруг центрального тела, демонстрируя резонанс 1: 1. Наиболее известным примером является резонанс Земля - Луна. Частота вращения Меркурия связана с частотой его обращения соотношением 2: 3. Известно, что в распределении астероидов на орбитах, соответствующих соизмеримостям 1: 2; 2: 5; 1: 3; наблюдаются "пробелы Кирквуда". Аналогичный резонансный характер имеет щель Кассини в кольцах Сатурна и т.п.

Поразительны соизмеримости обращения планет Меркурия и Венеры. Оказывается, что движение Меркурия вокруг Солнца и вокруг своей оси согласовано с движением Земли. Соединение Земли и Меркурия происходит каждые 116 суток. За это время Меркурий делает ровно два оборота вокруг своей оси и, оказавшись в нижнем соединении с Землей, всегда повернут к ней в этом положении одной и той же стороной. Аналогично Меркурию, ведет себя Венера, которая с периодичностью 584 дня, сближаясь с Землей, оказывается в нижнем соединении. В эти моменты Венера неизменно обращена к Земле одной и той же стороной.

Обсуждение динамического смысла отдельных соизмеримостей ведется много лет. Еще в 1954 г. А.Е. Рой и М.В. Овенден нашли, что в Солнечной системе и её спутниковых подсистемах случаи парной соизмеримости орбитальных частот встречаются чаще, чем это могло бы быть при случайном распределении. В качестве причины выдвигалась альтернатива: либо "виновата" специфика образования Солнечной системы, либо, - особая устойчивость конфигураций, соответствующих соизмеримости. Анализ спутниковых систем Юпитера и Сатурна привел авторов к выводу, что вторая гипотеза более вероятна. По Рою и Овендену, объяснение состоит в том, что любые пары планет или спутников стремятся проводить большую часть времени вблизи некоторых периодических орбит, которые тем устойчивее, чем чаще повторяется т.н. "зеркальная конфигурация", когда радиус-векторы материальных точек, проведенные из центра инерции этой системы, перпендикулярны к векторам скоростей. Для этого необходимо, чтобы орбитальные частоты материальных точек были приблизительно соизмеримы.

Другая гипотеза была высказана П. Голдрейхом в 1965 г. Согласно этой гипотезе, соизмеримость в спутниковых подсистемах имеет приливную природу. Тенденция к соизмеримости орбитальных частот должна проявляться в этом случае только такими спутниками, для которых приливные эффекты достаточны для того, чтобы обеспечить заметное изменение орбиты за время существования Солнечной системы. Если в результате приливной эволюции, отношение частот обращения двух спутников приближается к отношению двух малых целых чисел, то характер дальнейшей эволюции принимает своеобразную форму. Оказывается, что может иметь место такое перераспределение момента количества движения между планетой и спутником, чтобы квазисоизмеримость сохранялась. Для этого необходимо достаточно сильное гравитационное взаимодействие между ними, иначе эволюция их орбит будет независимой и соизмеримость частот не будет устойчивой.

Гипотеза Голдрейха, основанная на учете приливных диссипативных сил, не может объяснить случаи соизмеримостей между частотами спутников со слабым гравитационным взаимодействием. Модель Роя и Овендена базируется на использовании только консервативных, ньютоновских сил. Гипотеза Молчанова относится к области взаимодействия многочастотных нелинейных колебательных систем, а Солнечная система привлекается лишь как объект иллюстрации природы эволюции таких систем. Молчанов оценил вероятность наблюдаемого состояния Солнечной системы как 3×10^{-12}. Это означает, что планетная система, подобная солнечной, при случайном образовании, могла бы встретиться один раз среди десяти галактик, подобной нашей и содержащей 10^{11} звезд,

если считать, что у каждой звезды есть планетная система. С такой уникальностью Солнечной системы трудно согласиться. Единственная, приемлемая альтернатива - признать вместе с Молчановым, что резонансные свойства системы являются следствием её образования и эволюционной зрелости. Но тогда необходимо понять, почему с точки зрения классической механики резонансные состояния крайне маловероятны.

Независимо от своей природы: механической, химической, или биологической, нелинейные колебательные системы в ходе динамической эволюции проявляют тенденцию выходить за особый синхронный режим движения. Совокупность N изолированных друг от друга объектов, совершающих колебания с различными частотами, при наложении даже очень слабых связей, переходят в такой режим движений, при котором частоты объектов становятся равными, кратными или находятся в рациональных отношениях. Математически это выражается в необходимом удовлетворении некоторого количества m независимых, линейных относительно частот, резонансных соотношений:

$$\sum n_k^{(i)} \times \omega_k \approx 0;\ i = 1, 2, \ldots m,$$

где ω_k - частоты объектов; $n_k^{(i)}$ - целые числа.
Аналогичная зависимость устанавливается и между фазами колебаний (см. таблицу).

Резонансные соотношения для планет Солнечной системы.

Планета	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6	n_7	n_8	n_9	ω^H	ω^T	$(\omega^H-\omega^T)/\omega^H$
1. Меркурий	1	-1	-2	-1	0	0	0	0	0	49.2508	49.1904	0.0012
2. Венера	0	1	-1	-1	-1	0	-1	0	0	19.2816	19.2619	0.0010
3. Земля	0	0	1	-2	1	-1	1	0	0	11.8618	11.8333	0.0024
4. Марс	0	0	0	1	-6	0	-2	0	0	6.3067	6.2857	0.0033
5. Юпитер	0	0	0	0	1	-2	-1	0	-1	1.0000	1.0000	-
6. Сатурн	0	0	0	0	0	1	-2	-1	-1	0.40269	0.40476	-0.0051
7. Уран	0	0	0	0	0	0	1	-2	0	0.14119	0.14285	-0.0118
8. Нептун	0	0	0	0	0	0	1	0	-3	0.07198	0.07143	+0.0077
9. Плутон	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0.04750	0.04762	-0.0025

ω^H- наблюдаемые частоты, ω^T - теоретические частоты.

Для планетных систем, рассматриваемых как набор слабо связанных нелинейных осцилляторов, Молчанов предположил, что конечной стадией их эволюции является синхронный режим, при котором имеется максимально возможное число резонансных соотношений - на единицу меньше, чем число частот. В этом максимально резонансном состоянии структура системы однозначно определяется целочисленной резонансной матрицей, составленной из компонент $n_k^{(i)}$ резонансных векторов $n^{(i)}$ так, что знание частоты обращения вокруг Солнца одной планеты позволяет вычислить частоты всех других.

Несмотря на отсутствие теории, позволяющей однозначно найти $n_k^{(i)}$, Молчанов сумел построить резонансные матрицы для четырех систем: Солнечной системы и спутниковых систем Юпитера, Сатурна и Урана.

Гипотеза Молчанова не доказана, она не дает ответа на вопросы, почему планеты и часть астероидов находятся на резонансных орбитах, а другая часть астероидов эти орбиты избегает? Не ясны механизмы синхронизации. Остается дискуссионным вопрос о роли консервативных и диссипативных факторов. Проведена серия вычислительных экспериментов. Масса центрального тела задавалась равной массе Солнца, число, масса планет и их начальные орбиты варьировались. Планеты взаимодействовали по

ньютоновским законам, без учета диссипации. По результатам экспериментов видно, что эволюция планет идет к определенным стационарным состояниям.

М.В. Овенден показал, что спутники Юпитера: Ио, Европа, Ганимед, частоты обращений которых: $\omega_1 - 3\omega_2 + 2\omega_3 \approx 0$, действительно находятся очень близко от минимальной конфигурации. Аналогичный результат получен для спутников Урана: Миранды, Ариэля и Умбриэля, частоты которых удовлетворяют такому же соотношению, но с меньшей точностью. Полное время эволюции этих систем примерно равно возрасту Солнечной системы. На оценки времени эволюции не влияет выбор начальной конфигурации, так как эволюция происходит быстро вдали от минимальной конфигурации и медленно вблизи неё.

Интересный результат получен при применении этой методики к Солнечной системе. Для системы, состоящей из Солнца, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, соответствие с принципом наименьшего взаимодействия достигается в том случае, если бы на месте пояса астероидов была бы планета с массой в сто раз большей массы Земли. При таком предположении оказывается близкой к минимальной конфигурация системы: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер. Таким образом, имеется внутренняя согласованность эволюционной картины всей планетной системы.

Овенден выдвинул принцип наименьшего взаимодействия, который гласит, что спутниковая (или планетная) система из N точечных масс, двигаясь под действием взаимного гравитационного притяжения, будет большую часть времени находиться в конфигурации, для которой среднее во времени от действия, обусловленного спутниками, минимально.

Вырисовывается картина протекания эволюции в Солнечной системе, противоположная ньютоновской: возмущающие силы, которые, по мнению Ньютона, должны приводить планеты в беспорядок, в действительности связывают их в единую систему с четко выраженной упорядоченностью. Суть этой упорядоченности, по гипотезе Молчанова, состоит в установлении определенного резонансного состояния.

По мнению В.В.Белецкого, “... необходимыми условиями реализуемости резонансного движения являются:

- существование консервативного фактора в системе, создающего резонансные “ловушки”, - области устойчивости, в окрестности резонанса;
- существование диссипативного фактора, создающего условия для захвата движения резонансной “ловушкой”.

В Солнечной системе основным консервативным фактором является гравитационное взаимодействие, основным диссипативным фактором - приливное торможение. От характера консервативных и диссипативных сил во многом зависит реализуемость резонансного движения” (Белецкий, 1986, с.23). Этот автор рассматривает некоторые резонансы Солнечной системы, в частности, резонансы низкого порядка, когда угловые скорости осевого (Ω) и вращательного (ω) движения близки друг к другу. Так, например, в резонансе Луны угловые скорости осевого и вращательного движения равны друг другу ($\Omega = \omega$). Такое движение называется “относительным равновесием”: тело покоится во вращающейся орбитальной системе координат и вследствие этого все время обращено одной стороной к центру притяжения. В резонансе Меркурия $2\Omega = 3\omega$, он делает ровно три оборота вокруг своей оси ровно за два орбитальных периода. Белецкий приходит к заключению о том, что резонансы низкого порядка реализуются в системах двух гравитирующих тел. Резонансы более высокого порядка обусловлены взаимодействием более, чем двух тел. Он отмечает существенную роль в эволюции вращения консервативных гравитационных моментов: именно они конструируют “ловушки”, обеспечивающие захват ряда небесных тел в резонансное вращение под влиянием приливного момента. Белецкий предложил так же схему такого захвата и дал оценку времени эволюции вращательного движения Земли при современном значении

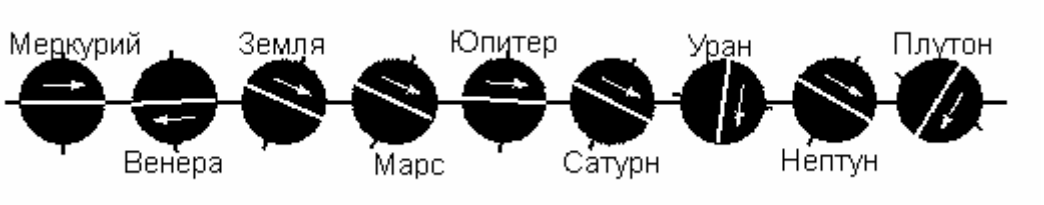
приливного фактора (добротность порядка 100). Это время оказывается порядка 10^5 лет. Для Юпитера добротность выше, больше и время, 10^7 лет.

Солнечная система, с точки зрения А.М. Чечельницкого (1986), это волновая динамическая система, компонентами которой являются как сами небесные тела (Солнце, планеты, спутники, малые тела), так и межпланетное, континуальное наполнение - материальная среда (межпланетная плазма, электромагнитные поля и пр.), т.е. вещество и поле, описываемое в едином динамическом контексте. Соответствующий инструмент, дающий динамическое и феноменологическое описание подобных систем, Чечельницкий называет мегаквантовой волновой астродинамикой.

В заключение приведем высказывание Г.С.Нариманова: “Резонансные свойства движения, определенная последовательность значений планетных расстояний и другие особенности, наблюдаемые в строении Солнечной системы и в движении планет, не могут считаться случайными явлениями - они должны найти свое объяснение как проявление определенной природной закономерности” (Чечельницкий, 1986, с. 57).

6. 3. Общие закономерности движения планет.

Все планеты движутся по орбитам в одну сторону, совпадающую с направлением вращения Солнца вокруг своей оси. Это направление против часовой стрелки, если смотреть на Солнечную систему со стороны Северного полюса Земли (а также Солнца и других планет). Такое направление называют прямым. (Противоположное направление - обратным).



Большинство планет вращается вокруг своей оси в прямом направлении (с запада на восток). Уран и Плутон вращаются лежа на боку. Тот небольшой угол, который есть между плоскостью орбиты каждой из этих двух планет и осью их осевого вращения, позволяют определить и для них направление вращения вокруг оси. Это направление обратное. Чуть по иному обстоит дело с Венерой. Ось вращения планеты почти перпендикулярна плоскости орбиты, но и тут наблюдается обратное вращение. У всех остальных планет угол между осью вращения и плоскостью орбиты не больше чем на 30° отличается от прямого. Плоскости орбит планет близки к плоскости экватора Солнца. Только орбита Плутона больше, чем на 15°, отстоит от этого среднего уровня. Эта величина называется наклоном орбиты. Для остальных планет этот наклон меньше, чем 5°. Только Меркурий дотянул до 7°. Меркурий и Плутон, таким образом, имеют самые вытянутые орбиты, которые значительно наклонены к некоторой средней плоскости Солнечной системы. За эту нулевую плоскость обычно принимают не плоскость солнечного экватора, а плоскость орбиты Земли. Эта плоскость совпадает с плоскостью эклиптики – годовому пути Солнца по небу.

6. 4. Эволюция взглядов на устойчивость Солнечной системы (Кузнецов, 1999).

До открытия закона всемирного тяготения вопрос об устойчивости системы Мира решался a priori. Сначала делалось предположение о фундаментальном свойстве Мира — устойчивость, хаотичность и т.п. — затем создавалась система. По сути, эти системы были кинематическими. Ньютон первым построил динамическую модель Солнечной системы и сразу же столкнулся с вопросом о ее устойчивости. Он вышел из этого затруднения с помощью Великого Часовщика, который время от времени должен возвращать планеты на их орбиты.

В дальнейшем понятие устойчивости развивалось параллельно с исследованиями движения планет. Лагранж считал движение устойчивым, если оно происходит в замкнутой области пространства. Согласно теореме Лапласа–Лагранжа (1773, 1776) об отсутствии вековых возмущений больших полуосей планетных орбит, их изменение с точностью до величин первого порядка малости относительно возмущающих масс можно представить в виде суммы тригонометрических слагаемых. На основе этой теоремы в 1773 Лаплас сформулировал теорему об устойчивости Солнечной системы: если движение планет происходит в одном направлении, их массы одного порядка, эксцентриситеты и наклоны малы, а большие полуоси испытывают лишь небольшие колебания относительно среднего положения, то эксцентриситеты и наклоны орбит будут оставаться малыми на рассматриваемом интервале. Вывод обнадеживающий. Однако в настоящее время эта теорема имеет только исторический интерес. Она не применима на интервалах времени, сравнимых с возрастом Солнечной системы, поскольку учитывает возмущения только первого порядка. Кроме того, массы тел Солнечной системы различаются существенно.

Позднее, в 1809 Пуассон показал, что во втором приближении решение для большой полуоси может содержать тригонометрические слагаемые с амплитудой, пропорциональной времени. Соответствующее определение устойчивости по Пуассону требует, чтобы частица за бесконечное время, бесконечное число раз - проходила через сколь угодно малую окрестность начальной точки.

Наиболее удачное понятие устойчивости сформулировал в конце XIX века русский математик А.М.Ляпунов. Исследуемое движение считается устойчивым, если все возможные движения, мало отличающиеся от него в начальный момент, в последующем будут мало отклоняться от него на всем интересующем интервале времени. Если же найдется хотя бы одно (!) движение, в начальный момент мало отличающееся от исследуемого, которое постепенно, пусть и через большой промежуток времени, заметно отклонится от него, то исследуемое движение — неустойчиво. Это определение и по сей день считается основным.

В задачах небесной механики рассматривается устойчивость по части переменных: большой полуоси (задает размер орбиты), эксцентриситету (определяет вытянутость орбиты) и наклону орбиты. Совместная эволюция этих трех элементов должна удовлетворять определению устойчивости по Ляпунову. Солнечная система устойчива (по Ляпунову), если размеры, форма и наклоны орбит, - остаются близкими к начальным, - на всем рассматриваемом интервале времени. Говоря об устойчивости Солнечной системы, как правило, имеют в виду устойчивость движения больших планет на бесконечном или очень большом, сравнимом с ее возрастом, интервале времени. В этом случае крайними проявлениями неустойчивости являются уход из Солнечной системы, падение на Солнце или столкновение с другой планетой. Такое событие способно существенно изменить структуру и динамику Солнечной системы.

В последнее время появилось большое число исследований по динамике малых тел Солнечной системы. Для этих объектов неустойчивость чаще всего проявляется в существенном изменении размеров, формы и наклона орбиты, зачастую многократном, и только после этого происходит уход из Солнечной системы, падение на Солнце или столкновение с планетой. Благодаря тому, что массы этих объектов незначительны, а их число велико, неустойчивое движение одного объекта, или даже группы, почти не влияет на устойчивость Солнечной системы в целом, хотя и играет важную роль в формировании ее структуры.

Классический метод исследования движения небесных тел заключается в представлении решения соответствующих уравнений возмущенного движения в виде отрезков рядов. В конце XIX века Анри Пуанкаре показал, что ряды, применяемые для описания движения небесных тел, расходятся. Следовательно, их нельзя использовать для анализа поведения Солнечной системы на бесконечном интервале времени. Казалось бы, это не страшно, ведь Солнечная система имеет хотя и большую, но ограниченную

эволюционную шкалу. Но полученные Пуанкаре интервалы применимости классических рядов, оказались значительно короче возраста Солнечной системы.

Эта трудность была преодолена лишь в начале 60-х гг. прошлого столетия. Математики А.Н.Колмогоров, В.И.Арнольд и Ю.Мозер разработали теорию, получившую название КАМ–теория. Ее приложение к Солнечной системе дает следующую теорему: *если массы планет достаточно малы, эксцентриситеты и наклоны орбит малы, то для большинства начальных условий (исключая резонансные и близкие к ним) движение будет условно-периодическим, эксцентриситеты и наклоны будут оставаться малыми, а большие полуоси будут вечно колебаться вблизи своих первоначальных значений*, то есть Солнечная система будет устойчивой по Ляпунову на бесконечном интервале времени. КАМ-теория справедлива с очень существенной оговоркой: при условии отсутствия резонансов. К сожалению, в реальной Солнечной системе резонансы играют очень важную роль. Поэтому, выводы КАМ–теории не могут быть применены к Солнечной системе в целом на всем интервале ее существования.

Каковы условия возникновения резонансов? Главное — соизмеримость частот. Различают два основных типа резонансов: резонанс средних движений, возникающий вследствие соизмеримости средних движений объектов, и вековой резонанс между средними движениями долгот восходящих узлов и аргументов перицентров объектов. Наиболее сильно проявляются резонансы низких порядков, когда отношение частот можно представить в виде рациональной дроби с небольшими значениями числителя и знаменателя, например, 2/1, 3/1, 3/2, 4/3 и т.п.

При наличии резонансов, - эволюция динамической системы может идти следующим образом. 1) Система пройдет через резонанс, что приведет к резкому скачкообразному изменению элементов орбиты, например, эксцентриситета или наклона. 2) Система застрянет в резонансе и перейдет в новое состояние с либрационным режимом движения, в котором позиционные элементы (большая полуось, эксцентриситет, наклон) вместе, или по отдельности, - будут испытывать колебания, иногда достаточно большой амплитуды. Любой из этих сценариев может привести к тому, что объект перейдет на новую орбиту. В этом случае движение будет неустойчивым по Ляпунову.

Как формируется хаотический режим поведения динамической системы? Как правило, хаотическое поведение является следствием взаимодействия резонансов в результате перекрытия соседних резонансных зон. В этом случае формируется зона хаоса, характерная тем, что основные динамические параметры системы, в частности позиционные элементы орбиты, очень быстро изменяют свои значения, причем последующее состояние системы практически не зависит от предыдущего. Хаотическое движение может наблюдаться и при отсутствии резонансов, например, при гравитационных маневрах и сближениях малых тел с большими планетами. В этом случае направление движения тела после маневра или сближения сильно зависит от начальных данных. После двух-трех маневров, тела, стартовавшие практически из одной точки, могут оказаться на существенно различных орбитах. Такое движение можно сравнить с перемещением по крупному городу с большим числом пересадок. Небольшая разница в положении или моменте старта может привести к критически различным финалам. Для анализа скорости разбегания соседних траекторий применяют специальную характеристику, называемую временем Ляпунова. Она определяет промежуток времени, в течение которого расстояние между соседними траекториями увеличивается в *e* раз.
Наиболее сильно хаотическое поведение проявляется у малых тел Солнечной системы. Именно с них мы и начнем обзор динамической эволюции объектов Солнечной системы.

6. 5. Особенности динамической эволюции малых тел Солнечной системы.

Обзор динамики малых тел Солнечной системы начнем с астероидов и попытаемся разобраться, как образовались люки Кирквуда и почему они существуют по сей день.

Как уже упоминалось, люки соответствуют резонансным значениям больших полуосей орбит астероидов. Мы рассмотрим три резонанса средних движений между астероидом и Юпитером: 3/1 — люк Гестии, 2/1 — люк Гекубы и 3/2 — группа Гильды.
В 1982 г. Ж.Висдом (Калифорнийский технологический институт, США) исследовал движение астероидов, находящихся в резонансе 3/1 в рамках ограниченной задачи трех тел Солнце–Юпитер–астероид на интервале времени 20 млн. лет. В отличие от своих предшественников он учел эксцентриситет орбиты Юпитера. Висдом обнаружил несколько астероидов, которые на рассматриваемом интервале скачком увеличивали эксцентриситет своей орбиты от 0 до 0.35. Такого эксцентриситета достаточно, чтобы астероид стал двигаться по орбите, пересекающей орбиту Марса. Эффективное время сближения с Марсом порядка 100–200 млн. лет. После сближения с Марсом астероид уйдет из главного пояса в область планет земной группы. Более поздние исследования показали, что в окрестностях резонанса 3/1 эксцентриситет может скачкообразно увеличиваться до 0.9, что должно приводить к сближению астероидов с Землей и Венерой. Эффективное время сближения с этими планетами значительно меньше, чем с Марсом. Таким образом, на космогонически коротком интервале времени почти все астероиды, двигавшиеся вблизи резонанса 3/1 с Юпитером, были выброшены в область планет земной группы.

Многочисленные попытки использовать механизм, предложенный Висдомом, для объяснения происхождения люка Гекубы (резонанс 2/1) не дали желаемого увеличения эксцентриситета до 0.49, когда становятся возможны сближения астероидов с Марсом. В 1994 г. С.Ферраз-Мелло (Университет Сан-Пауло, Бразилия) опубликовал результаты исследования движения астероидов в резонансе 2/1 с Юпитером в рамках задачи четырех тел Солнце–Юпитер–Сатурн–астероид. Оказалось, что эволюция эксцентриситета идет очень быстро. За 5 млн. лет он увеличивается от 0.05–0.1 до 0.4—0.5, а за 12 млн. лет — до 0.7–0.9. В последнем случае астероид может сблизиться Землей.

Если в зоне резонансов 3/1 и 2/1 астероиды практически не наблюдаются, то в резонансе 3/2 обнаружена целая группа из 53 астероидов. Она носит название группы Гильды. Все астероиды этой группы имеют эксцентриситеты, превышающие 0.1, и малые наклоны орбит. В 1993 г. Ф.Франклин, М.Лекар и М.Морисон из Гарвардского астрофизического центра исследовали причины устойчивости движения астероидов в резонансе 3/2 с Юпитером. Они рассмотрели задачу четырех тел Солнце–Юпитер–Сатурн–астероид. Результаты моделирования показали, что время, в течение которого влияние резонансов ведет к распаду группы, превышает возраст Солнечной системы и составляет около 40 млрд. лет. Для астероидов с эксцентриситетами орбит меньшими 0.1 интервал времени, на котором происходит уход из группы, значительно короче и не превышает возраста Солнечной системы. Поэтому сейчас в группе Гильды нет астероидов с эксцентриситетами меньшими 0.1. В случае резонанса 3/2 мы встретились со случаем, когда движение объектов остается устойчивым на очень больших временах, но влияние резонансов в конце концов приведет к хаотизации их движения и последующему распаду группы.

Рассмотренные примеры показывают, что движение объектов по резонансным орбитам в поясе астероидов приводит к выбросу этих объектов в область планет земной группы. Динамическая эволюция астероидов, движущихся среди внутренних планет была рассмотрена в 1994 г. Ш. Фрошле (Обсерватория Лазурный берег, Франция). По результатам численного моделирования были сделаны следующие выводы. Под действием вековых резонансов с планетами земной группы эксцентриситеты орбит астероидов будут значительно увеличиваться. Если в процессе динамической эволюции астероид не столкнется с планетой, то после того, как перигелийное расстояние его орбиты станет меньше радиуса Солнца, он упадет на Солнце. Динамическое время жизни астероида среди планет земной группы очень короткое и для того, чтобы популяция астероидов, сближающихся с внутренними планетами, не исчезла, необходим постоянный

приток новых объектов, выбрасываемых из главного пояса за счет резонансных возмущений.

В июне 1997 г. П.Вигерт (Университет Йорка, Канада) сообщил о том, что астероид 3753 Cruithne является компаньоном Земли. Этот объект относится к группе астероидов, сближающихся с Землей. Его движение относительно Земли можно представить в виде подковообразной орбиты, складывающейся из годичных витков спирали, по форме напоминающих фасоль. Путь астероида по подкове занимает 385 лет. Каждые 385 лет астероид сближается с Землей на минимальное расстояние и ее тяготение изменяет большую полуось его орбиты от 0.997 до 1.003 а.е. или обратно. Из-за большого эксцентриситета (0.5) и прецессии орбиты такое движение является неустойчивым. С большой вероятностью астероид 3753 столкнется с Венерой около 8000 г. Это является еще одним подтверждением того, что астероиды, сближающиеся с Землей, имеют короткую шкалу динамической эволюции.

В последнее время проявляется повышенный интерес к динамике астероидов типа троянцев, движущихся в окрестности треугольных точек либрации планет-гигантов. Треугольные точки либрации расположены на орбитах планет по обе стороны от текущего положения планеты и удалены от него на 60° . В задаче трех тел Солнце–планета–астероид движение в окрестности треугольной точки либрации является устойчивым, если масса астероида достаточно мала по сравнению с массой планеты. В действительности же на тела, находящиеся в окрестности треугольных точек либрации планет, действуют возмущения и от других объектов. Как это влияет на устойчивость?

В январе 1997 г. Г.Левисон (Юго-западный исследовательский институт, США), Е.Шумейкер (Ловелловская обсерватория, США) и К.Шумейкер (Северный университет Аризоны, США) опубликовали результаты исследований по динамической эволюции орбит астероидов-троянцев Юпитера. Оказалось, что время устойчивого существования астероидов в окрестности треугольной точки либрации существенно зависит от собственного эксцентриситета орбиты астероида и амплитуды либрационного движения. Чем меньше собственный эксцентриситет и амплитуда либрации, тем дольше астероид будет находиться в зоне устойчивости. Для 178 известных на момент исследования астероидов-троянцев Юпитера граница интервала устойчивого движения находится на уровне 100 млн. — 1 млрд. лет. Было проведено численное моделирование движения 36 астероидов-троянцев, находящихся вблизи указанной границы, на интервале 4 млрд. лет. В итоге 21 астероид с временем устойчивой эволюции менее 1 млрд. лет покинул группу астероидов-троянцев. Ушедшие астероиды перешли на орбиты, подобные орбитам комет семейства Юпитера. Дополнительное статистическое исследование показало, что среди наблюдаемых 150 комет семейства Юпитера, только одна могла быть ранее астероидом-троянцем. По результатам сравнения орбиты кометы Шумейкеров–Леви 9 с элементами орбит выброшенных троянцев сделан вывод, что эта комета не могла быть ранее астероидом-троянцем.

С.Миккола (Университет Турку, Финляндия) и К.Иннанен (Университет Йорка, Канада) в 1992 г., а М.Холман и Ж.Висдом (Массачусетский технологический институт, США) в 1993 г. исследовали движение астероидов типа троянцев в окрестностях треугольных точек либрации Сатурна, Урана и Нептуна. Троянцы Сатурна ушли из окрестностей точек либрации за время около 10 млн. лет. Это следствие сильных возмущений со стороны Юпитера. Орбиты троянцев Урана и Нептуна эволюционируют более медленно. Можно выделить области устойчивого движения (на рассмотренном интервале 20 млн. лет), в которых можно ожидать обнаружение новых объектов.

Таким образом, движение большинства астероидов-троянцев планет-гигантов можно считать устойчивым только на ограниченном интервале времени. Этот интервал изменяется от нескольких миллионов лет для троянцев Сатурна до нескольких миллиардов лет для троянцев Юпитера.

Для тел, движущихся за внешней границей пояса астероидов, разделение на кометы и астероиды достаточно условно. Один и тот же объект в афелии может наблюдаться как астероид, а в перигелии — как комета. Малые тела, движущиеся во внешней области Солнечной системы, вне зависимости от их наблюдательного статуса, связаны общей динамической эволюцией, в процессе которой возможен переход между различными группами объектов.

Большинство известных короткопериодических комет принадлежат семейству Юпитера. Их периоды не превышают 20 лет, а перигелии орбит лежат внутри орбиты Юпитера. Поэтому динамическая эволюция этих комет определяется их взаимодействием с Юпитером. В 1995 г. Танкреди (Уругвай) исследовал динамику комет семейства Юпитера. Было проведено численное интегрирование уравнений движения 145 комет этого семейства (всех известных на момент исследования) на интервале 200 тыс. лет. В итоге 5 комет были выброшены на гиперболические орбиты. Из оставшихся 140 комет для 137 время Ляпунова концентрировалось между 50 и 150 годами при среднем значении 60 лет. Короткие времена Ляпунова свидетельствуют, что движение комет происходит в зоне сильного хаоса, которая является следствием частых сближений комет с Юпитером. Результаты моделирования показывают, что после двух тесных сближений с Юпитером комета “забывает” свою прошлую траекторию.

Результаты, полученные М.Холманом и Ж.Висдомом в 1993 г. позволяют объяснить малое число наблюдаемых объектов группы Кентавра. Исследование эволюции орбит 3000 пробных частиц на первоначально круговых орбитах в области движения планет-гигантов показало, что большинство частиц покинуло область между орбитами Юпитера и Сатурна на интервале 10–100 тыс. лет, через 1 млн. лет все частицы покинули эту область. Причина такого поведения в частых сближениях частиц с Юпитером и Сатурном. Уход частиц и областей между орбитами Сатурна и Урана и орбитами Урана и Нептуна происходит значительно медленнее. Большинство частиц покинули эти области через 10 млн. лет. После 800 млн. лет все частицы между орбитами Сатурна и Урана были выброшены. Между орбитами Урана и Нептуна осталось всего 6 частиц в области треугольных точек либрации Нептуна. Итак, динамическое время жизни малых тел в области планет-гигантов намного меньше возраста Солнечной системы. Это объясняет почему группа Кентавра столь малочисленна.

М.Холман и Ж.Висдом рассмотрели также вопрос о происхождении короткопериодических комет и динамике объектов пояса Койпера. Было показано, что объекты с малыми наклонами и эксцентриситетами, имеющие большие полуоси меньшие 42 а.е., могут существенно увеличить эксцентриситет своей орбиты в результате сближений с Нептуном на интервале 10–100 млн. лет. После чего эти объекты могут вести себя либо как короткопериодические кометы, либо как астероиды группы Кентавра. Если начальные значения наклона и эксцентриситета орбиты объекта в поясе Койпера не являются малыми, то распределение областей устойчивого и неустойчивого движения становится весьма сложным. Но можно сделать вывод, что источниками короткопериодических комет являются тела, имеющие большие полуоси от 35 до 45 а.е.

В целом происхождение и динамическую эволюцию короткопериодических комет можно представить следующим образом. Объекты из внутренней области пояса Койпера под действием резонансных возмущений от Нептуна увеличивают эксцентриситеты своих орбит. Когда перицентры орбит попадают в область движения планет-гигантов, происходит сближение с одной из планет и объект переходит на орбиту, целиком лежащую в этой области, то есть становится Кентавром. Но подобные орбиты неустойчивы и объект за сравнительно короткое время покидает эту область. Может оказаться, что в процессе эволюции объект подойдет слишком близко к Солнцу и будет наблюдаться как короткопериодическая комета. Однако, как мы видели на примере комет семейства Юпитера, движение объекта из-за частых сближений с планетами-гигантами будет хаотическим. То, что такие сближения происходят достаточно часто,

подтверждается наблюдениями. Наиболее эффектное событие такого рода произошло в июле 1992 г., когда после сближения с Юпитером комета Шумейкеров–Леви 9 стала его спутником и через два года в июле 1994 г. вошла в атмосферу Юпитера. Менее зрелищные, но не менее важные для небесной механики, события происходили с кометами Вольфа, Отерма 3 и многими другими.

6. 6. ***Роль Луны.***

Численное моделирование поведения системы Земля–Луна на интервале 20 млн. лет в прошлое, и 10 млн. лет в будущее, - показало, что наклон оси вращения Земли колеблется около среднего значения 23.3° с амплитудой ≈ 1.3° . Считается, что это вызывает колебания инсоляции на 20% на широте 65°. Такие изменения потока солнечного тепла могут вызывать существенные климатические изменения, например, оледенения. Перераспределение воздушных и водных масс, рост или уменьшение ледникового покрова в высоких широтах ведут к изменению динамического сжатия Земли. А это ведет к изменению скорости прецессии оси вращения Земли. Прецессия вызывается притяжением экваториального избытка массы Земли Луной и Солнцем и возмущениями гелиоцентрического движения Земли со стороны планет. В современную эпоху скорость прецессии составляет 50.4712" в год. Частота возмущающей силы, вызываемой движением перицентров Юпитера и Сатурна и долготы восходящего узла Юпитера равна 50.3021" в год. Томсон в 1990 г. оценил изменение скорости прецессии за счет изменения динамического сжатия Земли при переходе от межледниковья к ледниковому периоду. Скорость прецессии уменьшается на 0.35" в год. Это значительно больше разности между скоростью прецессии и возмущающей частотой. Следовательно, при смене климатических ситуаций Земля должна проходить через резонанс, вызываемый возмущениями от Юпитера и Сатурна. Для того чтобы наблюдались неоднократные переходы между оледенениями и межледниковьями, необходимо иметь устойчивые состояния, соответствующие этим климатическим ситуациям.

Ж.Ласкар и и др. (Laskar et al., 1993) исследовали поведение частоты прецессии и наклона оси вращения Земли на интервале 18 млн. лет при значениях динамического сжатия Земли от 0.9940 до 1.0015 (современное значение принято за единицу). Результаты расчетов представлены на рисунках. Для наклона оси вращения Земли определялись среднее, минимальное и максимальное значения на рассматриваемом интервале. Точный резонанс достигается при динамическом сжатии 0.9977 от современного значения. Переход через резонанс в сторону уменьшения динамического сжатия приводит к уменьшению частоты прецессии с 50.5" до 50.15" в год. Максимальный наклон оси вращения увеличивается на 0.5° и достигает 25° .

На основании результатов моделирования можно предложить следующий сценарий наступления ледниковых периодов. В межледниковую эпоху за счет уменьшения ледяного покрова в высоких широтах уменьшается динамическое сжатие Земли. После прохождения через резонанс, резко увеличивается наклон эклиптики к экватору. Это ведет к уменьшению инсоляции в высоких широтах. Начинается оледенение. Рост ледяного покрова в высоких широтах ведет к увеличению динамического сжатия Земли. После прохождения через резонанс наклон эклиптики к экватору резко уменьшается. Увеличивается инсоляция в высоких широтах. Наступает межледниковая эпоха. После чего цикл повторяется снова. Таким образом, повторяемости ледниковых эпох на Земле мы обязаны совместному влиянию Луны, Солнца, Юпитера и Сатурна. Как сильно влияет Луна на устойчивость оси вращения Земли? Оказывается, Луна - мощный стабилизатор скорости прецессии и угла наклона оси вращения Земли. Ж.Ласкар, Ф.Жутел и Ф.Будин рассмотрели эволюцию оси вращения Земли в отсутствии Луны. Частота прецессии уменьшилась до 15.6" в год, а амплитуда изменения наклона оси вращения величилась: переход от 15° до 30° совершается менее, чем за 200 тыс. лет. Это должно вести к

существенным изменениям инсоляции Земли и, как следствие, к резким колебаниям климата.

Первоначальный период вращения Земли составлял около 15 часов. В современную эпоху за счет приливного трения со стороны Луны и Солнца скорость вращения замедлилась и период вращения достиг 24 часов. В отсутствии Луны скорость осевого вращения Земли изменялась бы значительно медленнее, поскольку приливное трение от Солнца в два раза меньше, чем от Луны. Ж.Ласкар показал, что при малых значениях скорости прецессии (порядка 15" в год) для всех периодов вращения Земли от 12 до 48 часов будут характерны быстрые хаотические изменения наклона оси вращения от 0° до 85° при типичных переходах от 0° до 60° на интервале менее 2 млн. лет, что приведет к катастрофическим изменениям климата.

Система Земля–Луна эволюционирует. За счет приливной диссипации энергии Луна медленно удаляется от Земли, а Земля замедляет свое вращение вокруг оси. Как долго будет сохраняться устойчивое вращение Земли вокруг оси? Что ждет систему Земля–Луна в будущем? Этим вопросам было посвящено исследование Нерона де Суржи и Ж.Ласкара (Neron de Surgy, Laskar, 1997). Рассматривалось поведение системы Земля–Луна на интервале 5 млрд. лет в будущее. Было показано, что через 1.5 млрд. лет наклон оси вращения Земли попадет в зону хаоса. Чтобы исследовать его хаотическое поведение, было проведено 500 численных экспериментов. Начальные данные для каждого варианта отличались от соседнего на 10^{-9} радиан по начальной фазе прецессии и на 10^{-8} градуса по начальному наклону оси вращения. Даже столь малые отличия начальных данных, в силу хаотического поведения системы, давали существенно различные варианты эволюции. На первых 1.5 млрд. лет решения хорошо согласуются. При достижении наклона 60° ось вращения Земли попадает в зону хаоса, для которой характерны быстрые блуждания траектории, ведущие к резким изменениям наклона.

В зоне хаоса соседние траектории “забывают” о своем родстве и эволюционируют независимо. Поскольку наблюдения позволяют получать значения параметров лишь с ограниченной точностью, то сейчас мы не можем сказать, по какой траектории пойдет развитие системы после 1.5 млрд. лет. Но мы можем исследовать поведение пучка траекторий с начальными данными, лежащими в малой окрестности относительно наблюдаемых параметров, и выяснить, какие сценарии эволюции возможны.

6. 7. *Хаос в наклонах осей вращения планет.*

Большие планеты имеют весьма разнообразные периоды вращения и наклоны осей. Являются ли эти периоды и наклоны начальными или они были приобретены в процессе динамической эволюции?

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Период вращения	58.8^{d}	243^{d}	$23^{h}56^{m}$	$24^{h}37^{m}$	$9^{h}50^{m}$	$10^{h}14^{m}$	$17^{h}54^{m}$	$16^{h}06^{m}$
Наклон оси вращения	7°	177°22'	23° 26'	25°12'	3° 07'	25° 33'	97° 52'	28° 19'

Меркурий и Венера испытывают сильные приливы со стороны Солнца на протяжении всего времени своего существования, поэтому сейчас скорость их осевого вращения значительно ниже начальной. Венера обладает чертой, которая на протяжении долгого времени интригует астрономов: она вращается в обратном направлении по отношению к своему орбитальному движению. Обычно предполагают, что Венера сформировалась с обратным движением или, по крайней мере, с осью вращения, лежащей в плоскости ее орбиты, так что последующее действие диссипативных сил, происходящих от солнечных приливов, взаимодействия кора–мантия и т.п., могли привести к обратному вращению. Такие предположения накладывают ограничения на модели формирования

Солнечной системы. Они требуют присутствия короткой стохастической фазы в конце процесса формирования с умеренным числом мощных соударений массивных объектов для того, чтобы получить желаемую ориентацию планеты.

Вместо этого Ж.Ласкар и П.Робутел показали, что даже, если Венера начала эволюцию со скоростью вращения, подобной земной, в направлении орбитального движения, то наличие большой зоны хаоса могло воздействовать на наклон оси вращения так, чтобы увеличить его и привести ось вращения очень близко к плоскости орбиты. Диссипативные эффекты, описанные выше, могли затем привести ось вращения в ее современное положение, где она и стабилизировалась, так как осевое вращение Венеры продолжало замедляться.

Ситуация с Меркурием отличается незначительно. Также как и в случае Венеры мы не знаем начальный период вращения Меркурия, но достаточно принять его короче 300 часов, чтобы гарантировать сильные хаотические изменения наклона оси вращения в диапазоне от 0° до 90° на интервале в несколько миллионов лет. А далее, как показал в середине 1970-х гг. С.Пил, продолжительное влияние солнечных приливов замедлило его вращение и привело ось вращения в современное положение.

Марс далеко от Солнца, его спутники Фобос и Деймос имеют слишком малые массы, чтобы замедлить его осевое вращение, поэтому можно считать, что его нынешний период вращения близок к начальному. С другой стороны, Ж. Ласкар и П. Робутел и независимо от них Дж.Тома (Университет Торонто, Канада) и Ж. Висдом в 1993 г. показали, что движение оси вращения Марса хаотично, то есть невозможно предсказать ориентацию оси вращения на интервале большем, чем несколько миллионов лет. Наклон оси вращения Марса изменяется от 0° до 60° менее, чем за 50 млн. лет. Б.Джакоски с коллегами пришли к выводу, что при максимально возможном наклоне оси вращения Марса температура на его поверхности повысится настолько, что станет возможным существование воды в жидкой фазе. Сухие русла рек, обнаруженные на Марсе, могут служить хорошим подтверждением хаотического движения его оси вращения.

Интересна структура зоны хаоса. Она лежит в пределах от 0° до 60° и делится на две области: одна связана с вековым резонансом за счет вращения орбиты Венеры, а другая — с вековым резонансом от орбиты Меркурия. Дрейф в каждой из областей быстрый, а переход из одной области в другую затруднен. Существование этой большой зоны хаоса также снимает ряд ограничений с моделей формирования Солнечной системы, поскольку наклон оси вращения Марса не может считаться начальным и его нынешнее значение, весьма близкое к земному - чистая случайность. С другой стороны, исследования Ж.Ласкара и П.Робутела показали, что наклоны осей вращения планет-гигантов существенно стабильнее и пока невозможно объяснить очень большой наклон оси вращения Урана (98°) ее эволюцией после формирования Урана как планеты.

Эволюция орбит планет на очень больших интервалах времени

Если проинтегрировать уравнения движения больших планет на интервале времени 5 млрд. лет (что превышает возраст Солнечной системы), то можно ли рассматривать полученное решение как описание эволюции Солнечной системы на этом интервале времени? Нет! Действительно, вследствие экспоненциальной расходимости траекторий со временем Ляпунова 5 млн. лет, после примерно 100 млн. лет вычисленное решение будет очень сильно отличаться от реального, соответствующего действительной Солнечной системе. Однако такое решение представляет определенный интерес, так как оно дает один из возможных вариантов эволюции Солнечной системы. Это — разведчик зоны хаоса, в которой эволюционирует Солнечная система.

Чтобы изучить зону хаоса, одного такого интегрирования на интервале 5 млрд. лет недостаточно. Может показаться странным, но для исследования зоны хаоса можно использовать интегрирование, охватывающее значительно большие интервалы времени. Можно рассматривать решения с очень близкими начальными условиями для того, чтобы достигнуть большей части зоны хаоса, которую может занимать Солнечная система за

5 млрд. лет. Насколько оправдано отслеживание орбит планет Солнечной системы на интервале времени, превышающем возраст Солнечной системы? В зоне хаоса, где эволюционирует Солнечная система, после 100 млн. лет можно дать лишь указание на то, что может произойти. Определить же, когда это произойдет, не представляется возможным. Например, если имеется внезапное увеличение эксцентриситета орбиты планеты после 10 млрд. лет, то это говорит о том, что такое событие может, вероятно, иметь место и на более коротком интервале времени. Аналогично, что было обнаружено при интегрировании назад по времени, можно ожидать также и в будущем и наоборот.

Ж..Ласкар (Laskar, 1994) представил результаты численного интегрирования осредненных уравнений движения больших планет Солнечной системы на суммарном интервале времени свыше 200 млрд. лет. Рассмотрим результаты, полученные на интервале 25 млрд. лет (от –10 млрд. до +15 млрд. лет). Для исследования дрейфа орбит в зоне хаоса использовались максимумы эксцентриситета и наклона, полученные для каждой планеты на интервале 10 млн. лет. Поведение планет-гигантов настолько регулярно, что максимумы эксцентриситетов и наклонов их орбит практически не меняют своих значений. В противоположность, максимумы эксцентриситетов и наклонов орбит внутренних планет показывают очень большие нерегулярные изменения, которые соответствуют дрейфу в зоне хаоса. Дрейф эксцентриситетов орбит Земли и Венеры умеренный, но достигает 0.02 для обеих планет. Дрейф эксцентриситета орбиты Марса больше и достигает более, чем 0.12, приводя к значению эксцентриситета, превышающему 0.2. Для Меркурия зона хаоса еще больше и достигает 0.4, что приводит к наибольшему значению эксцентриситета 0.5 на рассматриваемом интервале времени. Поведение максимальных наклонов похожее. Для планет-гигантов дрейф практически отсутствует. Для Земли и Венеры — слабый (до 1°). Для Марса — умеренный (до 6°). Для Меркурия дрейф достигает 14° , а максимальное значение — 21°. Хотя эксцентриситет Меркурия допускает увеличение до 0.5, этого недостаточно, чтобы его орбита пересекла орбиту Венеры. Может ли Меркурий покинуть Солнечную систему? Для ответа на этот вопрос Ж.Ласкар провел специальное исследование. Путем выбора вариантов, ведущих к росту эксцентриситета, удалось получить два сценария эволюции орбиты Меркурия, которые приводят к значениям эксцентриситета, близким к единице. В первом случае на отметке –6 млрд. лет, во втором — +3.5 млрд. лет. С ростом эксцентриситета орбиты Меркурия увеличивается и ее наклон. Вычисление относительных положений точек пересечения орбит Меркурия и Венеры с их линией узлов, показало, что орбиты действительно пресекутся около 3.5 млрд. лет. В это время планеты могут испытать близкое прохождение, которое может привести к уходу Меркурия или столкновению.

Подобные вычисления выполнялись также для Марса и Земли, но пока не привели к решению с уходом из Солнечной системы. Для Земли на интервале 5 млрд. лет максимальный эксцентриситет достиг 0.1, для Марса на том же интервале - 0.25. При таком значении эксцентриситета Марс очень близко подходит к Земле и может быть существует решение, приводящее к уходу Марса, но пока оно не обнаружено.

Существование орбиты ухода для Меркурия не означает, что этот уход обязательно будет иметь место. Фактически, решения, ведущие к уходу, были скурпулезно сшиты. На каждом шаге делался выбор из 4 или 5 эквивалентных решений. На интервале 6 млрд. лет сшивалось 18 решений, на интервале 3.5 млрд. лет - 13. Полученные результаты указывают на существование орбиты ухода, но ничего не говорят о вероятности этого события. Пока можно лишь сказать, что вероятность ухода Меркурия из Солнечной системы малая, но отличная от нуля.

За исключением малого пространства между областями, посещаемыми Венерой, Землей и Марсом, вся внутренняя часть Солнечной системы заполнена. Дополнительная планета, даже небольшая, вроде Меркурия, добавленная в эту внутреннюю область, существенно увеличит вероятность столкновения с существующими планетами. И если раньше в этой области существовали подобные дополнительные планеты, то они

выбрасывались из этой области до тех пор, пока в ней не сформировалась современная динамическая картина.

Какой же вывод можно сделать об устойчивости Солнечной системы? Движение планет Солнечной системы нерегулярно и не может приближаться почти периодической траекторией на интервале более чем 10 или 20 млн. лет. Экспоненциальная расходимость траекторий делает практически невозможным предсказание эволюции Солнечной системы за пределом в 100 млн. лет.

Однако этот результат в основном относится к внутренним планетам: Меркурию, Венере, Земле и Марсу. Хотя внешние планеты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) испытывают возмущения от внутренних планет, но эти возмущения малы и их хаотическое влияние будет приводить лишь к небольшому дрейфу орбит планет-гигантов. Планетную систему, ограниченную планетами-гигантами, а тем более парой Юпитер–Сатурн, можно считать устойчивой в смысле теории Колмогорова–Арнольда–Мозера.

Солнечная система может рассматриваться, как предельно устойчивая система, в которой сильные неустойчивости (соударения или уход) могут иметь место только на временной шкале, сравнимой с ее возрастом: около 5 млрд. лет. Очевидно, что устойчивость системы может обеспечить только гравитационное взаимодействие между звездой и всеми планетами и спутниками системы, однако современные представления о природе гравитации не находят простого и прозрачного физического механизма, обеспечивающего подобную устойчивость системы.

Принципиальный момент во всех проблемах Солнечной системы, несомненно, заключается в правдоподобности механизма её образования. В качестве иллюстрации «успехов» в этом направлении сошлемся на краткий обзор новых результатов по образованию Солнечной системы и составляющих ее тел (например, системы Земля-Луна). Относительно детально обсуждаются три темы, связанные с малыми телами, планетами земного типа и планетами-гигантами. Обзор Crida A. «Образование Солнечной системы» - опубликован 17 марта 2009 в arxiv:0903.3008.

Дается краткий обзор новых результатов по образованию Солнечной системы и составляющих ее тел (например, системы Земля-Луна). Относительно детально обсуждаются три темы, связанные с малыми телами, планетами земного типа и планетами-гигантами.

Первая связана с новыми результатами, говорящими о том, что железные метеориты могли образовываться раньше хондр. Это противоречит стандартному сценарию, т.к. для формирования железных метеоритов нужна дифференциация элементов в массивных телах, а хондры считались самыми первыми из образовавшихся структурных элементов. Похоже, что в начале формировались планетезимали (в области, где потом появятся планеты типа Земли, там динамическое время мало), а потом, в результате разрушения планетезималей, образуются хондры. Тогда же из тех же планетезималей могли сформироваться железные метеориты.

Второй сюжет связан с формированием системы Земля-Луна. Приводятся аргументы в пользу того, что столкновение произошло в самом конце фазы гигантских столкновений. Это было спустя примерно 60-100 мил. лет после формирования Солнечной системы.

Третий отрывок посвящен миграции планет-гигантов. В новой модели конфигурация планет-гигантов в начале была более компактной, но потом Юпитер сдвинулся внутрь системы, а три остальные гиганта - наружу. Это позволяет объяснить некоторые особенности в распределении малых тел. Подвижки связаны с рассеянием планетезималей. Конечно, новая модель не отменяет ранней миграции внутрь протопланетного диска.

Литература

Белецкий В.В. Резонансные явления во вращательных движениях искусственных и естественных небесных тел. В сб. Динамика космических аппаратов и исследование космического пространства. М.: 1986. С. 20-42.

Дермот С.Ф. Закон Боде и преобладание приблизительной соизмеримости среди пар орбитальных периодов в Солнечной системе. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С. 466-495.

Кузнецов Э. Д. Движение тел Солнечной системы. Уральский государственный университет, кафедра астрономии и геодезии, 1999.
http://virlib.eunnet.net/metod_materials/wm3/

Кэрри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир. 1991. 447 с.

Пудовкин М.И., Козеллов В.П., Лазутин Л.Л. и др. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука. 1977. 312 с.

Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра. 1984. 250 с.

Чечельницкий А.М. Волновая структура, квантование и мегаспектроскопия Солнечной системы. В сб. Динамика космических аппаратов и исследование космического пространства. М.: 1986. С. 56-76.

Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. Vol. 25. P.297-356.

Laskar J. Large-scale chaos in the Solar System. *Astronomy and Astrophysics.* 1994. **287**. L9–L12.

Laskar J., Joutel F. and Boudin F. Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from -20 Myr to +10 Myr. *Astronomy and Astrophysics.* 1993. **270**. 522–533.

Neron de Surgy O. and Laskar J. On the long term evolution of the spin of the Earth. *Astronomy and Astrophysics.* 1997. **318**. 975–989.

Schubert G., Turcotte D.E., Olson P. Mantle convection in the Earth and Planets. London; New York: Cambridge Univ. Press, 2001. I–XV. 940 p.

Глава 7. Результаты астрономических наблюдений.

В главе 7 приведены результаты астрономических наблюдений, имеющих отношение как к физике в целом, так и к физике Земли. Обсуждаются вопросы, связанные с мировыми константами: постоянной тонкой структуры и гравитационной постоянной. Приведены результаты по изучению планет других звезд, коричневых карликов и комет. Приведены некоторые результаты по обнаружению гравитационных волн и черных дыр. Все результаты получены с помощью наземных и внеатмосферных, космических телескопов. Основные результаты, приведенные в этой главе, опубликованы в течение последних 5 -10 лет в Nature, Science, СМИ и Интернете на сайте http://arxiv.org/ .

7. 1. Мировые константы.

Постоянная тонкой структуры.

Постоянная тонкой структуры - ("альфа"), безразмерная величина, образованная из универсальных физических постоянных: $e^2/hc \approx 1/137$, где e- элементарный электрический заряд, h - постоянная Планка, c - скорость света в вакууме. Постоянная тонкой структуры определяет тонкую структуру уровней энергии атома (величина тонкого расщепления пропорциональна квадрату "альфы"); с этим и связано название константы. В квантовой электродинамике "альфа" - естественный параметр, характеризующий "силу" электромагнитного взаимодействия.

С помощью исследования спектров отдаленных квазаров на спектрометре UVES, установленном на 8,2-метровом очень большом телескопе (Very Large Telescope - VLT) Южной европейской обсерватории (ESO) Paranal в Чили удалось наложить новые строгие ограничения на возможные вариации во времени важной физической константы - постоянной тонкой структуры. Предыдущие исследования в этой области с помощью астрономических методов позволили предположить, что "альфа" немного увеличивается с течением времени, и таким образом за период существования нашей Вселенной заметно изменилась. Если бы такой факт был подтвержден, то это имело бы самые серьезные последствия для фундаментальной физики, ведь постоянная тонкой структуры "завязана" на скорость света в вакууме, которая тогда тоже должна меняться со временем, что входит в противоречие с теорией Эйнштейна.

Фундаментальные законы физики, как теперь считается, зависят от 25 фундаментальных констант. Самые известные примеры такого рода констант - это гравитационная постоянная, которая определяет характер взаимодействия между телами в космосе (например, между Землей и Луной), масса и заряд электрона, и скорость света в вакууме. Обнаружение или ограничение возможных временны**х** вариаций фундаментальных физических постоянных критически важно с точки зрения понимания основ физики того мира, в котором мы живем.

Фундаментальные физические константы просто обязаны быть "постоянными". То есть однажды полученные числа должны всегда и везде быть одними и теми же, с самого начала этой Вселенной. Однако современные теории фундаментальных взаимодействий вроде теорий великого объединения или теории суперструн, которые нацелены на объединение гравитации и квантовой механики, не только предсказывают зависимость фундаментальных физических постоянных от энергии взаимодействия частиц (эксперименты в области физики элементарных частиц показали, что постоянная тонкой структуры может с ростом энергии столкновений вырасти до приблизительно 1/128), но и учитывают их вариации за так называемое космологическое время. Возможны также пространственные вариации фундаментальных констант. Вариации фундаментальных констант легко могут возникнуть, если помимо трех пространственных измерений допустить существование скрытых измерений (компактификации), что также следует из новейших теорий.

В 1955 году Ландау предполагал возможность зависимости "альфы" от времени, а в конце 1960-х Гамов предположил, что заряд электрона (а, следовательно, и "альфа"), может изменяться. Однако понятно, что подобные изменения, если они вообще имеют место, не могут быть очень большими, иначе они бы уже давно "всплыли" в сравнительно простых экспериментах. Таким образом, чтобы проследить эти возможные изменения, требуются самые сложные и точные методы.

Несколько лет назад известный американский физик Фриман Дайсон (Freeman Dyson) изучал продукты радиоактивного распада в уникальном естественном ядерном реакторе в Габоне (цепная реакция в отложениях урана там протекала приблизительно 2 миллиарда лет назад). Дайсон использовал полученные данные, чтобы оценить древнее значение "альфы". Согласно его заключению, прежнее значение постоянной тонкой структуры, скорее всего, не отличалось от современного (возможная погрешность не превосходит одной десятимиллионной, то есть изменение значения константы не превышает $0{,}5 \cdot 10^{-16}$ в год).

Однако в конце 1990-х появились новые данные из астрономических наблюдений (Джон Вебб (John K.Webb) и его коллеги, телескоп Keck I): были обнаружены крошечные изменения в длинах световых волн от отдаленных квазаров. Моделирование поглощения их света межзвездными облаками показало, что значение "альфы" 10-12 миллиардов лет назад, возможно, было больше нынешнего на 5-7 миллионных. Гарольд Марион (Harold Marion) вместе с коллегами из Парижской обсерватории (Observatoire de Paris) во Франции и американец Джеймс Бергквист (James Bergquist) с сотрудниками из Национального института стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology) в Колорадо исключили любые изменения этой константы, превышающие 7×10^{-15} - 7×10^{-16} в год. Эти две группы определяли значения постоянной в лабораторных условиях с помощью атомных (иначе говоря, квантовых) часов. Самые лучшие из известных часов обладают точностью, позволяющей им ошибаться не более чем на одну секунду за несколько миллионов лет. В таких часах роль маятника играют наиболее стабильные квантовые переходы между энергетическими уровнями атомов или молекул (атомы поглощают радиацию с точно определенной частотой, которую можно измерить, и эти частоты используются как общепринятые мировые стандарты). Если бы постоянная тонкой структуры менялась со временем, это привело бы к заметному изменению частот поглощения в течение уже нескольких лет. Исследователи ничего подобного не обнаружили.

Вселенная - это огромная физическая лаборатория. Изучая очень отдаленные объекты, астрономы могут "оглянуться назад" во времени. Можно даже проверить значения физических постоянных на тот момент, когда Вселенной было только 25% от ее нынешнего возраста, то есть приблизительно 10 миллиардов лет назад. Астрономы полагаются на спектроскопию - измерение свойств света, испускаемого или поглощенного веществом. Если, допустим, свет от пламени пропустить через призму и поставить за ней лист бумаги, то мы увидим радугу. Если в пламя сыпать, например, соль, то к обычным цветам радуги добавятся желтоватые - так называемые эмиссионные линии. Помещая между пламенем и призмой колбу с газом, можно на этой "радуге" увидеть темные линии поглощения. Длины волн этих эмиссионных и поглотительных линий непосредственно связаны с энергетическими уровнями атомов в соли или в газе. Спектроскопия, таким образом, позволяет дистанционно изучать строение атомов.

С точки зрения спектроскопии тонкая атомная структура может дистанционно наблюдаться как мультиплетное расщепление энергетических уровней и спектральных линий атомов и молекул, обусловленное спин-орбитальным взаимодействием. Таким образом, если бы "альфа" действительно менялась спустя какое-то время, то "доисторические" эмиссионные и поглотительные спектры тоже бы изменились. Поэтому один из способов отслеживания любых изменений в значениях "альфы" в истории

Вселенной состоит в том, чтобы получать спектры отдаленных квазаров ("маяков" необыкновенной мощности), и сравнивать длины волны некоторых характерных спектральных линий с соответствующими современными значениями. Квазары здесь используются только в качестве универсальных источников света в наиболее отдаленной части Вселенной. Межзвездные газовые облака в галактиках, расположенных между квазарами и нами на расстояниях от 6 до 11 миллиардов световых лет, поглощают часть света, испускаемого этими квазарами. В полученных спектрах, таким образом, возникают темные "точки минимума", которые могут быть приписаны известным элементам.

Изменение постоянной тонкой структуры должно отразиться на распределении энергетических уровней в атомах, и длины волн поглотительных линий при этом тоже будут меняться. Сравнивая расстояния между точками "минимумов" с лабораторными значениями, можно вычислить "альфу" как функцию расстояния соответствующих объектов от нас, то есть как функцию возраста Вселенной.

Однако этот способ требует чрезвычайной аккуратности и очень хорошего моделирования поглотительных линий. Чрезвычайно высокие требования налагаются и на качество астрономических спектров. Они должны иметь достаточно высокие разрешения, чтобы позволить очень точно измерить крошечные изменения в спектрах. И количество захваченных фотонов должно обеспечивать статистически однозначный результат. Для этого астрономы должны обращаться к наиболее совершенным спектральным приборам на крупнейших телескопах. При этом Спектрограф ультрафиолетового и видимого диапазона Эшеля (Ultra-violet and Visible Echelle Spectrograph - UVES) и 8,2-метровый телескоп Kueyen ESO в обсерватории Paranal - вне конкуренции благодаря комбинации высокого спектрального качества и большой зеркальной собирающей свет области.

Группа астрономов во главе с Патриком Петитжином (Patrick Petitjean) из Астрофизического института Парижа (Institut d'Astrophysique de Paris) и Парижской обсерватории (Observatoire de Paris) во Франции и Раганатаном Срианандом (Raghunathan Srianand, IUCAA Pune, Индия) очень тщательно изучила гомогенную выборку 50 поглотительных систем, наблюдавшихся с помощью UVES и Kueyen по 18 отдаленным линиям визирования квазаров. Работа называлась "Исследование космологических вариаций постоянной тонкой структуры". Они делали запись спектров квазаров в течение 34 ночей, чтобы достичь наибольшего спектрального разрешения и лучшего соотношения сигнал-шум. Затем были применены некоторые автоматические процедуры и компьютерное моделирование, специально разработанные для этого проекта, чтобы выявить возможную вариацию "альфы".

В результате этого обширного изучения было установлено, что за последние 10 миллиардов лет относительные вариации "альфы" не могут превышать одной миллионной (точнее, $6 \cdot 10^{-7}$). Это самое строгое ограничение на вариации "альфы" на настоящий момент из полученных путем изучения линий поглощения квазара. Что еще более важно, этот новый результат не подтверждает предыдущих данных такого рода. Интересно, что этот результат поддерживается другим - менее обширным - анализом, также проведенным на спектрометре UVES на VLT. Даже при том, что те наблюдения были ограничены только одним из самых ярких из известных квазаров - HE 0515-4414, - это независимое исследование также говорит в пользу того, что вариаций "альфы" либо нет, либо они столь малы, что не могут быть обнаружены существующими методами.

Майкл Мерфи (Michael Murphy), астроном из британского Кембриджского университета, входивший в группу, которая с помощью гавайского телескопа Keck нашла изменения в значении постоянной тонкой структуры, с доверием отнесся к новым результатам: "Данные VLT имеют более высокое качество", - говорит он. Результат Keck базировался на большем количестве облаков - 143, - однако отдельные наблюдения проводились не столь длительное время, и квазары были в среднем более слабыми, что делало спектральные линии вдвое менее ясными по сравнению с новыми измерениями на VLT.

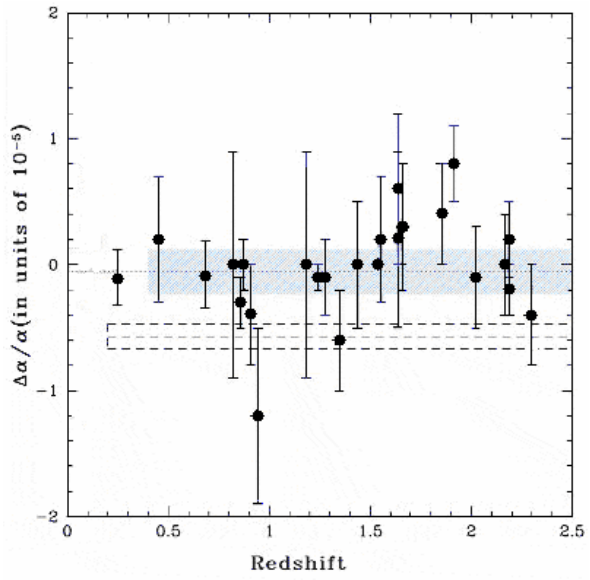


Рис. 7-1. Отклонения постоянной тонкой структуры от величины красного смещения.

Используя квазары, можно исследовать и другие фундаментальные константы. В частности, измеряя длины волн молекулярного водорода в отдаленной части Вселенной, можно оценить возможные вариации отношения между массами протона и электрона. Та же самая группа астрономов на VLT теперь занята именно такой работой (ESO Press Release, New Scientist, Nature News Service).

К настоящему моменту лучшие результаты измерений постоянства постоянной тонкой структуры получены при изучении явления Окло. Постоянная α за период в 2 млрд. лет не изменялась с точностью 10^{-7}. Переходя к среднему изменению α во времени, было получено: $-6.7\cdot10^{-17}$ год$^{-1} < d\alpha/dt\cdot\alpha < 5\cdot10^{-17}$ год$^{-1}$ (Турышев В.Г. Экспериментальные проверки общей теории относительности: недавние успехи и будущие направления исследований. УФН. 2009. Т. 179. № 1. С. 3-34).

Измерение гравитационной постоянной.

Экспериментальное определение гравитационной постоянной G позволяет установить мост между теоретическими и абстрактными аспектами тяготения как универсального атрибута материи и более земным вопросом ее локализации и оценки массы материи, создающей гравитационные эффекты. Последнюю операцию иногда называют взвешиванием. С точки зрения теории мы уже видели, что G – одна из фундаментальных постоянных природы и поэтому имеет первостепенное значение для физической теории. Но величина G должна быть известна и в том случае, если мы хотим обнаружить и «взвесить» материю на основании того гравитационного действия, которое она создает.

По закону всемирного тяготения Ньютона ускорение любого пробного тела в гравитационном поле другого тела с массой m дается формулой $g = Gm/r^2$, где r – расстояние от тела с массой m. В астрономические уравнения движения множители G и m входят только в виде произведения Gm, но никогда не входят по отдельности. Это означает, что массу m, создающую ускорение, можно оценить только в том случае, если известна величина G. Исходя из отношений масс, можно, сравнивая производимые ими ускорения, - выразить массы планет и Солнца в земных массах. Действительно, если два тела создают ускорения g_1 и g_2, то отношение их масс равно $m_1/m_2 = g_1r_1^2/g_2r_2^2$. Это позволяет выражать массы всех небесных тел через массу какого-нибудь одного выбранного тела, например Земли. Такая процедура равнозначна выбору массы Земли в качестве эталона массы. Чтобы перейти от этой процедуры к системе единиц сантиметр–грамм–секунда, нужно знать массу Земли в граммах. Если она известна, то можно

вычислить G, найдя произведение Gm из любого уравнения, описывающего создаваемые Землей гравитационные эффекты (например, движение Луны или искусственного спутника Земли, колебания маятника, ускорение тела при свободном падении). И наоборот, если G можно измерить независимо, то произведение Gm, входящее во все уравнения движения небесных тел, даст массу Земли. Эти соображения позволили экспериментально оценить G. Примером может служить знаменитый эксперимент Кавендиша с торсионными весами, проведенный в 1798. Установка состояла из двух небольших масс на концах уравновешенного стержня, прикрепленного посередине к длинной нити торсионного подвеса. Две другие, более крупные массы закреплены на вращающейся подставке так, что их можно подвести к малым массам. Притяжение, действующее со стороны бóльших масс на меньшие, хотя и намного слабее притяжения такой большой массы, как Земля, поворачивает стержень, на котором закреплены малые массы, и закручивает нить подвеса на угол, который можно измерить. Затем, подведя бóльшие массы к меньшим с другой стороны (чтобы направление притяжения изменилось), можно удвоить смещение и тем самым повысить точность измерения. Модуль упругости при кручении нити предполагается известным, так как его легко можно измерить в лаборатории. Поэтому, определив угол закручивания нити, можно вычислить силу притяжения между массами.

Данные современных экспериментов и наблюдений по гравитации.

Возможность измерения степени стабильности величины G появилась лишь в последние годы в связи с определенным прогрессом в области техники точных измерений времени (в связи с появлением атомных часов) и расстояний (после внедрения технологии радио и лазерного зондирования космических объектов, спутников и Луны) (Кузнецов, 1996).

Одним из способов оценки стабильности величины G является измерение параметров движения Луны в атомном времени. Эти наблюдения ведутся в нескольких обсерваториях в течение 35-40 лет. По измеренному атомными часами интервалу времени между двумя покрытиями Луной одной и той же звезды удается определить период движения Луны и любые его возможные изменения. О параметрах её движения можно судить и на основании лазерной локации Луны. Так, например, сотрудник Вашингтонской военно-морской обсерватории Т. Фландерн сделал анализ более 8000 наблюдений времени лунных покрытий звезд в период между 1955 и 1980 гг., полученных в Японии и США, а также результаты лазерной локации Луны. В результате он получил величину векового ускорения Луны, несколько отличающуюся от принятой ранее (Flandren, 1975). Была вычислена та часть вариации, которая могла бы быть объяснена изменением величины G. Она соответствует изменению $\Delta G/G = (3.2 \pm 1.1)10^{-11}$ за год. Надо сказать, что автор этих исследований весьма осторожно относится к полученной им оценке. Фландерн не исключает. Что в ней могут содержаться неизвестные систематические ошибки. Полученный результат необходимо сравнить с другими аналогичными оценками величины вариации G.

Другая известная экспериментальная проверка стабильности G была выполнена большой группой ученых из Калифорнийского технологического института и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) США. В основу этой работы положены 1136 измерений расстояний между станцией дальней космической связи, расположенной на Земле и спускаемым аппаратом «Викинг» на поверхности Марса. Наблюдения охватывают период с июня 1976 по июль 1982. Измерения расстояний были проделаны с очень высокой точностью (2 м), однако неопределенности, обусловленные задержкой времени при распространении радиосигналов в межпланетной плазме, а также в самой станции слежения и в орбитальном аппарате «Викинг», увеличивают ошибку до 9 м. (Милюков, 1976).

Кроме данных «Викинга», в оценках стабильности G были использованы: 1) результаты измерений расстояний до космического аппарата «Маринер-9», находящегося на орбите вокруг Марса (с 1971 по 1973); 2) результаты радиолокационных измерений расстояний до поверхности Меркурия и Венеры (с 1964 по 1977); 3) лазерных измерений расстояний до Луны (с 1969 по 1970) и 4) оптических измерений положения Солнца и планет (с 1911 по 1979). На основании такого обширного наблюдательного материала была построена модель Солнечной системы, которая учитывала движение не только планет, но и астероидов. Были рассмотрены варианты этой модели с изменяющимися G и M.

В результате решения обобщенной задачи, для Солнечной системы были определены и уточнены ряд параметров, таких как: элементы орбит, массы астероидов, параметры $\Delta G/G$, $\Delta(GM)/(GM)$ и некоторые другие величины. Было получено, что $\Delta G/G = (0.2 \pm 0.4)\cdot 10^{-11}$ за год, а $\Delta(GM)/(GM) = (0.1 \pm 0.8)\cdot 10^{-11}$ за год. Таким образом. Комплекс доступных астрономических наблюдений Солнечной системы дает ограничение вариации величин G и (GM) более жесткие, чем предсказанные П.Дираком ($\Delta G/G \approx 5\cdot 10^{-11}$ за год), и, следовательно, подвергает сильному сомнению справедливость теории Дирака (Dirac, 1938).

Недавно при анализе данных космические экспериментов по лазерной дальнометрии Луны (ЛДЛ), начатых ещё во времена выполнения проекта APOLLO, был установлен новый предел на возможную временную зависимость гравитационной постоянной: $(dG/dt)/G = (4\pm 9)\cdot 10^{-13}$ в год. Результат интерпретирован как отсутствие локального (~ 1 а.е.) расширения масштаба Солнечной системы. Согласно Турышеву, использование лазерной дальнометрии Марса (ЛДМ) позволит этому пределу достигнуть величины $(dG/dt)/G \approx 3\cdot 10^{-15}$ в год. Более того, с помощью метода ЛДМ окажется возможным определить с точностью $dM/dt\cdot M \sim 3\cdot 10^{-14}$ год $^{-1}$ потери солнечной массы. Значение, предсказанное теориями, составляет $7\cdot 10^{-14}$ год $^{-1}$.

7. 2. Планеты других звезд.

Первые наблюдения таких планет.

В восьмидесятых годах прошлого века была совершена первая серьезная попытка поиска планет у одной из ближайших звезд - Летящей звезды Барнарда. Эта звезда, открытая в 1916 году американским астрономом Барнардом, обладает самым большим собственным движением (более 10 угловых секунд в год) и является второй по близости к Солнечной системе после системы альфы Центавра. Она идеально подходила для поиска планет астрометрическим способом. Анализируя фотопластинки, сделанные с 1938 года по 1962 год, Питер Ван де Камп объявил о существовании планеты, в 1,6 раза тяжелее Юпитера с периодом обращения в 24 года. Затем, расширив диапазон изученных архивных фотоснимков до 1916 года, он заявил о двух планетах с массой порядка массы Юпитера. Однако уже в 1973 году другие астрономы усомнились в этом, не обнаружив никаких колебаний в траектории звезды. Оппоненты Ван де Кампа интерпретировали колебания на фотоснимках как искажения, вызванные модернизацией телескопа. Ван де Камп до самой смерти в 1995 году был уверен в своей правоте, он посвятил звезде Барнарда более 40 лет своей жизни и изучил несколько десятков тысяч снимков с ее изображением. В 1995 году Гатевуд установил, что вокруг звезды нет планет тяжелее 10 масс Юпитера. Позднее космический телескоп имени Хаббла провел очень точные (до 0,001 угловой секунды) астрометрические измерения звезды Барнарда и Проксимы Центавры, не выявив никаких колебаний. Тогда и стало ясно, что наземные и неспециализированные космические обсерватории не способны обнаружить этим способом планеты даже около ближайших звезд.

Открытия экзопланет в начале 90-х годов пришли совсем с неожиданной стороны. Еще в начале 60-х, после появления первых мощных радиотелескопов, были обнаружены высокочастотные точечные источники радиоизлучения. Их назвали пульсары. Довольно

быстро пульсары отождествили с нейтронными звездами. Испускающие мощные потоки релятивистских частиц и жесткого излучения, они являются одним из самых неблагоприятных мест для жизни в нашей Галактике. Однако у пульсаров имеется одно уникальное свойство. Они обладают необычайно стабильной частотой импульсов. Измеряя очень малые периодические изменения частоты импульсов в течение несколько месяцев или лет, можно так точно измерить лучевую скорость пульсара, что реально зафиксировать колебания, вызванные влиянием на пульсар объектов с массой, даже меньшей, чем масса Луны! В 1991 году американский астроном Александр Вольжан, анализируя несколько месяцев измерения периодичности пульсара PSR 1257+12 на радиотелескопе в Аресибо, пришел к выводу, что он окружен как минимум тремя планетами с массами равными нескольким массам Земли, и большими полуосями до 1 астрономической единицы. Измеряя очень точно параметры системы, радиоастрономы впервые зафиксировали резонансные явления, наблюдаемые до этого только в Солнечной системе. В начале 2005 года было объявлено об открытие четвертого компонента этой системы, находящегося на орбите с большой полуосью до 4 а.е. и массой менее массы Цереры. Планетные системы пульсаров являются, по-видимому, очень редким явлением: кроме системы пульсара PSR 1257+12, был обнаружен только один газовый гигант у PSR B1620-26 b, называемый еще Мафусаилом. Большая полуось его орбиты составляет 23 а.е.(примерно соответствует орбите Урана в Солнечной системе).

Внеатмосферные телескопы.
Космический телескоп "Hubble".

В апреле 1990 года кораблем многоразового использования на орбиту была выведена ***космическая обсерватория***, на борту которой был установлен телескоп с диаметром главного зеркала 2.4 метра весом более 12 тонн. Впоследствии при запуске космических челноков в 1993г. и в 1997г. на обсерватории были проведены корректирующие работы, заменены некоторые электронные блоки и установлена дополнительная аппаратура. Это позволило продлить срок службы телескопа сверх запланированного времени и оправдать заложенные надежды на чрезвычайно высокую эффективность телескопа.

Угловое разрешение телескопа удалось повысить до 0.1 угловой секунды и регистрировать объекты до 30-ой звездной величины.

Благодаря Хаббловскому телескопу обнаружены:

протопланетные диски вокруг молодых звезд,

новые типы планетарных туманностей с чрезвычайно сложной структурой газовых волокон.

Богатый материал получен о ***планетах*** нашей Солнечной системы:

- сезонные изменения полярных шапок **Марса**; извержение вулкана на **спутнике Ио**;
- падение на Юпитер **кометы Шумейкера-Леви 9**;
- удалось проследить формирование газового хвоста у **кометы Хейла-Боппа** во время ее подлета к Солнцу и пронаблюдать взрывоподобные выбросы пыли из ядра кометы.

В рамках программы по исследованию ***галактик*** :

- получены данные о ***формировании молодых звезд***;
- определены периоды пульсаций цефеид в далеких галактиках и по ним уточнена ***шкала межгалактических расстояний***;
- только благодаря отсутствию атмосферных помех реализовалась возможность увидеть в деталях ***ядра галактик***,
- наблюдать отдельные ***молодые звездные скопления***, ***квазары*** и
- получить веские свидетельства о существовании ***черных дыр***.

Получаемые результаты через определенное время становятся доступными по сети **Internet** (http://www.stsci.edu/) для бесплатного использования всеми интересующимися.

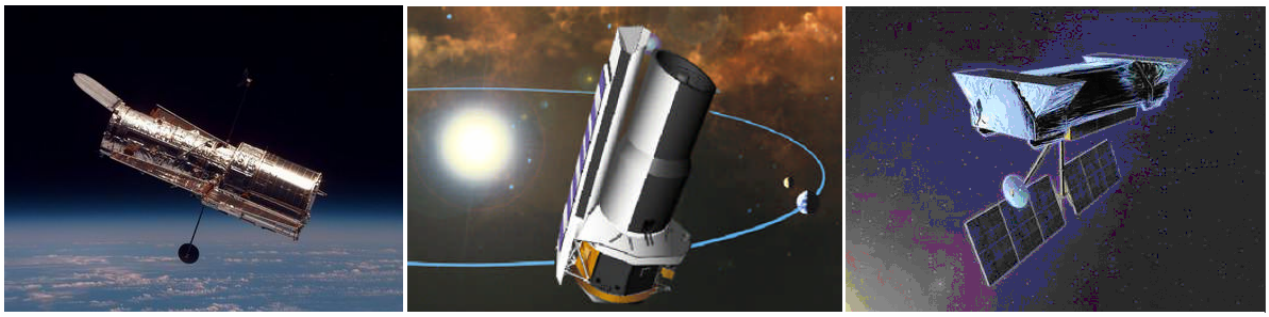


Рис. 7-2. Космические телескопы: «Хаббл», «Спитцер» и инфракрасный интерферометр (SIM).

Космический телескоп NASA Спитцер (Spitzer).

Телескоп впервые зафиксировал достаточно света от планет вне нашей солнечной системы, известных как экзопланеты, чтобы идентифицировать молекулы в их атмосферах. Это достижение поможет обнаруживать возможное наличие жизни на экзопланетах. Инфракрасный спектрограф Спитцера был построен Корнеллским университетом (the Cornell University), Итака, штат Нью-Йорк. Его разработкой руководил доктор Джим Хуок (Jim Houck) из Корнелла.

Спитцер получил детальную информацию, называемую спектром, о двух разных газообразных экзопланетах с именами HD 209458b и HD 189733b. Эти так называемые "горячие Юпитеры", подобно Юпитеру, состоят из газа, но вращаются намного ближе к своим солнцам. Спитцер смог выделить спектры из слабого свечения двух планет с помощью приема, известного под названием "вторичное затемнение". По этому методу – впервые использованному Спитцером в 2005 году, чтобы напрямую обнаружить свет от экзопланеты в первый раз – за так называемой проходящей планетой ведется наблюдение во время ее вращения за своей звездой, когда она временно исчезает из нашего Земного поля зрения. Измеряя перепад в инфракрасном свете, который возникает, когда планета исчезает, Спитцер может узнать количество света, исходящего собственно от планеты. Этот прием будет работать только в инфракрасных волнах, где планета ярче, чем в видимых волнах и четче выступает рядом с ослепительным сиянием своей звезды.

Космический телескоп Кеплер.

7 марта 2009 с мыса Канаверал был запущен космический телескоп Кеплер. Его цель: найти планеты, пригодные для обитания.

Телескоп, названный в честь астронома Иоганна Кеплера, будет летать вокруг Земли три с половиной года. Ожидается, что за это время он соберет информацию примерно о ста тысячах звездных систем в нашей галактике. На основе полученных данных можно будет сказать, какая из планет этих систем пригодна для обитания. Для этого нужно, чтобы она была нагрета до определенной температуры, на ней была вода в жидком виде и кислород. Именно такие планеты будет искать «Кеплер» с помощью самого большого на сегодняшний день телескопа-фотометра с диаметром рабочей поверхности около метра. Впрочем, ответить определенно, на вопрос, одиноки ли мы во Вселенной, телескоп не сможет. Любой сигнал, отправленный к исследуемым планетам, где, возможно, есть разумная жизнь, дойдет до них только через сотни лет.

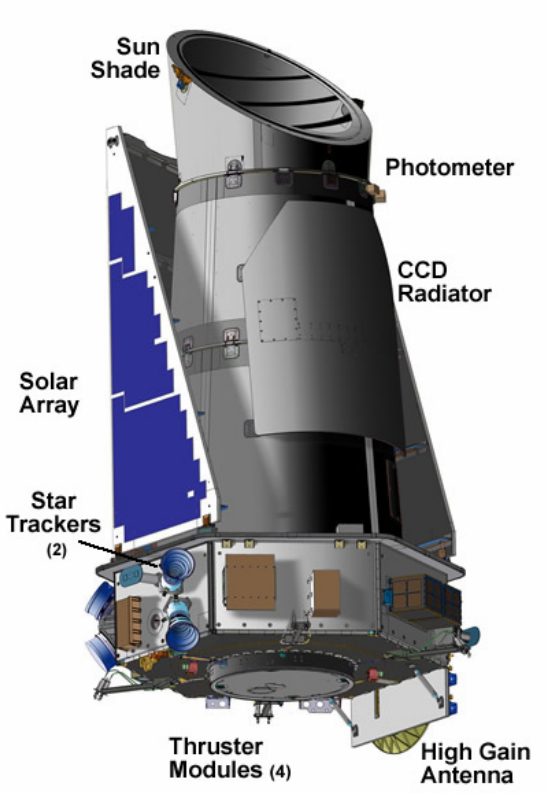


Рис. 7-2. Космический телескоп Кеплер.

Космический интерферометр SIM PlanetQuest.

SIM (Space Interferometry Mission) - проектируется как один из самых точных астрономических приборов, хотя его характеристики, на первый взгляд, и напоминают параметры дорогого, но любительского инструмента. Интерферометр представляет собой 30-сантиметровый телескоп, куда поступает свет от пары зеркал, разделенных 10-метровым расстоянием. С точки зрения оптики, такое устройство эквивалентно 10-метровому телескопу по качеству воспроизведения мелких деталей, хотя "светосила" интерферометра и меньше во много раз. Слабые источники света останутся для него невидимыми, зато яркие, но не слишком удаленные друг от друга звезды будут выглядеть как два различных объекта, даже если их не "разделяет", например, телескоп Hubble. Космический интерферометр оказывается "космической линейкой" для сверхточного измерения расстояний, одно "деление" на которой соответствует 4 микросекундам дуги (это значит, например, что с Луны он мог бы различить головы орла на российской рублевой монете). В частности, SIM способен зафиксировать неровности звездных траекторий, которые объясняются присутствием невидимых планет. Этот эффект срабатывает безотказно даже в тех случаях, когда Kepler не обнаружил бы ничего подозрительного. А "неровности" позволяют вычислить, сколько весит и как далеко от звезды находится планета.

Запуск интерферометра SIM был намечен на 2011 год. Космическую обсерваторию снабдили бы координатами двух тысяч звезд из разных областей Млечного Пути, которые уже прошли предварительный отбор. Интерферометр - в роли "промежуточного звена" между двумя другими миссиями - должен был рассортировать планеты и подготовить список, к каждому пункту которого следовало отнестись уже со всей серьезностью.

Методы обнаружения внесолнечных планет.

Известны пять основных методов обнаружения внесолнечных планет: *Во-первых*, это метод прямых наблюдений - можно элементарно увидеть планету рядом с

другой звездой, подобно тому, как видим планеты нашей звёздной системы. Впрочем, хотя сфотографировать гигантскую планету у другой звезды таким способом однажды удалось, обнаружена она была другим способом. Тем не менее, развитие телескопов позволяет надеяться, что скоро метод прямых наблюдений станет именно методом обнаружения.

Во-вторых, это доплеровский метод: измеряя смещение линий различных элементов в спектре звезды, астрономы могут заметить периодические изменения её скорости, связанные с обращением светила вокруг центра масс системы звезда-планета. Этот метод особо чувствителен к массивным планетам, расположенным рядом со своими светилами. При этом желательно видеть орбиту системы «с ребра» - в противном случае никаких изменений скорости не будет. Этим методом были открыты большинство внесолнечных планет. Его небольшая модификация - измерение моментов прихода импульсов от пульсаров - работает для этого типа небесных объектов.

Третий метод - астрометрический: астрономы измеряют смещение положения звезды, также вызванное её обращением вокруг общего с планетой центра масс. Выглядит такое смещение, как «виляние» звезды в стороны от средней траектории её перемещения по небу относительно более далёких звёзд. Этот метод также чувствителен к массивным спутникам звезды, однако расположенным, напротив, на относительно большом от неё расстоянии. Кроме того, он работает лишь для близких звёзд. Пока таким методом открывались лишь спутники-звёзды, планеты слишком маломассивны, чтобы вызвать заметное смещение.

Четвёртый метод, активно развивающийся в настоящее время - метод транзитов. Астрономы следят за блеском большого количества звёзд. Если плоскость орбиты планеты пересекает диск звезды, будут происходить регулярные «частные затмения» или прохождения планеты по диску звезды. Хотя заметить крохотный диск планеты на неразличимом в телескоп диске звезды нельзя, блеск звезды чуть ослабнет. Этот метод чувствителен к крупным спутникам, однако требует, чтобы мы смотрели на систему «с ребра»: в противном случае затмений не будет. Данным методом большинство внесолнечных планет открывается в настоящее время.

Пятый метод - гравитационное линзирование. Если звезда с планетой проходит перед какой-то далёкой звездой, блеск последней будет увеличиваться за счёт эффекта гравитационного линзирования. Наличие планеты чётко отметится на кривой блеска в виде дополнительного пика. Так были открыты несколько планет массой, близкой к массе Земли. Кроме того, возможны различные вариации этого метода - например, можно наоборот, искать планету у звезды-источника с помощью расположенной на луче зрения звезды-линзы. Недостаток этого метода - единичность каждого события. Поймав одно событие гравитационного линзирования, от данной звезды-линзы, следующего события нужно ждать очень долго.

Внесолнечные планеты.

Планета в созвездии Водолея.

Международная группа астрономов, работающая на телескопе Кек в Гавайской обсерватории, обнаружила в созвездии Водолея самую маленькую планету вне пределов Солнечной системы. Планета вращается вокруг звезды Gliese 876, ее диаметр всего в 2 раза больше земного, а масса превосходит массу Земли в 6-8 раз. Звезда Gliese 876 находится в 15 световых годах от нашего Солнца. Если путешествовать на кораблях типа "Союз", полет займет 5,5 миллиона лет. Это возраст человека от самых далеких наших предков.

Принято считать, что в Солнечной системе существует восемь планет. Ну, максимум девять, если добавить сомнительный Плутон. Но в 1990-х годах с планетами начался форменный бум. Сегодня открыто уже около 150 планет. Вне пределов нашей Солнечной системы, они называются экзопланетами, или экстрасолнечными планетами.

Все экзопланеты зафиксированы по косвенным признакам, исходя из колебаний положения звезд, которое вызвано гравитационным воздействием планет, неразличимых при наблюдении с Земли. Это так называемое доплеровское смещение, вроде показаний милицейского радара, который ловит лихачей, превышающих скорость на дороге. Астрономы вооружены лучше гаишников - оптические спектрометры определяют доплеровское смещение линий с точностью до 10 метров в секунду на гигантских расстояниях. Именно такие приборы привели к открытию группы профессора Джеффри Марси на Гавайях Gliese 876 в созвездии Водолея - одна из ближайших к нам звезд. По классификации она относится к классу коричневых карликов. Это класс небесных объектов, который занимает промежуточное положение между обычными звездами и собственно планетами. Коричневые карлики были предсказаны в 1963 году, но впервые зафиксированы совсем недавно - в 1995 году. Сегодня на небосклоне обнаружено всего 200 таких карликов, гораздо меньше, чем белых карликов и черных дыр.

Коричневые карлики - совсем дистрофики, их масса меньше, чем у нашего Солнца. Из-за малой массы внутри коричневых карликов невозможны типичные для звезд термоядерные реакции. Свет и тепло выделяются за счет медленного гравитационного сжатия. Астрономы иногда жалостливо называют их "неудавшимися звездами". Однако именно с таких неудавшихся звезд астрономам в последнее время все чаще улыбаются новые экзопланеты. Как это случилось, к примеру, в 2004 году, когда была впервые сфотографирована так называемая Суперземля около звезды Мю в созвездии Жертвенника в 50 световых годах от Земли. Суперземля была в 14 раз больше Земли и на тот момент оказалась самой маленькой экзопланетой.

У карлика Gliese 876 имеются еще две газообразные планеты-гиганта, похожих на наш Юпитер, которые были обнаружены еще раньше. Вообще большинство экзопланет - это газообразные гиганты вроде Юпитера, которые не имеют ничего общего с Землей. Что касается только что найденной горячей кузины нашей Земли, то температура на ее поверхности достигает 200-400 С, а год равен всего двум дням. Планета находится к звезде в 50 раз ближе, чем наша Земля к своему Солнцу. И все-таки астрономы уверены, что именно эта планета более всех из найденных, - похожа на Землю. Экзопланеты размером с Землю и даже еще более мелкие уже попадались в объективы телескопов, но они живут около раскаленных нейтронных звезд и совсем не похожи на Землю. Планета же у звезды Gliese 876 - это каменистый объект с плотной атмосферой, по размеру занимающий положение между Марсом и Ураном.

На заре науки Карл Линней занимался классификацией животных. Сегодня астрономы столь же увлечены классификацией планетных систем, хотя материала у них гораздо меньше, чем было у Линнея. Без такой классификации создать теорию формирования и эволюции Вселенной невозможно. К тому же, в отличие от Линнея, который занимался чистым описанием, современные классификаторы вооружены мощными спектрометрами и постигают истину не словом, а цифрой, что гораздо эффективнее. *Уже можно считать доказанным, что формирование планет рядом со звездами является закономерным этапом их эволюции и наша Солнечная система не уникальна.* Общие закономерности планетных систем позволяют предположить, что существование в комфортной "зоне жизни" планет земного типа является редким явлением. Но в принципе нельзя исключить того, что у некоторых планет в Галактике имеется биосфера.

Что касается новой планеты около звезды Gliese 876, то и на ней, несмотря на адовы условия, жизнь возможна. Планета может быть повернута к своей звезде одной стороной, как смотрит на свои планеты большинство спутников, в том числе Луна на нашу Землю. И на сумеречной линии перехода "день-ночь" температура может оказаться приемлемой для существования неизвестных нам биологических форм жизни. Ведь даже капризный человек ко всему привыкает.

Открыта планета у молодой звезды.

TW Гидры - одна из наиболее изученных молодых звезд в окрестностях Солнца. Это ближайшая к нам известная звезда типа Т Тельца. Она удалена от Солнца на 56 ± 7 пк, ее масса оценивается в 0.7 ± 0.1 солнечных масс, светимость составляет 0.20 ± 0.05 светимостей Солнца. Ее спектральный класс - K8 Ve, т.е. с эмиссионными линиями в спектре. Вокруг TW Гидры вращается газопылевой протопланетный диск. Возраст звезды не превышает 10 млн. лет.

Группа немецких астрономов из Института Макса Планка методом измерения лучевых скоростей родительской звезды обнаружила у нее планету-гигант с минимальной массой (параметром m sin i), равной 1.2 ± 0.4 масс Юпитера. Планета вращается вокруг своей звезды на расстоянии 0.041 а.е. (чуть больше 6 млн. км) и делает один оборот за 3.56 суток. Параллельно они измерили период вращения молодой звезды, оказавшийся равным 2.1 ± 0.5 суток. Регулярное изменение полутолщины спектральной линии водорода Hα с периодом 9.05 суток авторы связали с наличием внутреннего края газопылевого диска, расположенного на расстоянии 0.07 а.е. от звезды. Таким образом, получается, что молодой горячий гигант вращается вокруг своей звезды в области, уже свободной от газа и пыли.

Какова истинная масса TW Hya b? Наклонение протопланетного диска звезды TW Гидры известно из наблюдений и составляет 7 ± 1 градусов (т.е. система наблюдается практически плашмя). Если плоскость орбиты планеты близка к экваториальной плоскости протопланетного диска, истинная масса планеты оказывается равной 9.8 ± 3.3 масс Юпитера. Иначе говоря, в самом "плохом" случае TW Hya b оказывается не планетой, а легким коричневым карликом.

Авторы отмечают, что обнаружение массивной планеты-гиганта у столь молодой звезды говорит о том, что время формирования планет-гигантов оказывается меньше 10 млн. лет (для сравнения, считается, что планеты земной группы Солнечной системы формировались в течение ~ 100 млн. лет). *Этот результат не находит объяснения.*

Очень плотная планета.

Спутник CoRoT нашёл сразу несколько внесолнечных планет и загадочный тёмный объект неизвестной природы. Его масса в 50 раз меньше, чем у Солнца, а плотность в 4 раза больше, чем у свинца. Для бурых карликов – объектов промежуточных между планетами и звёздами масс – это слишком плотно, и, возможно, астрономам придётся переписать их теорию.

Французские астрономы, обрабатывающие данные с исследовательского спутника CoRoT, объявили об обнаружении сразу трёх, а возможно, и четырёх объектов, обращающихся вокруг нормальных звёзд. Два из них – обычные «горячие юпитеры» CoRoT-Exo-4b и CoRoT-Exo-5b. Их массы составляют 70% и 90% массы крупнейшей планеты Солнечной системы Юпитера, а вокруг своих звёзд, которые немногим больше Солнца, эти гиганты обращаются всего за 9 и 4 дня, соответственно; Юпитеру, чтобы обежать Солнце, требуется 12 лет.

Учёные также осторожно заявляют о возможности обнаружения планеты радиусом всего в 1,7 радиусов Земли; сигнал от неё – это крохотное ослабление блеска звезды на 0,05% – недостаточно силён для уверенных заявлений на этот счёт, потому пока обозначение внесолнечной планете не присваивается.

Однако наибольший интерес вызывает четвертый достоверно обнаруженный объект – CoRoT-Exo-3b. Будучи по массе промежуточным звеном между планетами и звёздами, объект слишком мал, чтобы быть одним из бурых, или коричневых, карликов, считающихся основным типом объектов с такими массами. Согласно сообщению Европейского космического агентства, доклад об обнаружении CoRoT-Exo-3b был представлен на проходящей сейчас в Гарварде конференции по поиску экзопланет транзитным методом.

Как рассказала в своём докладе на конференции Анни Баглен из Парижской обсерватории, CoRoT-Exo-3b обращается вокруг слабенькой звездочки 13-й звёздной величины, идентифицируемой в эксперименте как CoRoT-Exo-3. На деле она немного ярче, горячей и массивнее Солнца, только находится примерно в 2 тысячах световых лет от нашей звёздной системы.

Необычный объект обращается вокруг неё за 4,25 земных дня по почти круговой орбите радиусом около 7,5 миллиона километров и при массе 20,2 масс Юпитера (около 2% солнечной) имеет диаметр лишь около 0,8–0,9 юпитерианских. Средняя температура поверхности CoRoT-Exo-3b при такой близости к центральной звезде должна быть около 2 200 градусов по шкале Цельсия – если, конечно, у него нет внутренних источников энергии.

При этом средняя плотность CoRoT-Exo-3b составляет **около 45 г/см^3**, что вдвое превосходит плотность платины, в 2,5 раза – урана и в 4 раза больше плотности свинца. Плотность других планет из этой системы несколько меньше, но всё равно очень велика (Deleuil M, Bonomo A.S., Ferraz-Mello S. et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission Xx. CoRoT-20-b: A very high density, high eccentricity transiting giant planet. arXiv:1109.3203v1. 14 Sep. 2011). *Этот результат не находит объяснения.*

Планетные системы у недозвёзд.

Астрономы из США, Мексики и Венесуэлы в созвездии Тельца нашли две звезды, которые, не успев ещё полностью сформироваться, уже обзавелись целыми семьями планет. Это самые молодые планетные системы, известные к настоящему времени.

Объекты UX Tauri A и LkCa 15 расположены примерно в 450 световых годах от Солнечной системы в направлении созвездия Тельца. Их относят к классу протозвёзд, которыми богато это созвездие и его окрестности; возраст данной области звездообразования – около миллиона лет. Протозвёзды, как и подсказывает их название, – предшественники нормальных звёзд, у которых уже есть обособленное физическое тело, однако природа пока не вдохнула в них жизнь – ядерные реакции в центре таких звёзд начнутся позднее.

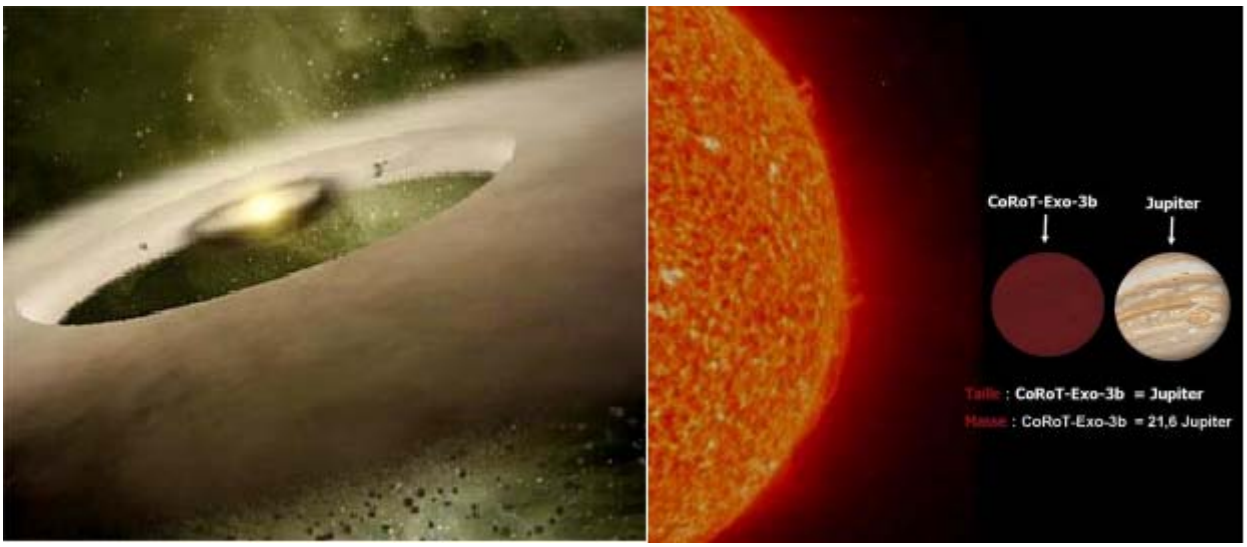


Рис. 7-3. Планеты вращаются вокруг ещё не сформировавшейся звезды (слева). Очень плотная планета (справа).

«Недозвёзды» уже ярко светятся, лишь немного уступая в светимости тому объекту, который появится на их месте через несколько миллионов лет. Энергию даёт сжатие газопылевой смеси, из которой рождается звезда – она всё ещё примерно в полтора

раза больше своего нормального размера. Медленно оседая к центру под действием собственной гравитации, вещество нагревается и начинает ярко светить. Кроме того, на поверхность объекта всё ещё выпадает вещество, оставшееся в том газопылевом диске, из которого сформировалась звезда. *Этот результат так же как предыдущий - не находит объяснения.*

Планета, похожая на Землю.

В созвездии Водолея обнаружена планета, похожая на Землю. Правда, по словам астрофизиков, там слишком жарко, поэтому найти там жизнь вряд ли удастся. С другой стороны, это открытие укрепило надежды ученых найти земного двойника. Планету нашли у звезды Gliese 876 – красного карлика в созвездии Водолея, в 15 световых годах от Земли. Радиус найденной планеты, по оценкам астрофизиков, примерно в два раза больше радиуса Земли, масса в 5,9 раз больше земной, а температура на поверхности достигает 200–400 градусов Цельсия.

По словам ученых, родительская звезда новой экзопланеты совсем маленькая: ее масса составляет только треть от массы Солнца. В 1998 году астрономы из Исследовательского центра Эймса NASA обнаружили первую планету в ее системе. Это был газовый гигант с массой в два Юпитера. Спустя три года те же ученые нашли у Gliese 876 вторую планету, тоже газовый гигант, хотя с массой в два раза меньше массы Юпитера. Изучая их орбиты, астрономы заподозрили, что в планетарной системе Gliese 876 существует и третья планета – совсем небольшая, с орбитой, приближенной к круговой.

По словам специалистов, сейчас они обладают достоверной информацией о планете и ее орбите. Траектория ее движения находится на расстоянии примерно 10 радиусов звезды, а период обращения – 1,94 земных дня. «Исходя из этого, можно предположить, что температура на поверхности планеты не менее 200 градусов Цельсия, – пояснили ученые, – то есть здесь слишком жарко для существования жидкой воды и тем более жизни». Но зато, как считают специалисты, структура планеты может быть похожа на земную. У нее, вероятно, железное ядро и кремниевая мантия.

Планета «Фомальгаут b».

По наблюдениям на Космическом телескопе открыта планета около близкой звезды Фомальгаут. Получено прямое изображение планеты. Наблюдается ее движение вокруг материнской звезды.

Счет открытым экзопланетам уже идет на сотни. Даже удалось получить прямые изображения планет. Тем не менее, новое открытие выглядит весьма впечатляющим. Исследовав "рот кита" (именно так переводится название звезды), ученые увидели планету, вероятно ответственную за внешний вид пылевого пояса, окружающего Фомальгаут.

Наблюдения на Космическом телескопе позволили увидеть около известной близкой звезды Фомальгаута (расстояние 7.7 пк от Земли) мощный пылевой диск, а в нем разглядеть планету. Видно, что за 1.73 года наблюдений планета сместилась. Соответственно, можно определить ее примерную орбиту. Ее большая полуось составила примерно 115 а.е. Период обращения около 872 лет. Сама планета довольно массивна, ее масса составляет несколько юпитерианских.

Фомальгаут - относительно молодая звезда (100-300 миллионов лет), поэтому вокруг нее еще сохранился мощный пылевой диск. Изначально ученые предполагали, что форма диска определяется влиянием планет, находящихся в нем. А поскольку планеты очень молоды, то они еще должны быть горячими, поэтому можно было надеяться на их прямую регистрацию. Проблема лишь в том, что Фомальгаут - очень яркая звезда (она вдвое масивнее Солнца). Поэтому понадобился Космический телескоп и коронографические наблюдения.

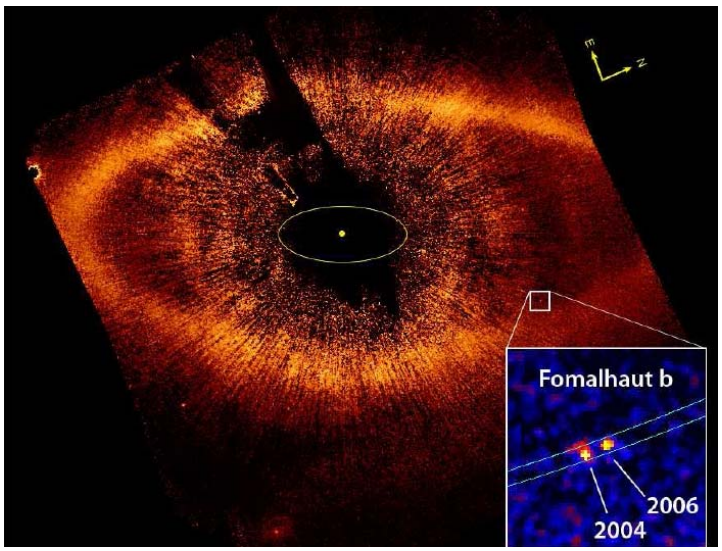


Рис. 7- 4. Планета «Fomalhaut b». Изображение получено Космическим телескопом имени Хаббла на волне 0.6 микрон. Сама яркая звезда была закрыта. Виден мощный пылевой пояс-диск. Желтый эллипс, показанный для масштаба, имеет большую полуось 30 а.е. (это примерно орбита Нептуна). На врезке показано изображение планеты в 2004 и 2006 гг.

Первые наблюдения на КТХ были проведены в 2004 году. Кроме них провели сеансы на 10-метровом телесопе имени Кека (Keck-II). Это было нужно для обнаружения собственных движений попавших в поле зрения объектов. Ведь всегда есть фоновые источники, но они не движутся вместе с Фомальгаутом, значит, наблюдая то же поле через несколько месяцев, можно отсеять лишнее (поскольку Фомальгаут близок к нам, то его собственное движение довольно велико).

Наконец, удалось показать, что объект, получивший обозначение Фомальгаут b, физически связан со звездой. Массу планеты авторы попробовали определить, исходя из того, что именно она ответственная за морфологию пылевого диска. Для этого было проведено достаточно сложное моделирование. Итогом послужила оценка массы планеты <~3 массы Юпитера. Данные, полученные из анализа прямого изображения планеты, не противоречат этой оценке. Реалистичные модели атмосфер молодых планет дают что-то около 2.5 масс Юпитера или чуть меньше. Хотя остаются кое-какие необъясненные детали, что неудивительно: мы еще плохо понимаем устройство таких объектов.

Время формирования планеты.

В статье, опубликованной в 2001 в журнале Science, авторы (Throop H.B. et al.), используя внеатмосферный телескоп Хаббла, получили очень интересный и чрезвычайно важный результат. В этой статье приведены результаты исследований спектров пропускания галактического электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн при просвечивании протопланетного диска в созвездии Ориона. Возраст исследуемого протопланетного диска не превышает **100 000 лет**. Согласно общепринятой модели образования планет в таком диске должны находиться планетозимали, рассеивающие это излучение. Однако ожидаемого эффекта поглощения электромагнитного излучения не обнаружено. Авторы пришли к выводу, что планеты в этом диске уже сформировались, хотя их время формирования значительно меньше (в 1000 раз!), чем следует из принятой модели формирования планет. *И этот результат не находит объяснения.*

7. 3. Коричневые карлики.

Коричневые карлики (Сурдин, 1999) - космические тела, занимающие по своим массам промежуточное положение между звездами и планетами. Коричневыми карликами

принято называть объекты с массами приблизительно от 0,01 до 0,08 масс Солнца. От нормальных звезд они отличаются тем, что температура в их недрах никогда не достигает значений, необходимых для протекания важнейшей термоядерной реакции — превращения водорода в гелий, которая обеспечивает длительное свечение обычных звезд. Но по сравнению с планетами, вообще не способными к термоядерному синтезу, коричневые карлики на начальном этапе своей жизни все же разогреваются настолько, что "сжигают" в термоядерных реакциях некоторые редкие элементы (дейтерий, литий), что делает их на короткое время похожими на звезды. Температура поверхности коричневых карликов обычно не превышает 2000 К, поэтому они имеют темно-красный или даже инфракрасный цвет; отсюда и название этих объектов (англ. brown dwarf).

Предсказание и обнаружение коричневых карликов.

Обычные звезды проводят большую часть своей жизни в состоянии равновесия между силой тяжести, стремящейся их сжать, и препятствующей этому силой газового давления. Высокое давление в недрах звезды обеспечивается огромной температурой плазмы в миллионы и даже десятки миллионов кельвинов, которую поддерживают постоянно идущие в центральной части звезды термоядерные реакции, т. е. реакции синтеза ядер более тяжелых химических элементов из более легких, например гелия из водорода, углерода из гелия и т.п. В этих реакциях выделяется ровно столько энергии, сколько звезда постоянно теряет с поверхности в виде излучения. Чем меньше масса звезды, тем ниже температура в ее ядре и тем медленнее протекают там термоядерные реакции. В 1958 астрофизик индийского происхождения Шив Кумар (университет штата Виргиния, США) занялся теоретическим изучением маломассивных звезд, предположив, что могут существовать звездообразные тела настолько малой массы, что температура в их недрах окажется недостаточной для протекания ядерного синтеза. Дело в том, что в период формирования звезды ее гравитационное сжатие обычно продолжается до тех пор, пока температура в центре не достигнет уровня, необходимого для протекания термоядерных реакций. У массивных звезд эта температура достигается при относительно невысокой плотности вещества, у звезд малой массы - при более высокой (например, в центре Солнца плотность плазмы превышает 100 граммов на кубический сантиметр). В 1963 расчеты Кумара показали, что у формирующихся звезд (протозвезд) очень малой массы сжатие останавливается раньше, чем температура в их центре достигает значения, необходимого для важнейшей термоядерной реакций - синтеза гелия из водорода ($4H \rightarrow He$). Причиной остановки сжатия протозвезды служит квантовомеханический эффект — давление вырожденного электронного газа. Таким образом, при массе звезды менее 0,07-0,08 массы Солнца (точное значение зависит от ее химического состава) она не способна сжигать легкий изотоп водорода, а значит, - в ее жизни нет фазы Главной Последовательности — самого длительного этапа эволюции нормальных звезд. Поэтому такие объекты, вообще говоря, нельзя называть звездами. Но с другой стороны, это и не планеты, поскольку в эволюции объекта с массой более 0,013 массы Солнца, как показывают расчеты, должна быть короткая термоядерная стадия, в ходе которой сгорает редкий тяжелый изотоп водорода — дейтерий, превращаясь в легкий изотоп гелия ($D + p \rightarrow He$). Этот краткий эпизод термоядерного горения не задерживает надолго гравитационное сжатие протозвезды. Температура ее поверхности даже при максимальном разогреве не превышает 2800 К, а затем начинает снижаться, и объект практически перестает светиться.

Итак, согласно теоретическому предсказанию Кумара, протозвезды с массой от 0,013 до приблизительно 0,075 массы Солнца в конце своего гравитационного сжатия проявляют робкую попытку стать звездой, но так ею и не становятся; их краткая жизнь заканчивается остыванием и полным исчезновением с небосвода. Такие звезды-неудачники, открытые "на кончике пера", Кумар назвал "черными карликами",

но обнаружить их долго не удавалось, и новый термин забылся. В середине 1970-х годов астрономы выяснили, что помимо наблюдаемых, - в телескоп нормальных ярких звезд в нашей и других галактиках, - присутствует огромное количество невидимого вещества; подозрение пало на тусклые карликовые объекты, предсказанные Кумаром, и они вновь стали популярны. Крис Дэвидсон (университет штата Миннесота, США) назвал эти неведомые звезды "инфракрасными карликами"; другие астрономы хотели назвать их "малиновыми карликами", но в 1975 студентка-дипломница из университета в Беркли (США) Джил Тартер придумала термин "brown dwarf", и он прижился. На русский язык его перевели как "коричневый карлик", хотя в действительности эти объекты имеют инфракрасный цвет, и точнее было бы перевести brown как "темный" или "тусклый". Но термин уже вошел в нашу научную литературу, и, вероятно, навсегда за группой промежуточных между звездами и планетами объектов закрепилось название "коричневые карлики".

Три десятилетия продолжались безрезультатные поиски этих тусклых светил. Их первое надежное обнаружение состоялось лишь после того, как были созданы новые гигантские телескопы диаметром 8-10 метров, снабженные инфракрасными приемниками изображения (ПЗС-матрицами большого размера) и мощными ИК-спектрографами, рассчитанными именно на тот диапазон излучения, в котором должны светиться коричневые карлики. Но даже такая мощная техника способна обнаружить эти слабые источники лишь на расстоянии не более 100 пк (300 св. лет) от Солнца, а в таком сравнительно небольшом объеме пространства их довольно мало. Чтобы выявить несколько коричневых карликов, пришлось провести детальный обзор всего неба. Некоторые из них обнаружились в соседнем молодом звездном скоплении Плеяды.

Первый успех пришел в 1996, когда японские астрономы (Накаджима и др.) обнаружили рядом с очень маленькой и холодной звездой Gliese 229 еще более мелкий и холодный спутник с температурой поверхности всего около 1000 К и мощностью излучения в 160 тыс. раз слабее солнечной. Его незвездная природа была окончательно подтверждена в 1997 с помощью "литиевого теста" (см. ниже); обозначенный как Gliese 229B, этот объект стал первым коричневым карликом, открытым астрономами. Его размер почти в точности равен размеру Юпитера, а масса оценивается в 0,03-0,06 масс Солнца. Коричневый карлик Gliese 229B обращается вокруг своего более массивного компаньона Gliese 229A по орбите радиусом около 40 а.е. с периодом около 200 лет. В 1997 были открыты два первых изолированных коричневых карлика (Kelu-1 и DENIS-PJ1228-1547), а также было доказано, что коричневым карликом является объект GD 165B, компаньон белого карлика. Эти четыре и стали прототипами нового класса астрономических объектов, занявших место между звездами и планетами.

Строение и эволюция коричневых карликов.

До середины 1990-х годов граница между звездами и планетами представлялась вполне определенной. Наиболее массивной планетой считался Юпитер, масса которого составляет всего 0,001 массы Солнца, а наименьшие среди известных звезд были значительно крупнее: они имели массу около 0,1 солнечной. Однако за последние годы были обнаружены экзопланеты во много раз массивнее Юпитера и близкие к ним по массе мини-звезды. Это потребовало точного определения понятий "звезда" и "планета" на основе физических различий в их эволюции. Поскольку характерным признаком звезды служат протекающие в ее недрах термоядерные реакции, именно их отсутствие было положено в основу определения планеты. Согласно Б.Р.Оппенгеймеру и др. (2000), планета — это объект, в котором за всю его историю реакции ядерного синтеза не происходят ни в каком виде. Если же на каком-либо этапе эволюции мощность термоядерного синтеза была сравнима со светимостью объекта, то он достоин называться звездой. Расчеты показывают, что в звездах с массой менее 0,07-0,08 массы Солнца температура так низка, что термоядерные реакции с участием легкого изотопа водорода

(т.е. реакции pp-цикла) практически не происходят. Это критическое значение массы звезды называют "границей возгорания водорода", или "пределом Кумара". Единственным долговременным источником энергии менее массивных звезд служит их гравитационное сжатие. Однако в процессе этого сжатия каждая протозвезда проходит короткий этап горения дейтерия. Этот тяжелый изотоп водорода вступает в термоядерную реакцию при более низкой температуре, чем легкий водород, потому что реакция с дейтерием происходит под действием электромагнитного, а не слабого взаимодействия. Необходимые для этой реакции условия возникают в звездах с массой более 0,013 солнечной (что всего в 14 раз больше массы Юпитера). Но содержание дейтерия в космическом газе ничтожно (0,001%), сгорает он быстро и слабо влияет на светимость звезды; основным источником ее энергии в этот период все равно остается гравитационное сжатие.

Звезды наименьшей массы, обладающие ядерным источником энергии, очень экономно расходуют запас водорода: например, звезда с массой 0,085 солнечной может поддерживать свою невысокую светимость (около 0,1% от солнечной) в течение 6000 млрд. лет, что в 400 раз больше нынешнего возраста Вселенной. Но коричневые карлики с массой чуть ниже предела Кумара практически лишены ядерной энергии; после быстрого сгорания дейтерия и остановки гравитационного сжатия они быстро остывают и становятся невидимыми всего за несколько миллиардов лет. Поэтому в Галактике может быть много холодных и совершенно невидимых коричневых карликов, которые могли бы составлять немалую долю ее скрытой массы.

Отличить молодой, еще не остывший коричневый карлик от маленькой звезды довольно сложно: их цвет и светимость весьма близки. Критическим признаком при этом сейчас считается "литиевый тест" — наличие линий лития в спектре источника. Дело в том, что литий — нежный элемент: он разрушается ядерными реакциями при температуре выше 2,4 млн. К. Поэтому все нормальные звезды должны сжечь свой литий еще до начала реакций с участием водорода, причем сжечь не только в ядре, но во всем объеме звезды, включая поверхностные слои. Причина в том, что маломассивные звезды и коричневые карлики полностью конвективны: их вещество активно перемешивается ("кипит") и поэтому каждая его порция рано или поздно проходит через ядро, где при высокой температуре литий сгорает без остатка. Расчеты показывают, что звезда минимальной массы (0,075 массы Солнца) сжигает 99% своего лития за 100 млн. лет, а коричневый карлик с массой ниже 0,06 солнечной сожжет такую же долю лития лишь за время больше 10 млрд. лет. Этим и обоснован литиевый тест: обнаружение в спектре холодной звезды линии Li с длиной волны 6708 ангстрем сразу указывает, что ее масса меньше 0,06 солнечной, а значит — это коричневый карлик.

Температура поверхности коричневых карликов не превышает 2800 К. Для таких холодных объектов, - в спектральную классификацию звезд потребовалось ввести новые классы. Принятая сейчас классификация звездных спектров сложилась в первой половине 20 в. Известная гарвардская последовательность спектральных классов O-B-A-F-G-K-M отражает ход температуры звездных фотосфер (от горячих O и B к прохладным K и M), а дополнительные классы R, N и S отражают вариации химического состава у холодных звезд-гигантов с температурой около 3000 К. Эта схема надежно служила астрономам почти целый век, и даже создалось впечатление ее завершенности. Однако последние годы показали, что развитие спектральной классификации не прекратилось: обнаружение коричневых карликов привело в конце 1990-х годов к введению новых спектральных классов L и T для тел с эффективной температурой менее 2000 К.

Оказалось, что в формировании спектров экстремально холодных объектов весьма важную роль играет пыль. У самых холодных звезд класса M с температурой поверхности около 3000 К в спектре видны мощные полосы поглощения окисей титана и ванадия (TiO, VO). Но у более холодных звезд их не оказалось. До открытия ставшего теперь классическим коричневого карлика Gliese 229B самым темным и холодным был

компаньон белого карлика GD 165B, имеющий температуру поверхности 1900 К и светимость 0,01% солнечной. Он поразил исследователей тем, что в отличие от других холодных звезд не имеет полос поглощения TiO и VO, за что был прозван "странной звездой". Такими же оказались спектры и других коричневых карликов с температурой ниже 2000 К. Расчеты показали, что молекулы TiO и VO в их атмосферах сконденсировались в твердые частицы — пылинки и уже не проявляют себя в спектре, как это свойственно молекулам газа.

Таким образом, подавление спектральных полос TiO и VO в результате конденсации этих молекул в пылинки при T < 2000 К потребовало введения нового спектрального класса. В 1998 Дэви Киркпатрик (Калифорнийский технологический институт, США) предложил расширить гарвардскую схему, добавив в нее класс L для мало массивных инфракрасных звезд, имеющих эффективную температуру поверхности 1500-2000 K. Спектр L-карликов характеризуется сильной полосой поглощения CrH, сильными линиями редких щелочных металлов Cs и Rb, а также широкими линиями калия и натрия. Но без информации о возрасте объекты L-класса нельзя автоматически считать коричневыми карликами: очень старые мало массивные звезды тоже могут остыть ниже 2000 К. Однако большинство объектов L-класса все же должны быть именно коричневыми карликами.

Продолжая поиск и исследование L-карликов, астрономы обнаружили еще более экзотические объекты, для которых потребовалось ввести самый новый спектральный класс T, еще более холодный, чем L (Дж.Либерт и др., 2000). Эффективная температура T-карликов около 1500-1000 К и даже чуть ниже. В их спектрах видны мощные полосы поглощения воды, метана и молекулярного водорода, поэтому их называют "метановыми карликами". Прототипом этого класса считают коричневый карлик Gliese 229B.

Коричневые карлики ставят перед астрономами много сложных и очень интересных проблем. Чем холоднее атмосфера звезды, тем сложнее ее изучать как наблюдателям, так и теоретикам. Присутствие в атмосфере пыли не делает эту задачу легче: конденсация твердых частиц не только изменяет состав свободных химических элементов в атмосфере, но и влияет на теплообмен и форму спектра. Теоретические модели с учетом пыли предсказали парниковый эффект в верхних слоях атмосферы и уменьшение глубины молекулярных полос поглощения; эти эффекты подтверждаются наблюдениями. Но проблема пыли сложна: расчеты показывают, что после конденсации пылинки начинают тонуть. Возможно, на разных уровнях в атмосфере формируются плотные облака пыли. Метеорология коричневых карликов может оказаться не менее разнообразной, чем у планет-гигантов. Но если атмосферы планет удается изучать с близкого расстояния, то расшифровывать метановые циклоны и пылевые бури коричневых карликов придется только по их спектрам.

Вопросы о происхождении и численности коричневых карликов пока остаются открытыми. Первые подсчеты их количества в молодых звездных скоплениях типа Плеяд показывают, что по сравнению с нормальными звездами общая масса коричневых карликов, видимо, не так велика, чтобы "списать" на них всю темную массу Галактики. Но этот вывод еще нуждается в проверке.

Другой важный вопрос - как формируются коричневые карлики. Общепринятая теория происхождения звезд не дает на него ответ. Объекты столь малой массы могли бы формироваться подобно планетам-гигантам в околозвездных дисках. Но обнаружено довольно много одиночных коричневых карликов (например, в Туманности Ориона); трудно предположить, что все они сразу после рождения были потеряны своими более массивными компаньонами.

В 2001 совершенно особый путь рождения коричневых карликов наметился при исследовании двух тесных двойных систем - LL Андромеды и EF Эридана. В них более массивный компаньон - белый карлик - своим тяготением стягивает вещество с менее массивного спутника, так называемой звезды-донора. В системе LL Андромеды

перетекающий на белый карлик газ образует аккреционный диск, в котором время от времени, раз в несколько лет, происходят вспышки; поэтому LL Андромеды относят к классу неправильных переменных звезд, называемых карликовыми новыми. Систему EF Эридана относят к классу поляров: в ней сильное магнитное поле белого карлика препятствует образованию аккреционного диска, поэтому вещество донора течет вдоль силовых линий и падает на магнитные полюса белого карлика.

Расчеты показывают, что в начале эволюции обеих этих систем спутники-доноры в них были обычными звездами, но, за несколько миллиардов лет, их масса упала ниже предельного значения, и термоядерные реакции в этих звездах угасли. Теперь, это по внешним признакам - типичные коричневые карлики. Температура звезды-донора в системе LL Андромеды около 1300 К, а в системе EF Эридана - около 1650 К. Их массы лишь в несколько десятков раз превосходят массу Юпитера, а в их спектрах видны линии метана. Насколько их внутренняя структура и химический состав сходны с аналогичными параметрами "настоящих" коричневых карликов, пока не известно. Таким образом, нормальная маломассивная звезда, потеряв значительную долю своего вещества, может стать коричневым карликом.

7. 4. Кометы.

Наблюдения за кометой Темпеля 1, сделанные космической станцией ESA Rosetta, позволили ученым установить, что кометы состоят из пыли, скрепляемой льдом, а не изо льда, как считалось ранее. На фотографии видны выбросы с кометы Темпеля 1 через 13 секунд после столкновения с зондом.

4 июля 2008 года ударная часть космического корабля NASA Deep Impact произвела столкновение с кометой Темпеля 1. Ожидалось, что в результате столкновения образуется кратер диаметром приблизительно 100–125 метров и выпарится порядка 45000 тонн воды. Но на самом деле пыли оказалось намного больше чем предполагалось. Также ожидалось, что воздействие на ледяное ядро кометы может инициировать новую серию выбросов газа и пыли с поверхности кометы. О природе этих выбросов практически ничего не известно, хотя один из них был замечен с помощью телескопа Хаббл, как раз перед самым столкновением.

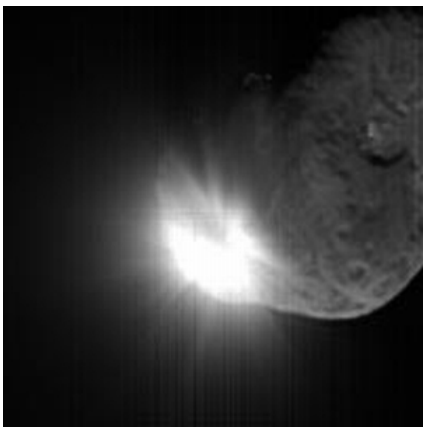


Рис. 7-5. Выброс вещества при столкновении кометы

Станция Rosetta находилась на расстоянии 80 млн. километров от кометы, в самой удобной для наблюдения позиции. С помощью оборудования станции отслеживалось состояние кометы до столкновения, во время и после него. Обе бортовые камеры Rosetta, с широкоугольным объективом (WAC) и узкоугольным (NAC), входящие в состав инструмента OSIRIS, зафиксировали выброс облака изо льда и пыли после столкновения. Оценив состав облака, ученые обнаружили, что содержание пыли в нем превышает содержание воды. Также не было обнаружено появление новых выбросов на комете из-за

столкновения с ударной частью Deep Impact. Таким образом, кометы оказались больше «замерзшей грязью», чем «грязным льдом». Сейчас комбинируя данные Rosetta и земных обсерваторий, ученые пытаются создать трехмерную модель облака пыли вокруг кометы.

За орбитой Плутона открыт так называемый пояс Койпера, второй пояс астероидов. Кометы проводят за орбитой Нептуна большую часть времени, так как в более дальней точке своей траектории их движение более медленное, чем около Солнца.

Различие планет по физическим свойствам, вероятно, обусловлено тем, что планеты земной группы формировались из протопланетного облака рядом с Солнцем. Именно поэтому в них много более тяжелых элементов, металлов, например железа. Планеты-гиганты формировались на более далеких расстояниях от Солнца, поэтому, в основном, состоят из легких элементов.

В настоящее время на планетах и астероидах Солнечной системы активно ищутся следы жизнедеятельности организмов.

Солнечная система – не единственная планетная система во Вселенной. В последние годы обнаружено более пятидесяти планет, с массами 0,15–17 М Юпитера, вращающихся вокруг расположенных вблизи Солнца звезд. Вокруг нескольких из них вращается сразу две крупные планеты.

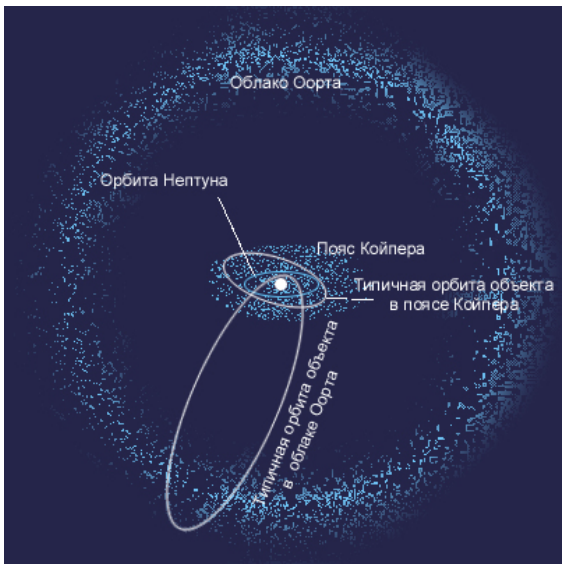


Рис.7- 6. Внешние области Солнечной системы.

Одной из самых интересных из открытых систем является ε Эридана. Эта звезда очень похожа на наше светило, юпитероподобная планета обращается вокруг нее примерно на таком же расстоянии, как пояс астероидов вокруг Солнца. В отличие от прочих известных экзопланет эта находится достаточно далеко от звезды, что дает шанс получить непосредственную фотографию планеты и обнаружить другие, более близкие к звезде и, возможно, более похожие на Землю планеты.

7. 5. Поиск источников гравитационных волн.

С помощью космической рентгеновской обсерватории NASA "Чандра" (Chandra) удалось найти свидетельство того, что два белых карлика (система, обозначаемая как RX J0806.3+1527 или просто J0806) облетают друг друга по столь тесной орбите, что вот-вот сольются, устроив космический катаклизм. Данные указывают на то, что гравитационные волны уносят энергию из этой звездной системы невиданными темпами, что позволяет говорить о J0806 как о главном кандидате для экспериментов, целью которых будет непосредственное обнаружение еле уловимой "ряби", что сотрясает пространство-время.

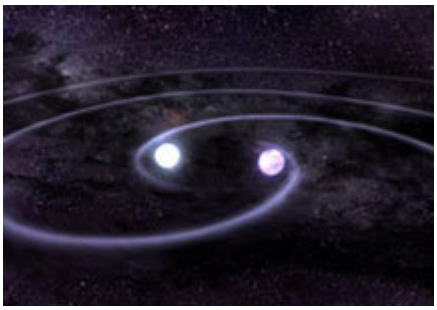


Рис. 7-7. Двойная звездная система – предполагаемый источник гравитационных волн.

J0806 представляет собой едва ли не самую тесную двойную звездную систему из всех известных, ее компоненты разделены дистанцией, составляющей всего лишь одну пятую расстояния от Земли до Луны (50 тысяч миль или порядка 80 000 км), движутся они вокруг друг друга с невиданной скоростью - около миллиона миль в час (1,6 млн км/ч). Белые карлики - это останки звезд, подобных нашему Солнцу, которые израсходовали практически все свое ядерное горючее. Наряду с нейтронными звездами и черными дырами белые карлики относятся к числу сверхкомпактных объектов, поскольку они заключают большую массу в небольшом объеме. В системе J0806 масса каждого из белых карликов оценивается примерно в половину массы Солнца, а их размеры при этом сравнимы с диаметром Земли.

Общая теория относительности Эйнштейна предсказывает, что любая двойная система звезд может служить источником гравитационных волн, которые разбегаются со скоростью света, словно круги по воде, и самыми мощными излучателями таких волн будут сливающиеся звезды и квазизвездные объекты (нейтронные звезды, черные дыры). Согласно современным расчетам, при слиянии двух нейтронных звезд, - излучается около 10^{45} Дж в виде всплеска гравитационного излучения, то есть около 1% от полной энергии ($E = mc^2$) двух звезд. Вращающиеся одна вокруг другой звезды непрерывно теряют энергию, и это заставляет их постепенно придвигаться друг к другу все ближе и ближе, фактически падая по спирали. Так, орбитальный период системы J0806 уменьшается на 1,2 миллисекунды каждый год, что вполне соответствует теории.

Наблюдения J0806 в оптическом и рентгеновском диапазонах позволили зарегистрировать вариации светимости, период которых составил 321,5 секунды - это немногим больше пяти минут. Эти пятиминутные вариации, - скорее всего соответствуют пятиминутному орбитальному периоду системы белых карликов. Однако существует также небольшая вероятность того, что этот период на самом деле является отражением периода вращения вокруг собственной оси одного из белых карликов.

Тод Стромейер (Tod Strohmayer) из Годдардовского центра космических полетов (Goddard Space Flight Center) NASA полагает, что «мы имеем дело либо с самой компактной двойной звездной системой из всех, нам известных, либо с одной из самых необычных систем, которые мы когда-либо видели». Если все это удастся подтвердить, то J0806 может считаться одним из самых ярких источников гравитационных волн в нашей Галактике. Этот объект может также оказаться в числе первых источников, которые удастся обнаружить непосредственным образом в ходе грядущего космического полета LISA (Laser Interferometer Space Antenna - космической лазерной антенны-интерферометра ESA и NASA)".

Антенну LISA предполагается расположить на той же орбите вокруг Солнца, по которой движется Земля. Система будет состоять из зеркал и лазерного интерферометра для измерения их малых относительных колебаний (амплитуда 10^{-9} см при расстоянии между зеркалами в 5 млн. км). Диапазон частот гравитационного излучения, с которым

предполагается работать в этом случае, составляет 10^{-4}-0,1 Гц. *Несмотря на более чем 50-летние поиски гравитационных волн, – они так и не обнаружены.*

7. 6. Черные дыры.

Совместная работа двух университетов Великобритании позволила разрешить одну из самых волнующих астрофизических загадок последнего времени.

Считается почти неоспоримым, что в центрах галактик, в том числе в нашем Млечном Пути, расположены супермассивные черные дыры. С недавних пор астрономам достоверно известно, что в непосредственной близости от них, а стало быть, - в мощном гравитационном поле, происходит рождение новых звезд.

До работы ученых из шотландских научных центров, университетов Эдинбурга и Сент-Эндрю, это считалось невозможным, ведь предполагалось, что молекулярные газовые облака, обычные места звездообразования, мощное гравитационное поле черной дыры должно быстро разрывать на части.

Межвузовская команда во главе с профессором Иэном Боннеллом (Ian Bonnell) из Сент-Эндрю и доктором Кеном Райсом (Ken Rice) из Эдинбурга провела моделирование падения на супермассивную черную дыру газовых облаков весом до 100 тыс. масс Солнца.

Результаты оказались весьма неожиданными: разрушенные гравитацией облака превращаются в спиральные рукава, закручивающиеся вокруг горизонта событий черной дыры, часть вещества захватывается черной дырой, а часть вращается вокруг нее и в этой части - возможно формирование звезд, причем только с высокой массой. Именно такие звезды и наблюдаются в окрестностях супермассивной черной дыры в центре нашей галактики.

Результаты вычислений шотландские ученые опубликовали в статье, вышедшей в Nature 22 августа 2008 года.

Гипотеза "черных дыр": новый парадокс.

Попытка объяснить неожиданные результаты нового исследования привела ученых к парадоксальному выводу.

Исследование шарового звездного скопления RZ2109 показало, что в нем, вопреки существующим представлениям, отсутствуют черные дыры промежуточной массы – такие, которые, согласно текущим взглядам, и должны образовываться в шаровых скоплениях в процессе эволюции входящих в него звезд.

Работа была выполнена исследовательской группой под руководством Стивена Зепфа (Stephen Zepf) из университета штата Мигичан в городе Ист Лансинг. Скопление RZ2109 расположено в иной галактике в созвездии Центавра; расстояние до него оценивается в настоящее время в 50 млн. световых лет. Исследование скопления проводилось с помощью космического рентгеновского телескопа Европейского космического агентства (ESA) XMM-Newton.

Рентгеновский телескоп зарегистрировал характерное излучение, интерпретируемое в настоящее время как испускаемое падающим на черную дыру веществом. Однако оценки массы этой гипотетической черной дыры, полученные на основании характеристик ее рентгеновского излучения, показали, что дыра эта имеет несоразмерно малую массу – около 10 масс Солнца.

С одной стороны, согласно текущим представлениям, в шаровом звездном скоплении двух черных дыр быть не должно – одна из них неизбежно "поглотит" другую, или "вытолкнет" ее из скопления в процессе гравитационного взаимодействия. С другой стороны, в шаровом звездном скоплении масса черной дыры должна быть существенно большей.

Парадоксальный результат привел ученых к выводу о том, что черных дыр с "промежуточной" массой, возможно, в природе по каким-то причинам не существует вовсе – однако возможны лишь очень "легкие" и очень "массивные" их формы.
Возможно также, что гипотеза "черных дыр" нуждается в коррекции.

Парадокс «Пионеров».

Парадокс «Пионеров» - наблюдаемая аномалия движения космических аппаратов, находящихся во внешней части Солнечной системы, выражающаяся в заметном торможении и искривлении их траекторий в сторону Солнца. Этот эффект был обнаружен при наблюдении за первыми космическими аппаратами, преодолевшими орбиту Плутона - «Пионер-10» и «Пионер-11». Обнаружил парадокс Джон Андерсон и его коллеги из Лаборатории реактивного движения (JPL). Она заключается в том, что оба аппарата, запущенные более 30-ти лет назад (с ними до сих поддерживается двусторонняя связь), - теряют скорость существенно быстрее, чем следует из предсказаний небесной механики. Механизм торможения аппаратов непонятен и может быть связан с действием неизвестных доселе законов физики.

Как сообщает Space Daily, НАСА приступило к систематизации имеющихся материалов о траектории движения зондов "Пионер-10" и "Пионер-11". Наблюдения выявили серьезные отличия в истинной траектории движения зондов от расчетной. На сегодняшний день необъяснимое рассогласование достигло уже 380 тыс. км, что составляет несколько часов полета аппарата. Гравитационное ускорение измерено точностью 10^{-8} см/с^2. Ускорение неизвестной природы, направленное к Солнцу равно $(8.74 \pm 1.33)\cdot 10^{-8}$ см/с^2. Это дополнительное ускорение не зависит от расстояния и остается постоянным в пределах 20-60 а.е. от Солнца. Объяснения нет, но замечен *любопытный факт*: величина аномального ускорения точно равна произведению скорости света на постоянную Хаббла (cH, где H = 70 км/с·Мпк). Многие астрономы считают, что проблема КА Пионер 10 и 11 тесно связана с решением проблемы происхождения темной материи (см. П5).

Однако, гравитационное воздействие пояса Койпера практически не изучено, особенно его динамика. Расстояние порядка 7,5 млрд. км, а отклонение 380 тыс. км, - при почти полном незнании распределения материи за орбитой Харона. Последняя реальная корректировка траектории имела место гравитационным полем Нептуна. Расхождение на угол примерно 0.02 градуса через 2 млрд. км как раз и даст подобный разброс. Плюс отсутствует точная привязка положения аппаратов к Солнцу (т.к. фотоэлементам делать уже нечего). Траектории считались на основании Ньютоновской механики, а не ОТО. На таких расстояниях Римановы поправки могут дать вполне приличную величину.

В этой главе приведены некоторые результаты астрономических наблюдений, имеющих отношение к физике Земли, планет, звезд, коричневых карликов и пр. Только понимая все связанные с этими вопросами проблемы, можно разобраться в физике Земли. Здесь приведен далеко не полный перечень результатов. Для иллюстрации сказанного, перечислим некоторые из них:

- Коричневые карлики рождаются так же, как звезды. Первое тому доказательство удалось получить на одно поколение раньше, чем надеялись астрономы.
- Открытая планета MOA-2007-BLG-192Lb оказалась гораздо меньше, чем предполагалось изначально. Повторные наблюдения и расчеты показали, что она во многом похожа на нашу Землю и может привлечь внимание искателей инопланетных форм жизни.

Получены новые результаты не только в области внесолнечной астрономии, но и по ближайшим к Земле планетам, например,:

- После образования планеты Марс еще долго оставался расплавленным океаном лавы. Это говорит в пользу того, что у планеты некогда была плотная атмосфера, согревавшая ее.

- Ученые предполагают, что странная топология марсианского магнитного поля является следствием явлений, которые оставили свой след в облике северного и южного полушарий Красной планеты, заметно отличающихся друг от друга.
- Ученые предложили объяснение странностям магнитного поля Марса и связали их с последствиями грандиозной древней катастрофы.
- Удалось решить сразу две марсианские загадки: тёплое и влажное прошлое планеты и отсутствие известняка на её поверхности. Судя по всему, марсианский парниковый эффект был основан на сернистом газе, а не на углекислом, до сих пор обеспечивающем теплоизоляцию Земли.
- NASA опубликовало серию снимков, на которых подробно виден процесс поглощения одного красного пятна Юпитера другим. Эти подробные изображения были воссозданы в Лаборатории реактивных двигателей NASA по фотографиям, полученным с камер телескопа "Хаббл".

В том числе получена интересная информация и о Солнце:
- Исследовательская группа NASA под руководством доктора Ричарда Мевальда (Richard Mewaldt) из Калифорнийского технологического института проанализировала обстоятельства одной из самых мощных за последние 30 лет вспышки на Солнце, произошедшей 5 декабря 2006 года. Её мощность была оценена как X9.

В заключение заметим, что практически все результаты астрономических наблюдений, полученные в самые последние годы, включенные в содержание этой главы, - находятся в противоречии с общепризнанными представлениями о планетах Солнечной системы. Этот факт настоятельно требует создания новой альтернативной физики Земли и планет, такой физики, в которой приведенные результаты находили бы непротиворечивое объяснение. И, более того, могли бы быть предсказаны на основании этой физики.

Глава 8*. Сценарии образования Солнечной системы.

В главе 8 предлагается принципиально новая модель образования Солнечной системы. Предлагается обзор проблемы, обсуждается вопрос «что такое планеты», приводится информация о некоторых других моделях образования Солнечной системы. Обсуждается модель образования горячей Земли и Солнечной системы: фрактальный характер расстояний планет от Солнца, плотность вещества в Солнечной системе, сжатие диска и критерий Джинса. Возможный механизм образования Солнечной системы, включая такие вопросы как: почему не образовалась планета Фаэтон, куда “пропал” момент, сколько воды на Луне и Марсе и др.? Предложена и обсуждается «Единая последовательность: звезда - планета – спутник».

8. 1. Обзор проблемы.

Известный астрофизик У.Х. Мак-Крей считает, что рождение планетной системы обязано образованию звезды - “... это самый естественный подход к проблеме. Очевидно, что природа создала галактики, звездные скопления, кратные системы, двойные и одиночные звезды, - одним словом, всё в единой, грандиозной последовательности процессов. Нам известно, что следующий класс объектов в этой последовательности - планеты. Лишь случайное распределение масс определяет, рождается звезда или же планета. Предел последовательности - тело минимальной массы, еще удерживаемой самогравитацией. Планеты существуют, и было бы странно, если бы природа прервала одну последовательность процессов на звездах и начала новую с единственной целью - образовать планеты!

Если, как сказано выше, существует один фундаментальный комплекс процессов, то он должен быть чрезвычайно сложным. Должны существовать факторы, ограничивающие рост каждого класса тел, различные в каждом отдельном случае. Тем не менее, исследование процесса как единого целого - наиболее естественный путь “ (Мак-Крей, 1976, с. 30). Аналогичные идеи высказывались многими физиками и астрофизиками. Например, Ривс (1976) обсуждает ряд вопросов, связанных с происхождением Солнечной системы. Автор приходит к выводу, что, скорее всего, Солнце и планеты происходят из одного протопланетного облака. Что планеты возникали по мере сжатия облака, что при образовании Солнечной системы необходимо преодолеть три барьера: тепловой, магнитный и момента количества движения (тепловая энергия и энергия магнитного поля должны быть меньше гравитационной, а момент количества движения, теряемый Солнцем, не должен передаваться планетам) и т.д.

Многие известные физики Седов (1981), Станюкович (1971), Спитцер (1981) и др. разделяли идею образования Солнца и Солнечной системы в едином процессе самогравитации. Для более ясного видения проблемы напомним, как формировались взгляды ученых в прошлом. Постараемся понять, в чем состоит её суть в наше время.

Проблема образования Солнечной системы всегда интересовала человечество. На раннем этапе своего развития было высказано множество различных гипотез в основном метафизического плана. Сошлемся на И.Ньютона, который писал Бентли 10 декабря 1692 года: «Мне кажется, что если бы вещество нашего Солнца и планет и все вещество Вселенной было равномерно рассеяно по всему небу, и каждая частица обладала врожденным тяготением ко всему остальному, и все пространство, по которому это вещество рассеяно, было бы, тем не менее, конечным, то вещество с наружной стороны этого пространства направлялось бы его тяготением ко всему веществу внутри и в результате упало бы в середину всего пространства и образовало бы там одну большую сферическую массу. Но если бы вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно никогда бы не собралось в одну массу, но некоторое его количество собралось бы в одну массу, а некоторое количество в другую так, чтобы создать бесконечное число больших масс, рассеянных на больших расстояниях друг от

друга по всему бесконечному пространству. И так могли быть образованы Солнце и Неподвижные Звезды, если считать, что вещество имеет постижимую природу» (The Correspondence, 1961). Эту идею И.Ньютона подхватили Кант, Лаплас и Гельмгольц.

Одно из первых, действительно научных представлений об образовании и последующей эволюции Солнечной системы было дано И. Кантом. Он рассматривал развитие мира как результат действия противополярных сил притяжения и отталкивания и возвел этот подход в принцип. Кант считал, что Солнечная система образовалась из туманности, состоящей из материальных частиц, которые притягивались друг к другу согласно закону тяготения, открытому И. Ньютоном примерно за 100 лет до Канта. Кант, в дополнение к этому закону, ввел принцип взаимного отталкивания и рассмотрел образование Солнечной системы как единого процесса рождения звезды, планет и их спутников

П. С. Лаплас, не зная, по словам его современников, о гипотезе Канта, в своем известном сочинении “Изложение системы мира” предложил очень похожую модель. По Лапласу, до рождения Солнца существовала горячая туманность, которая, вращаясь, сплющивалась и, охлаждаясь, - сжималась. Сжимаясь, туманность вращалась все быстрее и быстрее. За счет центробежных сил, возникающих в процессе сжатия, из туманности выделялись кольца вещества, в которых этот процесс повторялся. В процессе сжатия туманности в центральной её части образовалось Солнце. Кольца сформировались в аналогичные туманности, которые, сжимаясь и вращаясь, привели к образованию планет и их спутников.

Лаплас был великим математиком, однако он не написал нужных формул, описывающих придуманную им гипотезу “системы мира”. Это сделали два других великих француза - математики Э. Рош и А. Пуанкаре. В чем же состоит основная заслуга Лапласа в космогонии? По мнению известного астронома, автора учебников по астрономии и книги о Лапласе, Б.А. Воронцова-Вельяминова (1985), “ ... важнейшей чертой космогонической гипотезы Лапласа являются концентрические газовые кольца, возникшие при вращении первичной туманности” (с. 144). По прошествии многих лет, гипотезу, согласно которой Солнце, планеты и их спутники произошли из протосолнечной туманности, при формировании центрального тела и выделении в ней газовых протопланетных колец, стали называть небулярной (небула - туманность) гипотезой Канта-Лапласа. Эта гипотеза признана в настоящее время несостоятельной, т.к. она не находит объяснения ряду свойств Солнечной системы и, в главную очередь, распределению в системе момента количества движения (об этом ниже в этой главе).

Основной идеей небулярной гипотезы Канта-Лапласа было существование единого механизма формирования звезды, планеты, спутника, при котором, естественно, температура формирующегося тела определялась его массой. Это означало, что планеты образовывались изначально горячими, - расплавленными. По мнению многих ученых, эта гипотеза противоречила опыту изучения внутреннего строения Земли. Дело в том, что благодаря успехам сейсмологии, в начале века было выяснено, что толщина кристаллической мантии порядка 3000 км. Если предположить, что мантия кристаллизовалась из расплава, то за время эволюции Земли, около 4.5 млрд. лет, за счет температуропроводности может кристаллизоваться слой расплава не толще чем 600 - 800 км. Это противоречие до сих пор считается непреодолимым, и именно оно поставило модель горячей Земли “вне закона”. Модель холодной Земли прочно завоевала позиции в науках о Земле. Но как только она была принята научным сообществом, возник ряд специфических проблем: одна из основных, это “обеспечение” холодной Земли причиной появления теплового потока и источником внутреннего тепла. Выход нашелся достаточно быстро. После открытия А. Беккерелем радиоактивности и открытия П. Кюри сопутствующего радиоактивности теплового излучения, Д. Джоли произвел расчеты, из которых следовало, что радиоактивности химических элементов, находящихся в составе

гранитной, земной коры, вполне достаточно для обеспечения Земли источником внутреннего тепла требуемой мощности.

После того, как гипотеза Канта-Лапласа была признана несостоятельной, возник ряд гипотез, основанных на том, что момент количества движения был привнесен в Солнечную систему извне: Солнце либо захватило некоторую туманность, обладающую наблюдаемым моментом; либо захватило другую звезду и разрушило её; либо по началу обладало спутником с массой в одну десятую массы Солнца и затем разрушило его и т.д. Все эти модели предполагали в своей основе, что в Солнечной системе произошла катастрофа и, следовательно, факт образования Солнечной планетной системы - чрезвычайно маловероятное событие. Авторами этих гипотез были Ф. Мультон, Т. Чемберлен (прилетела звезда и распалась на планетезимали); Дж. Джинс и Г. Джеффрис (вещество туманности было выброшено из Солнца при встрече со звездой); Г. Койпер, В.Г. Фесенков, В.А. Амбарцумян и др. в той или иной мере рассматривали образование Солнечной системы как катастрофическое событие. Наибольшую популярность из катастрофических моделей завоевала гипотеза О.Ю. Шмидта.

В качестве основы своей модели Шмидт использовал явление захвата Солнцем роя частиц, двигавшихся в одной плоскости (плоскости экватора) и имевших различные начальные моменты количества движения. В модели Шмидт учитывал удельные моменты, т.е. моменты, деленные на массу захваченных частиц. Он, в частности, задался вопросом, “... все ли значения моментов равновероятны или, скажем, большие менее вероятны, или наоборот? Этого мы наперёд, не знаем. Если бы был задан какой-нибудь закон распределения моментов, какая-нибудь дифференциальная функция распределения, то мы могли бы применить некоторые критерии для того, чтобы сравнить эту функцию распределения с фактическими данными. Правда мы не имеем роя в прежнем виде, но мы имеем результат его *склеивания* - планеты, а момент, как известно, при этом сохраняется ...”(Шмидт, с. 49, 1949).

Гипотеза Шмидта, несмотря на то, что в ней неплохо совпадали рассчитанные расстояния от планет до Солнца (закон Тициуса-Боде) с наблюдаемыми расстояниями, не объясняла целый ряд особенностей Солнечной системы. Среди них: совпадение направления вращения Солнца и планет, совпадение плоскостей орбит планет с плоскостью экватора Солнца, одинаковый характер распределения планет и спутников Юпитера, Сатурна и Урана по расстояниям, неясность механизма образования планет и спутников из роя холодных частиц (склеивания?) и т.д. По мнению астронома С.К. Всехсвятского, гипотеза Шмидта не могла предсказать ни одной ранее известной особенности Солнечной системы, что косвенно говорит о неубедительности её основных положений. Более того, эта гипотеза типично катастрофическая, а, следовательно, вероятность захвата звездой постороннего облака частиц ничтожно мала. Как известно в наше время (но не во времена Шмидта), очень многие звезды имеют планетные системы, что говорит скорее об определенном порядке при образовании подобных систем, но совсем не о катастрофизме. Исследования возможного механизма образования Солнечной системы, проведенные сравнительно недавно (позже Шмидта), теперь базируются в большей степени на гипотезе Канта-Лапласа, чем на катастрофических моделях.

Проблему малости количества движения, приходящегося на Солнце, авторы моделей преодолевают каждый своим способом. Так, например, согласно гипотезам С. Биркеланда и Х. Берлаге, протопланетное вещество истекает из Солнца в виде заряженных ионов. Радиус орбиты планеты определяется массой и зарядом иона. Согласно Ф. Хойлу, когда протосолнце, сжимаясь, достигло радиуса (0.2 а.е.), при котором выполнилось условие равенства гравитационной и центробежной сил, возникла неустойчивость вращательного движения. Развитие этой неустойчивости привело к выбросу из протосолнца части его вещества. Температура протосолнца в этот момент была достаточна для ионизации выброшенного вещества, а сильное магнитное взаимодействие обеспечило передачу момента количества движения от протосолнца к

выброшенному из него веществу. Хойл считает, что таким образом ему удалось объяснить “поразительный факт”, что Солнце обладает столь малым моментом. Х. Альвен предположил, что частицы газового облака, захваченного Солнцем, падая на него, ионизировались. Благодаря тормозящему действию магнитного поля, момент количества движения Солнца передавался ионизованному газу.

Большинство гипотез образования Солнечной системы в той или иной степени связаны с использованием геометрической прогрессии закона Тициуса-Боде. К ним относится и модель Шмидта. В начале отметим две теории: первую, М.Вульфсона и Б. Пендреда и, вторую, И.Уильямса. В первой, образование Солнечной системы - это результат отторжения от Солнца его вещества при сближении с проходящей мимо звездой. По второй гипотезе, система возникла благодаря гравитационному коллапсу захваченного Солнцем газового облака. Обратим внимание на гипотезу Х. Берлаге, в который он рассмотрел уравнения равновесия вращающейся туманности с учетом гравитационных сил и внутреннего давления газа. Расстояния планет до Солнца, по Берлаге, зависят от температуры газа и его химического состава.

В этот ряд можно поставить получившую наибольшую популярность теорию С. Вайцзекхера, в которой принимается, что Солнце и околосолнечная туманность имеют единый химический состав. Туманность представляет собой вращающийся диск, в котором за счет внутреннего трения возникает турбулентность, приводящая к образованию вихревых ячеек, разместившихся в кольцах, на которые разбивается туманность. Вихри, формирующие планеты, задают им вращение вокруг оси. Имеет смысл остановиться на теории Г. Койпера, который полагал, что удаленность планеты от Солнца связана с увеличением её массы. В его теории протопланетная турбулентная туманность, находящаяся в состоянии, близком к пределу Роша (предельное расстояние, на котором приливные силы разрушают твердую планету), превращается в отдельные газовые сгустки - протопланеты (Ньето, 1976).

Результаты исследований проблемы образования Солнечной системы, полученные в последнее время, сосредоточены в двух сборниках, переведенных на русский язык (Происхождение.., 1976; Протозвезды .., 1982). Среди них уже упоминавшийся нами обзор Мак-Крея, который, в частности, посвятил немалую часть его проблеме слипания планет из допланетных тел - планетезималей. По мнению Мак-Крея, это явление не имеет физических оснований. Г.Ривс приходит к заключению, что “ ... при столкновении каменистых тел со скоростями, типичными для движения по кеплеровским орбитам вокруг Солнца (10 км/с), их объединение маловероятно” (Ривс, 1976, с.71).

Обзор теорий происхождения Солнечной системы из первичной солнечной туманности дан в работе Д. Тер-Хаара (1976). Говоря о законе Тициуса-Боде, он подчеркивает, что этот закон гораздо лучше выполняется для спутников, чем для планет. Этой зависимости, согласно расчетам А. Прентиса, подчиняются радиусы колец, возникающих при сжатии звезды. По Прентису, сжимающаяся звезда обладает плотной внешней кольцеобразной оболочкой, По мере сжатия, связь между звездой и кольцом ослабевает и, в дальнейшем кольцо начинает существовать помимо звезды. Тер-Хаар, рассматривая эту модель, замечает, что таким образом можно получить планеты, но нельзя - спутники. Дело в том, что он априори принял т.н. холодную модель образования планет, согласно которой планеты медленно конденсируются (какой уж тут коллапс кольца и аналогия со звездой!) из вещества туманности.

Среди гипотез образования Солнечной системы отметим работы Р.Б. Ларсона и Дж.П. Острайкера, посвященные гидродинамическим расчетам коллапса и проблеме образования Солнечной системы. Ларсон (1976), рассматривая коллапс сферического не вращающегося межзвездного облака с начальным радиусом 1.6×10^{17} см (10^4 а.е.), получил ряд интересных результатов. Среди них, оценка времени образования звезды $\approx 2\ 10^5$ лет; если образование планетного диска происходит одновременно с образованием звезды, то это время ещё меньше. При коллапсе вращающегося облака, по Ларсону, образуются

кольца Лапласа, причем тенденция к образованию кольца проявляется на ранней стадии сжатия; устойчивый диск и, соответственно, устойчивые кольца образуются на той стадии, когда уже имеется сильная концентрация массы в центре. Следовательно, допланетный диск формируется после того, как зародыш Солнца приобрел большую часть своей массы. Ларсон подчеркивает сходство механизмов образования Солнечной системы и систем спутников трех больших планет. Рассматривая те же гидродинамические аспекты коллапса, Острайкер (1976) приходит к заключению, что для образования планетной системы нужен диск с малой массой и большим моментом количества движения. В своих расчетах он учитывает вязкость вещества диска, которая привела к формированию протопланетного диска с требуемыми параметрами.

Боденхаймер и Блейк (1982) так же рассчитывали гидродинамику коллапса, учитывая вращение, газовое давление и самогравитацию. Расчеты показали возможность образования колец Лапласа в структуре с максимумом плотности в кольце. Они провели расчеты эволюции отделившегося кольца, вещество которого вновь собирается в диск и процесс продолжается аналогично предыдущему, связанному с выделением колец.

В заключение обзора, остановимся на статье У.К. Хартмана (1982), в которой он подчеркивает, что "... пока не существует единой, общепринятой, современной теории образования планет, есть только много отдельных работ, обеспечивающих медленный прогресс в нужном направлении" (Хартман, 1982, с.73). Хартман приходит к выводу, что планеты - гиганты были образованы в результате крупномасштабного гравитационного коллапса, так как он убедительно объясняет системы их регулярных спутников, как миниатюрные "солнечные системы". В то же время, Хартман считает наиболее подходящим механизмом для возникновения планет земного типа, процессы столкновений. С таким выводом согласиться невозможно. О том, что все планеты Солнечной системы образовались "по одному сценарию" говорит, в частности, её фрактальный характер.

Ещё раз отметим, что проблема образования Солнца, Земли, других планет и их спутников – одна из самых старых проблем, волнующих человечество. Механизм образования планеты играет принципиальную роль и определяет её физические свойства и особенности эволюции. В течение последних 50 лет принято рассматривать только один из двух возможных сценариев образования Земли и других планет. Это сценарий, по которому Земля постепенно, в течение примерно 100 млн. лет, «склеивалась» из планетезималей, возникающих в протопланетном облаке. Такой механизм приводит к образованию «холодной» планеты, т.к. всё тепло, которое выделяется при её формировании, излучается в космос. Другой возможный механизм образования планеты, это быстрое сжатие её вещества за счет самогравитации. При этом вещество планеты, в том числе и Земли, оказывается нагретым до высокой температуры, а тепло, выделяющееся при образовании, запасается в её недрах. Например, вещество Земли при таком способе «изготовления» оказывается нагретым до температуры ~ 30 000 К (Магницкий, 1968). Температура вещества Юпитера в момент его образования, согласно предыдущей оценки, оказывается порядка 300 000 К и т.п.

Механизм образования холодной Земли и других планет Солнечной системы считается общепринятым. Однако, согласно экспериментальным данным астрономии и астрофизики этот механизм не получил ни одного подтверждения. По-видимому, первый «удар» механизму холодного образования планет был нанесен после интерпретации данных, полученных космическими аппаратами «Пионер-X» и «Пионер-XI», с помощью которых 25 лет тому назад было обнаружено мощное тепловое излучение, исходящее от Юпитера (Козырев, 1977). В этих экспериментах так же обнаружена высокая симметрия гравитационного поля Юпитера, характерная для газового шара. Козырев (1977) оценил температуру центральной части Юпитера по величине теплового потока из его недр. Эта

температура оказалась равной 165 000 K, что примерно в два раза ниже, чем наша оценка. После открытия теплового излучения Юпитера возникла дискуссия о том, что представляет собой Юпитер: планету или звезду. Заметим, что в последнее время появились работы, в которых авторы допускают, что недра Юпитера, как и других планет гигантов, - горячие (Boss, 1995). Второй «удар» механизму холодного образования планет был нанесен открытием «Коричневых карликов» – инфракрасных звезд, занимающих по массе промежуточное положение между Юпитером и Солнцем (Allard, 1995; Nelson, 1995; Rebolo et al., 1995). Возникла парадоксальная ситуация: Юпитер – планета холодная, в недрах которой водород находится в жидком, и даже твердом состоянии, а Коричневый карлик, масса которого всего в 10 раз больше чем у Юпитера, – звезда (хоть и инфракрасная). Наконец, результат, полученный в самое последнее время с использованием внеатмосферного телескопа Хаббла (Throop et al., 2001), можно считать третьим и самым решительным «ударом» по холодной модели. В этой работе (Throop et al., 2001) приведены результаты исследований спектров пропускания галактического электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн при просвечивании circumstellar disks in the Orion nebula. Возраст этого circumstellar disks не превышает 100 тыс. лет. Согласно общепринятой модели образования планет, в таком диске должны находиться планетезимали, рассеивающие это излучение. Однако ожидаемого эффекта поглощения электромагнитного излучения не обнаружено. Авторы (Throop et al., 2001) пришли к выводу, что планеты в этом диске уже сформировались, хотя их время формирования значительно меньше (в 1000 раз!), чем следует из принятой модели формирования планет.

Запуск космического телескопа им. Спитцера (Аризонский университет, США) принес новую сенсацию: В 2004 г. вокруг некоторых старых звезд обнаружено инфракрасное излучение от пылевых колец и дисков. Очевидно, что этот факт так же находится в противоречии с общепринятой моделью формирования планет (Savage, Clavin, 2004).

Что же такое планеты? Оказывается, такая постановка вопроса вполне своевременна и актуальна. Данные по обнаружению планет в других звездных системах и изучению планетарных туманностей – своеобразных «колыбелей» планет, полученные с помощью телескопов Хаббла и Спитцера в самые последние годы в межзвездной астрономии, вполне оправдывают привлечение внимания к такому, казалось бы, весьма тривиальному вопросу. На страницах журнала Science (McCaughrean et al., 2001) и в Internet (Lissauer, 2001) в 2001 г. разыгралась дискуссия на тему: “What is a Planet?” Эта дискуссия показала, что однозначно ответить на поставленный вопрос пока нет возможности. Вероятно, дело в том, что холодная модель образования планет находится в противоречии с данными, касающимися проблемы формирования планет, полученными в самое последнее время.

8. 2. Два примера численного моделирования самогравитации.

Принято считать, что «самогравитация» проявляется лишь в том случае, если некий объем вещества имеет достаточную массу для того, чтобы самогравитация превосходила твердотельные силы и тело могло принять гидростатически равновесную (близкую к сферической) форму. В контексте модели горячей Земли это определение можно трактовать следующим образом: если объем вещества имеет массу M, такую, что $GM/R > U$, где U - теплота плавления, то планета (спутник) в процессе образования, за счет самогравитации, пройдет фазу плавления и примет при этом сферическую форму. Вещество при этом будет нагрето до температуры $T \sim M^{2/3}$.

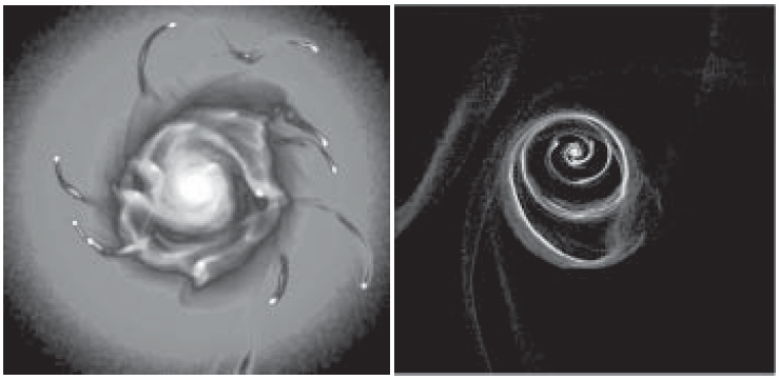


Рис. 8-1. Расчеты на суперкомпьютере (Снытников и др., 2002). Слева: сгустки вещества при развитии гравитационной неустойчивости. Справа: кольцеобразные структуры из частиц твердой фазы. Количество частиц в расчетах - 300 000.

В институте катализа им. Борескова СО РАН создана 3D численная модель для исследования нестационарных процессов в гравитирующей системе многих тел с газом (Снытников и др., 2002). Модель основана на решении уравнения Пуассона для гравитационного поля, уравнения Власова для крупных тел и газодинамических уравнений. Для решения на каждом временном шаге уравнения Пуассона построен эффективный итерационный алгоритм с экстраполяцией рассматриваемых эволюционных процессов, что обеспечивает быструю сходимость при высокой точности. Приведены примеры численного решения задачи о развитии физической неустойчивости в модели плоского гравитирующего диска с учетом газовой компоненты при различных начальных условиях.

Задача решалась на суперкомпьютере, получены впечатляющие результаты (рис. 8-1), но они теряют смысл, - в практической постановке задачи авторами, которыми проводилось моделирование процесса образования Солнечной системы. Авторами в расчетах было принято 300 000 пробных тел. Самая элементарная оценка показывает, что масса Земли составляет именно 1/300 000 массы Солнца. Следовательно, пробный шар соответствует массе Земли. Как можно получить Юпитер из 300 таких «пробных тел» как Земля, и, тем более, Луну - не обсуждается.

В ИПМ им. Келдыша РАН (Забродин и др., 2006) рассмотрены аналитическая и численная модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции. Получены аналитические решения для протопланетного диска Солнца и решения для планетных газопылевых колец протопланетного диска. Выполнены численные расчеты стационарных состояний планетных колец протопланетного диска и эволюции протопланетного кольца, находящегося в нестационарном состоянии. Приведены результаты аналитических и численных расчетов, их анализ и сравнение. Предложена модель образования планетной солнечной системы. Эти исследования наиболее близки к нашей постановке, хотя и в этой работе не учитываются механизмы диссипации, приводящие к нагреву центра диска.

Как видно из этих примеров, задачи самогравитации обычно решаются без учета противодействующей силы, возникающей в центральной области исходного сгустка материи за счет его нагрева при сжатии и возникновении противодействующего гравитации газокинетического давления. В таких работах рассматривалась самогравитация твердых шаров в газе, или самогравитация идеального газа. Надо сказать, что альтернативная теория самогравитации звезд в галактике с учетом противодавления была создана Линем и Шу.

Звезды в галактиках образуются в результате развития некоторого волнового механизма, генерирующего волны плотности. Теория спиральной структуры галактик

стала быстро развиваться после появления серии работ Линя и Шу, в которых они предложили модель спиральных волн плотности. Согласно модели, по спиральным рукавам Галактики распространяются продольные волны плотности, которые генерируются в её центральной части, аналогично звуковым волнам плотности, распространяющимся в газе. Плотность звездного вещества возрастает в пучностях этих волн, и таким образом, создаются условия, необходимые для образования звезд.

Предположим, что аналогично этому может происходить генерация волн плотности внутри протосолнечной туманности в момент образования Солнца. По крайней мере, в модели Линя и Шу нет никаких масштабных ограничений, которые не позволяли бы использовать механизм генерации волн плотности, сопутствующих образованию Солнца. Аналогичным образом волны плотности должны возникать и при формировании планет гигантов.

Используя механизм Линя и Шу, будем полагать, что при формировании Солнечной системы, (а так же при формировании систем Юпитера, Сатурна и Урана) за счет эффектов самогравитации вещества, в протосолнечном (протопланетном) диске, возникали волны плотности. Волновая структура определяла положение планет, вращающихся вокруг Солнца, и спутников, вращающихся вокруг планет. Взаимосвязь самогравитации и волн плотности очевидна: Вращение протосолнечного диска имеет фундаментальное значение для нашей модели, однако, трудно представить, что медленное вращение может оказать существенное влияние на процессы самогравитации.

8. 3. Новая модель образования и эволюции Земли и планет.

Предметом нашего исследования является физика горячей Земли, однако Землю, как планету, нельзя рассматривать отдельно от других планет и спутников, и всей Солнечной системы в совокупности. Физика Солнечной системы до настоящего времени, так же как и физика Земли, остается далеко не ясной. В научной литературе обсуждаются различные сценарии возникновения и дальнейшей эволюции Солнечной системы, обсуждаются её удивительные резонансные свойства, астрономы продолжают обнаруживать наличие планет у других звезд и т.д. Действительно, изучение Земли в контексте всей Солнечной системы, хотя и более громоздко, но, наверняка, более продуктивно. По всей видимости, такой подход поможет “отсечь” из рассмотрения физики Земли какие-то аспекты, несвойственные объектам Солнечной системы в целом.

Фрактальный характер расстояний планет от Солнца. Одна из основных закономерностей, свойственных Солнечной системе, это закон планетарных расстояний (от Солнца до планеты) Тициуса-Боде. Он записывается в виде:

$$R = 0.4 + 0.3\times 2^{n}. \qquad (8.1)$$

Это скейлинговое соотношение, здесь R – расстояние (в а. е.), n – целые числа (для Меркурия, $n = -\infty$, для Венеры, $n = 0$, для Земли, $n = 1$ и т.д.). Аналогичные закономерности характеризуют расстояния от планеты до спутников в системах Юпитера, Сатурна и Урана (рис. 6-7). Этот факт подчеркивает общность механизмов формирования Солнечной системы и систем спутников этих планет.

Если в Солнечной системе имеет место скейлинг, то можно ли говорить о ней как о фрактальной, самоорганизующейся структуре? Положительный ответ на этот вопрос позволил бы совершенно по-новому взглянуть на извечную проблему, как образовалась Солнечная система.

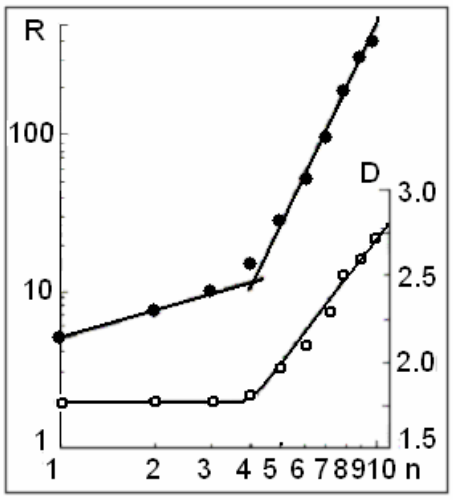


Рис. 8-2. Зависимость расстояния планеты от Солнца *R* (а.е.) величины фрактальной размерности *D* от порядкового номера планеты *n* (*lg*-*lg*). 1- Меркурий, 2- Венера, 3 – Земля, 4 – Марс, 5 – пояс астероидов, 6 – Юпитер и т.д.

Присутствие процессов самоорганизации в такой структуре как Солнечная система обязано проявиться наличием фрактальных свойств, которые, как известно, являются пространственно-временным "срезом" процессов самоорганизации. Самоорганизация происходит, как правило, при наличии двух процессов: диффузии и переноса. Если нам удастся вскрыть два таких взаимосвязанных процесса, фрактальность Солнечной системы получит подтверждение. Представим себе, что Солнечная система действительно обладает фрактальными свойствами. В этом случае можно оценить фрактальную, хаусдорфову размерность (Mandelbrot, 1983) D_H, например, следующим образом:

$$D_H = \lim \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}. \qquad (8.2)$$

Здесь N – число событий, r – их энергия (сила). Зная величину фрактальной размерности, можно говорить о характере процесса самоорганизации. В Солнечной системе совсем не много параметров, на анализе которых можно делать вывод о наличии процессов самоорганизации. Фактически таких параметров два: номер планеты n и её расстояние от Солнца R. В такой ситуации, если бы была обнаружена зависимость типа:

$$R \approx A + n^D, \qquad (8.3)$$

где размерность D – нецелое число, A – константа, то можно было бы говорить о фрактальности Солнечной системы.

Расстояния планет от Солнца R от номера планеты n представлены на рисунке 8-2 (точки). Здесь R, для удобства представления, выражается в единицах 10 а.е. Зависимость $lg\ R - lg\ n$ для планет Солнечной системы позволяет выделить две группы планет, из них, 1-я: Меркурий (1), Венера (2), Земля (3), Марс (4) и 2-я: группа от пояса Астероидов (5), до Плутона (10). На этом же рисунке (рис. 8-2) показана фрактальная размерность D, которая выявила интересную особенность зависимости (8.3).

Величина D определялась нами по формуле:

$$D \approx lg\ R / lg\ n, \text{ где } R_{(AU)} \approx 0.1(3 + n^D). \qquad (8.4)$$

Для Меркурия (1), Венеры (2), Земли (3) и Марса (4) величина D неизменна и равна 1.75 (см. рис. 8-2), для пояса Астероидов (5) D возрастает до 1.97 и дальше, постепенно увеличивается, достигая для Нептуна и Плутона величины 2.6. О чем это может говорить? Принято считать, что чем ниже величина D, тем выше степень самоорганизации структуры и, что по мере эволюции самоорганизующейся системы, величина её фрактальной размерности падает. Величина D = 1.75 для планет 1 – 4 может говорить о том, что эти планеты прошли один, общий для них путь формирования.

Солнечная система это двумерная структура, т.е. топологическая размерность её равна двум. Мы получили размерность системы не целое, а дробное число, этот факт говорит об её фрактальности. Размерность внутренних планет оказалась ниже 2, это показывает, что они при образовании и в процессе эволюции достигли более высокой ступени самоорганизации, чем внешние планеты. Этот факт может означать, например, что процесс формирования планет земной группы происходил на фоне (как будет показано ниже) единого для Солнечной системы волнового процесса, определившего положение планет относительно Солнца, и механизма переноса массы от этих планет к Солнцу, формирующемуся за счет этого переноса. Рисунок 8-2 демонстрирует, что разделение планет Солнечной системы на внутренние, подобные Земле, и внешние, имеет не только внешнюю сторону, но и более глубокие внутренние корни. По-видимому, единый в начале формирования Солнечной системы процесс был разорван, что имело смысл бифуркации, произошедшей в зоне пояса астероидов.

Плотность вещества в Солнечной системе. Как известно, планеты вращаются вокруг Солнца в одной плоскости, плоскости эклиптики, совпадающей с его экватором. В первом приближении, структуру, состоящую из Солнца и планет, можно представить как двумерную. В этом случае имеет смысл говорить не об объемной плотности вещества Солнечной системы, а о - поверхностной. Вполне логично допустить, что каждая из планет образовалась из того вещества, которое было сосредоточено в кольце, ограниченном собственным радиусом *n*-ой планеты и радиусом внутренней относительно неё планеты *n* - 1, где *n* - порядковый номер планеты (пояс астероидов мы тоже считаем планетой). Поделив массу планеты на площадь такого кольца, мы получим величину поверхностной плотности:

$$\rho = M_n/\pi(R^2_n - R^2_{n-1}). \qquad (8.5)$$

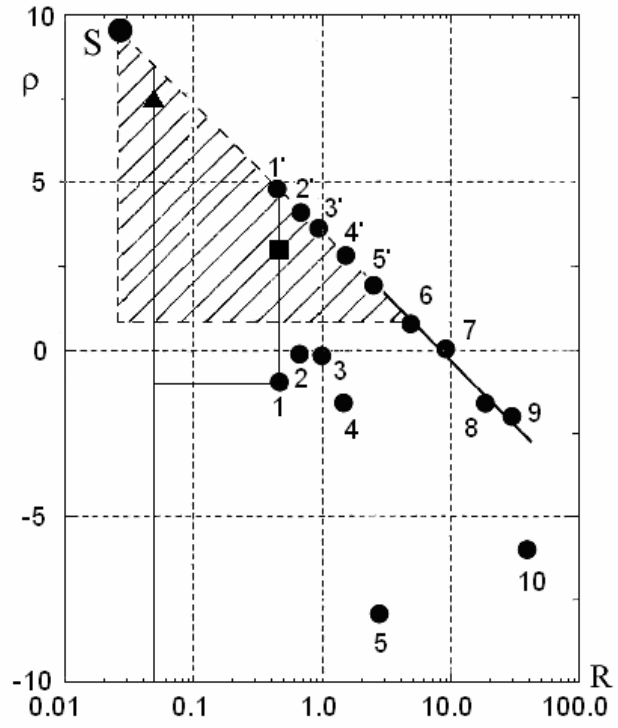


Рис. 8-3. Величина поверхностной плотности для планет Солнечной системы (lg-lg). Масса заштрихованного треугольника равна массе Солнца. Объяснения – в тексте.

В таблице 8.1 приведены величины поверхностной плотности для Солнца (С) и планет (М - Меркурий, В - Венера, З - Земля и т.д.). Это же распределение в log-log

масштабе для $\rho = f(R)$ изображено на рис. 8-3. Нельзя не обратить внимания на четкую зависимость величины плотности от расстояния до Солнца, для планет Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Эта зависимость не может быть случайной. Скорее всего, она показывает нам распределение плотности в протосолнечной туманности в момент формирования самого Солнца и планетной системы накануне бифуркации.

Таблица 8.1

	С	М	В	З	М	А	Ю	С	У	Н	П
M	3×10^{5}	0,05	0,815	1	10^{-1}		317	95	14,5	17,2	0,002
R	5×10^{-3}	0,39	0,72	1	1,52	2.8	5,2	9,54	19,2	30,7	39,5
lg(ρ)	9,6	-0,97	-0,14	-0,2	-1,62		0,72	0,17	-1,78	-2,02	-6

Сжатие диска и критерий Джинса. Английский физик Д.Х. Джинс, занимаясь проблемой эволюции и устойчивости звезд, показал, что самогравитации звезд и их последующему сжатию препятствует собственное давление межзвездного газа. Действительно, здесь можно увидеть противоречие: чем плотнее вещество, тем самогравитация должна быть сильнее, но тем выше и собственное (газокинетическое) давление, препятствующее самогравитации. Соотношение между самогравитацией и газокинетическим давлением «регулируется» критерием Джинса, который требует, чтобы концентрация вещества должна быть больше некоторой критической плотности ρ_C, при которой гравитационные силы и внутреннее давление точно сбалансированы. Численная оценка плотности вещества для облака с массой M и температурой T (Клейтон, 1982; Jeans, 1916):

$$m_C = 10^3\ [T^3/(M/M_\odot)]\ \text{см}^{-3}. \qquad (8.6)$$

Здесь критическая плотность вещества: $\rho_C = m_C\ \mu\ m_P$, μ - атомный вес, m_P - масса протона. Типичное большое диффузное облако может иметь массу $M = 10^3\ M_\odot$ и $T = 100$ К. ($M_\odot$ - масса Солнца). В этом случае, концентрация частиц в облаке $m \approx 10$ см$^{-3}$ составляет всего 10^{-2} от $m_C \approx 10^3$ см$^{-3}$.

Масса, необходимая для коллапса протозвезды:

$$M_{\text{Jn}} \geq 1/795\ (R_g T/G)^{3/2}\ \rho^{-1/2}, \qquad (8.7)$$

где R_g газовая постоянная, G - постоянная тяготения, ρ - плотность вещества облака.

Критическая Джинсова плотность $\rho_C = M_n/\ \lambda^2$, где λ - Джинсова длина волны, $\lambda = R_n - R_{n-1}$. Критическая масса Джинса M_{Jn}, при которой может начаться гравитационное сжатие,

$$M_{\text{Jn}} = \rho\lambda^2 = M_n\,(R_n - R_{n-1})^2/\pi(R^2_n - R^2_{n-1}); \qquad (8.8)$$

отсюда:

$$M_{\text{Jn}}/M_n \approx (R_n - R_{n-1})\ /\ (R_n + R_{n-1}). \qquad (8.9)$$

Условие самогравитации (8.9) выполняется для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Однако, это совсем не так для планет земной группы: их масса значительно меньше критической Джинсовой: M_{Jn}/M_n для Земли, Марса, Юпитера, соответственно: 10^4; 10^5; 0.3.

Рисунок 8-3 показывает зависимость плотности от расстояния до Солнца (R) для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна: $\rho = A\ R^{-n}$, где $n \approx 3.55$ – показатель степени, A – константа. Эта зависимость прерывается в районе пояса астероидов (5'), где произошел разрыв, бифуркация в цепи процессов фрагментации протосолнечного диска на отдельные кольца в момент образования Солнца и планет. Процесс формирования Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна из отделившихся от диска колец продолжался, и вещество, находящееся в выделенном кольце, собралось в большую планету. При этом были сформированы системы спутников, аналогичные планетам Солнечной системы. В планетах земного типа к моменту бифуркации успели сформироваться лишь железно-

каменные ядра будущих планет. Вся оставшаяся масса протосолнечного диска (в основном водород) пошла на образование Солнца. На рис. 8-3 заштрихованный треугольник показывает ту часть вещества протосолнечного диска, которая пошла на формирование Солнца массой $M_{\odot}$.

Однако, это совсем не так для планет земной группы: их масса значительно меньше критической джинсовой (см. Таблицу 8.2).

Таблица 8.2

	М	В	З	М	А	Ю	С	У	Н	П
М	0,05	0,815	1	10^{-1}		317	95	14,5	17,2	0,002
λ	0,4	0,3	0.3	0,52	1.3	3,4	4,3	9,7	11,5	8,8
M_J/M	10^6	10^4	10^4	10^5	10^8	0,3	0,3	0.33	0.23	10^3

Таблица 8.3 лишний раз иллюстрирует различия между планетами земного типа и планетами гигантами. Здесь сравнивается величина гравитационного потенциала Солнца на орбитах Земли, Юпитера и Сатурна с собственным гравитационным потенциалом этих планет. Видно, что у Земли он меньше, чем *GM/R* Солнца на её орбите, а у Юпитера и Сатурна - выше. Рисунок 8.2, Таблицы 8.2 и 8.3 показывают нам, что Природа сохранила "подсказку" в виде четкой зависимости $\rho(R)$ для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Наша задача состоит в том, чтобы извлечь из неё пользу.

Таблица 8.3

GM/R Солнца вблизи	Земли	Юпитера	Сатурна
каждой из планет:	6×10^{12} (см/с)^2	10^{12} (см/с)^2	6×10^{11} (см/с)^2
GM/R планет:	6×10^{11} (см/с)^2	2×10^{13} (см/с)^2	6×10^{12} (см/с)^2

Еще раз обратимся к рисунку 8-3 и постараемся проанализировать четкую логарифмическую ($\lg\rho$ - $\lg R$) зависимость плотности от расстояния до Солнца R для четырех больших планет. Зависимость $\rho(R)$ для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна можно определить выражением: $\rho = A R^{-n}$, где $n \approx 3.55$. Эта зависимость прерывается в районе пояса астероидов. Складывается впечатление, что именно в районе пояса астероидов произошел разрыв, бифуркация в цепи процессов фрагментации протосолнечного диска на отдельные кольца в момент образования Солнца и планет. Процесс формирования планет: Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна из отделившихся от диска колец прекратился и оставшаяся масса протосолнечного диска "пошла" на образование Солнца и лишь малая его часть была "израсходована" на формирование Земли, Венеры, Марса и Меркурия. Если принять такую модель, то масса протовещества, "оставшаяся" после формирования планет земной группы должна быть примерно равна массе Солнца $M_{\odot}$. Массу $M_{\odot}$ можно оценить по $M_{\odot}$ по формуле:

$$M_{\odot} = \int_r^R x\rho dx, \tag{8.10}$$

где x – текущий размер протосолнца. Плотность $\rho = A x^{-n}$, (x вместо R), тогда $M_{\odot}$:

$$M_{\odot} = A\int_r^R x\, x^{-n}\, dx = A[x^{-n+2}/(-n+2)]\,\Big|^R_r \tag{8.11}$$

Подставляя R и r, получаем:

$$M_{\odot} \approx Ar^2/(n-2)r^n. \tag{8.12}$$

Здесь R - радиус орбиты пояса астероидов, а r - радиус протосолнца в момент бифуркации, n мы оценили по наклону прямой (n = 3.55). Оценим величину A, подставив значения массы $M_{Ю}$ и радиуса орбиты $R_{Ю}$ для Юпитера:

$$A = R^{n}_{Ю} M_{Ю} / \pi R^{2}_{Ю} = 1/1.55\pi \, (R_{Ю}{}^{1.55} M_{Ю}). \quad (8.13)$$

Подстановка формулы A в выражение для $M_{©}$ дает:

$$M_{©}/M_{Ю} \approx 1/5 \, (R/r)^{1.55}, \quad (8.14)$$

где r текущий радиус формирующегося Солнца. Величина r после подстановок известных величин оказывается равной 2.5 млн. км, что примерно в три с небольшим раза больше чем радиус современного Солнца. Т.о. бифуркация произошла в момент формирования Солнца, когда его радиус был примерно в три раза больше современного, т.е. процесс его формирования еще не закончился (см. рис. 7-3, слева).

Возможный механизм образования Солнечной системы. Принято считать, что звезды в галактиках образуются в результате развития некоторого волнового механизма, генерирующего волны плотности. Теория спиральной структуры галактик стала быстро развиваться после появления серии работ С.С.Линя и Ф.Х.Шу (Lin, et al., 1969; Roberts, 1969), в которых они предложили модель спиральных волн плотности. Согласно модели, по спиральным рукавам Галактики распространяются продольные волны плотности, которые генерируются в её центральной части, аналогично звуковым волнам плотности, распространяющимся в газе (Каплан, Пикельнер, 1979; Клейтон, 1982). Плотность звездного вещества возрастает в пучностях этих волн, и таким образом, создаются условия, необходимые для образования звезд.

Предположим, что аналогично этому может происходить генерация волн плотности внутри протосолнечной туманности в момент образования Солнца. По крайней мере, в модели Линя и Шу нет никаких масштабных ограничений, которые не позволяли бы использовать механизм генерации волн плотности, сопутствующих образованию Солнца. Аналогичным образом волны плотности должны возникать и при формировании планет гигантов.

Используем механизм Линя и Шу, причем будем полагать, в дальнейшем, что при формировании Солнечной системы, (а так же при формировании систем Юпитера, Сатурна и Урана) за счет эффектов самогравитации вещества, в протосолнечном (протопланетном) диске, возникали волны плотности. Волновая структура определяла положение планет, вращающихся вокруг Солнца, и спутников, вращающихся вокруг планет. Взаимосвязь самогравитации и волн плотности очевидна: Вращение протосолнечного диска имеет фундаментальное значение для нашей модели, однако, трудно представить, что медленное вращение может оказать существенное влияние на процессы самогравитации.

Примем следующие элементы концепции:

- Распределение плотности вещества в диске и его устойчивое вращение с необходимой кинетической энергией, обеспечивало планетам, после их формирования, необходимую скорость движения их по Кеплеровским орбитам.
- Плотность и температура вещества диска были достаточно высоки для того, чтобы начался процесс самогравитации с гравитационной (Альфвеновской) скоростью падения частиц на центральное тело (Солнце или планету), большей, чем та скорость, которая требуется по критерию Джинса.
- Химический состав вещества диска соответствовал химическому составу образующихся планет.
- В момент образования Солнца характер распределения плотности вещества диска резко изменился, т.е. произошла бифуркация процесса образования.
- Процессы самогравитации планет (спутников), с последующим сжатием и уплотнением вещества диска, являются следствием гравитационного возмущения, вызванного формированием Солнца (планеты)

- Распределение плотности вещества родительского диска от расстояния до Солнца соответствовало распределению плотности до бифуркации.

Сделаем пару дополнительных замечаний: 1. Скорость увеличения радиуса центрального уплотнения диска *dr/dt* автомодельно возрастает с увеличением размера тела. 2. Если мы правы в нашем предположении, что Солнечная система и системы регулярных спутников Юпитера, Сатурна, и Урана имеют общий, единый механизм формирования, мы имеем возможность оценить нижний предел массы планеты, у которой образуется такая система спутников: $\approx 15\ M_E$, (M_E – масса Земли). Вокруг Урана, масса которого 14.5 M_E система регулярных спутников имеется, в то время как вокруг Нептуна (17.2 M_E), - её нет. Возможной причиной такого различия между Ураном и Нептуном состоит в том, что плотность вещества диска в области формирования Нептуна значительно ниже, чем в области формирования Урана (рис. 8-3). Вероятно, эта же причина привела к тому, что в окрестности Земли сформировалась Луна, аналогично тому, как около Нептуна сформировался Тритон.

Приведем оценку времени формирования звезды, планеты, спутника, полагая, что по какой-то причине в протопланетном диске начался процесс формирования её центральной части – ядра. Модель будем строить на аналогии с процессом коагуляции, т.е. роста капли при "падении" на неё частичек газа. Обозначим характерное время столкновения частицы газа с "каплей" (зародышем звезды, планеты, спутника), через *t*. Время $t = (\sigma\, n\, v)^{-1}$, где $\sigma = \pi\, r^2$ – сечение "капли", $n = \rho/m$ – концентрация частиц в газе, *m* – масса частицы, *v* – её скорость, $r = (V_к)^{1/3}$ – радиус капли, $V_к = V_ч\, g$ –объем капли, $V_ч$ – объем частицы, *g* – число частиц в капле.

Время роста капли:

$$t = \int dg/\sigma\, n\, v, \qquad (8.15)$$

т.к. $\sigma = \pi(V_ч\, g)^{2/3}$, то $t = g^{1/3} / (V_ч^{2/3}\, n\, v)$, или $t \approx r/(V_ч\, n\, v)$. Подставляя значение *n* и заменяя: $m/V_ч = \rho_n$ – плотность планетного вещества (ρ_n = 3 г/см^3), получаем выражение для *t*:

$$t = (\rho_n/\rho_o) \times (r/v), \qquad (8.16)$$

здесь ρ_o – плотность вещества протопланетного диска.

Из формулы 8.16 следует, что время формирования космического тела пропорционально его размеру, обратно пропорционально исходной плотности вещества и скорости дрейфа частиц диска. Подставляя выражение для $v = (GM/R)^{1/2}$ и плотности ρ_n, получаем выражение для t_{min}:

$$t_{min} = 1/\rho_o \times (\rho_n/4\pi G)^{1/2}. \qquad (8.17)$$

Время образования (в годах) после подстановки ρ_o (г/см^3):

$$t_{min} \approx 10^{-4} / \rho_o \qquad (8.18)$$

Скорость роста "капли" *dr/dt* оценим аналогично предыдущему:

$$dr/dt = r\ \rho_o (4\pi G/\rho_п)^{1/2}. \qquad (8.19)$$

Как мы условились, при образовании Солнца и планет Солнечной системы действовал единый механизм. Во-первых, происходило сжатие вещества и образование центрального тела, во-вторых, - вращение всего диска и, в-третьих, возникновение волн плотности, в пучностях которых образовывались центры вторичных, уже протопланетных дисков. Действие этого автомодельного механизма было прервано, произошла бифуркация, в результате чего на месте пояса Астероидов не образовалось планеты "Фаэтон", а масса внутренних планет оказалась значительно меньше, чем внешних. Как мы выяснили выше, это явление могло быть связано с изменением режима сжатия диска при образовании Солнца.

Есть ли свидетельства, подтверждающие или опровергающие сказанное нами? Для ответа на этот вопрос, вернемся ещё раз к рисункам 8-2 и 8-3. Как мы отмечали (рис. 8-2), расстояния от Солнца до внутренних планет $R \sim n^{1.75}$. Затем (начиная с пояса астероидов) показатель степени постепенно возрастает по мере удаления от Солнца. Плотность вещества диска убывает по мере роста расстояния (увеличения номера планеты *n*): $\rho \sim$

$R^{-3.55}$ (рис. 8-3). Допустим, что до бифуркации распределение плотности в области образования внутренних планет было точно таким же.

Предположим, что в сжимающемся протосолнечном диске действовал волновой механизм, генерировались волны плотности с частотой ω, аналогичные звуковым, причем, скорость их распространения c_s зависит от давления p и плотности вещества ρ как: $c_s \sim (\gamma p/\rho)^{1/2}$ (γ - показатель адиабаты). Предположим, что $p \sim 1/R$, $\rho \sim 1/R^2$, тогда $c_s \sim R^{1/2}$. Ранее было принято, что $\lambda \sim R$, тогда: $\omega = c_s/\lambda \sim R^{-1/2}$, т.е. частота волн плотности весьма слабо зависит (убывает) от расстояния до Солнца R. Зависимость $\omega \sim R^{-1/2}$ показывает, что вещество диска вращалось дифференциально, что вполне естественно, если учесть наличие вязкости его вещества.

Возможно, частота ω каким-то образом связана с частотой вращения протосолнца, которая, как будет показано ниже, раньше была значительно больше, чем современная. Если это действительно так, то получающиеся при этом скорости распространения волн плотности в протосолнечном диске оказываются несколько большими, чем принятые для скорости звука в такой газообразной среде. Как относиться к этим оценкам и можно ли на их основании делать какие-либо определенные выводы, не совсем ясно. Ясно одно, что мы слишком мало знаем о физике процессов, происходящих в момент образования звезды и её планетной системы.

Можно ли что-либо определенное сказать о роли самоорганизации в процессе формирования планет, особенно, планет земного типа? Для самоорганизации необходимо наличие двух связанных друг с другом процессов: диффузии и перколяции. На эту роль могли бы претендовать два очевидных механизма: обмен волнами плотности, во-первых, и, во-вторых, - собственно сама самогравитация (самосжатие). Вполне возможно, что для описания механизма образования Солнечной системы удастся записать уравнения типа уравнений Фоккера-Планка. Очевидно, что получить простое дифференциальное уравнение, которое можно было бы попытаться решить аналитически, надежды нет.

Почему не образовалась планета Фаэтон? Если масса планеты меньше Джинсовой критической массы, то она не должна образоваться за счет механизма самогравитации (самосжатия). Если учесть, что начальная плотность вещества обособившегося кольца, из которого формировалась планета, была значительно больше, чем та, которая получается делением массы планеты на площадь кольца (например, для Земли эта плотность была больше примерно на 4 порядка: точки 3 и 3’ на рис. 8-3), то окажется, что начало самосжатия вполне возможно. Важным моментом здесь будет то, что бифуркация произошла тогда, когда самосжатие внутренних планет уже началось, и уже успели сформироваться ядра будущих планет, но окончательно оно ещё не закончилось. Почему же не образовалась планета Фаэтон? Ведь и в этом случае начальная плотность вещества диска была больше критической Джинсовой. Кажется, что хотя бы маленькая планета, пусть даже меньше Марса, но должна бы успеть сформироваться в районе пояса Астероидов. Очевидно, что процесс самосжатия на орбите пояса Астероидов имел место, но в результате появились лишь астероиды, а не планета. Следовательно, существует какая-то другая причина, помешавшая формированию планеты. Попытаемся предложить одно из возможных решений.

Обратим внимание на ещё один критерий, связанный с формированием планеты, о существовании которого мы раньше не упоминали. Обозначим: v_R – скорость дрейфа частиц вдоль кольца радиусом R (R равно расстоянию до Солнца). Эта скорость определяет время формирования протопланетного диска t_R: $t_R = 2\pi R/v_R$, отсюда следует, что $t_R \sim R$. Условие образования планеты очевидно: $t_\rho > t_R$, где t_ρ мы оценили выше (8.18) как: $t_\rho \approx t_{min} \approx 10^{-4}/\rho_o$. Для удобства, вместо t_R введем некую плотность $\rho_R \sim 1/t_R$, которая $\sim 1/R^2$. Вполне возможно, что именно в области пояса астероидов условие: $t_\rho > t_R$ не выполнялось. Из рисунка 8-3 следует, что линия ρ_R проходит ниже точки 5’, которая показывает плотность диска перед началом бифуркации. Вполне возможно, что этот, или

подобный ему механизм, был причиной того, что Фаэтон в Солнечной системе не образовался. В области формирования этой планеты произошло изменение плавного течения процесса. Характер сжатия изменился, произошел разрыв сплошности диска, началась стадия быстрого, коллапсирующего сжатия и формирование Солнца. Распределение плотности диска изменилось и вместо начальной плавной функции (продолжение прямой 9 – 6 на рис. 8-3), оказалось, что по мере приближения к Солнцу, величина плотности стала убывать (точки 4 – 1 на рис. 8-3).

Вернемся к нашим оценкам. Выше мы отмечали, что если разделить массу планет земного типа на Джинсову критическую массу, то оказывается, что самосжатие и образование их невозможно. Однако будем учитывать, что начальная плотность вещества обособившегося кольца, из которого формировалась планета, была значительно больше, чем та, которая получается делением массы планеты на площадь кольца. Например, для Земли эта плотность была больше примерно на 4 порядка. В этом случае гравитационное самосжатие вполне возможно, по крайней мере, возможно, начало этого процесса. Важным моментом здесь будет то, что бифуркация произошла тогда, когда самосжатие внутренних планет уже началось, но ещё не окончилось. Почему же не образовалась планета Фаэтон? Ведь и в этом случае начальная плотность вещества диска была больше критической Джинсовой.

Здесь необходимо сказать ещё об одном, достаточно очевидном критерии, о котором мы раньше не упоминали. Он связан с формированием планеты. Температура газа вещества диска и его молекулярный состав определяют скорость распространения через него звуковых волн. Очевидно, что любые другие скорости дрейфа молекул будут меньше чем скорость звука (c_s). Если это не так, то в системе образуются ударные волны, роль которых мы пока не рассматриваем. В этой связи, введем скорость дрейфа частиц вдоль кольца радиусом R: $v_R < c_s$. Эта скорость определяет конечное время, в течение которого вещество кольца соберется в новый протопланетный диск. Это время, обозначим его t_R, будет в основном определяться радиусом кольца R: $t_R = 2\pi R/v_R$, иначе: $t_R \sim R$. Очевидное условие формирования протопланетного диска, а вслед ему и самой планеты, можно определить так: $t_\rho > t_R$, где t_ρ мы оценили выше как: $t_\rho \approx 10^{-4} / \rho_o$. Так как плотность вещества диска $\rho_o = A R^{-n}$, где $n \approx 3.55$, то, казалось бы, зависимости $lg\ t - lg\ R$ должны быть параллельны друг другу, никогда не пересекаться, а наше условие всегда должно выполняться.

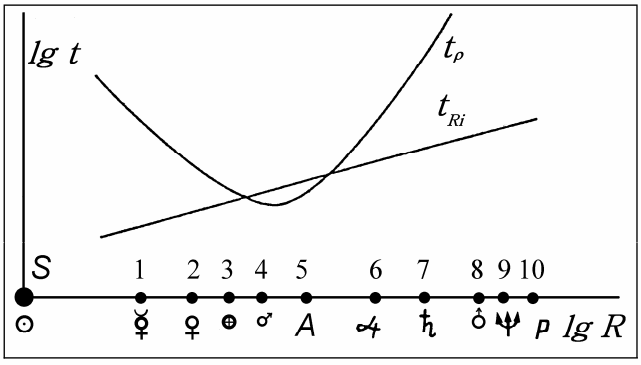


Рис. 8-4. Соотношение ($lg - lg$) времён образования планеты t_ρ и стягивания вещества кольца t_R в зависимости от расстояния планеты R до Солнца (S). 1 – Меркурий, 2 – Венера, и т.д.

По всей видимости, на самом деле это было совсем не так. Вернемся к нашей модели образования Солнечной системы, к моменту начала бифуркации. Благодаря волновому механизму, обособились кольца, начался процесс стягивания материала колец

в протопланетные диски, и здесь что-то случилось с плавным течением процесса. Характер сжатия изменился, произошел разрыв сплошности диска, началась стадия быстрого, коллапсирующего сжатия и формирование Солнца. Распределение плотности диска изменилось и вместо начальной плавной функции, оказалось, что по мере приближения к Солнцу (скорее, еще к протосолнцу), величина плотности стала убывать, как это показано на рис. 8-3. В области, занимаемой поясом астероидов, величина плотности оказалась близкой той, которая была в зоне роста Марса и Земли.

В (Кузнецов, 1984, 1990) приведены величины плотности для Земли, Марса и пояса астероидов, соответственно: 10^{-8}, 2×10^{-8}, 2×10^{-8} г/см^3, что дает величины t_ρ : 10^4, 5×10^3, 5×10^3 лет. В свою очередь, величина t_R равна 3×10^3, 4.8×10^3, 8.4×10^3 лет для Земли, Марса и пояса астероидов, соответственно. Следовательно, условие: $t_\rho > t_R$, для области пространства диска, занимаемой поясом астероидов, не выполнялось. Вполне возможно, что в эту область частично попало кольцо протомарса, и именно поэтому он оказался таким маленьким. Рисунок 8-4 иллюстрирует сказанное: время t_ρ в области Марса и пояса астероидов оказывается примерно одинаковым, но для пояса астероидов меньшим, чем время "собирания" вещества в планетный диск, а затем в планету.

Куда "пропал" момент? Выше мы неоднократно касались вопроса о том, что небулярная гипотеза Канта-Лапласа неверна потому, что она не находит объяснения, почему 98% момента количества движения Солнечной системы сосредоточено в планетах, и его так мало (2%) приходится на Солнце? Иначе, этот вопрос можно переформулировать: почему Солнце вращается так медленно?

Сделаем два замечания. Во-первых, во всех книгах утверждается, что на Солнце приходится 2% от полного момента. Элементарные оценки показывают (Кузнецов, 1990), что на самом деле, на Солнце "приходится" еще меньшее количество момента (0.5%). Во-вторых, обратимся к анализу данных по вращательному моменту количества движения диффузных и плотных облаков, с массой, равной солнечной, приведенных в статье А.П. Босса (1985). Анализ показывает, что момент вращающегося диффузного облака солнечной массы составляет примерно 10^7 моментов Солнца, быстро вращающихся звезд Главной последовательности – около 10^3, а звезды типа Солнца в Плеядах – примерно в десять раз больше, чем момент количества движения Солнца. Если принять, что Солнце вместе со своей системой планет прошло весь путь от вращающегося облака до современного состояния, то возражение, основанное на перераспределении момента между Солнцем и планетами, оказывается не столь уж категоричным. Таким образом, модель образования звезды, её планет и спутников, как единый процесс, т.е. как модель Канта-Лапласа, имеет право на существование и развитие.

Наша модель образования Солнечной системы основана на том, что протопланетное "облако", из которого она образовалась, изначально вращалось. Надо сказать, что вращение – общее свойство материи, хотя в Природе не совсем ясны его причины. Очевидно, для того, чтобы любая модель была внутренне согласована, необходимо выполнение условия баланса момента количества движения, между Солнцем и планетами. В настоящее время этот момент практически полностью сосредоточен во внешних планетах. Отсюда следует, что Солнце на самом начальном пути эволюции обязано было вращаться значительно быстрее, чем сейчас, - примерно в 100 – 1000 раз.

Что можно сказать о более ранних стадиях эволюции звезд солнечного типа? Оказывается, что звезды моложе Солнца, звезды, типа звезд Т-Тельца (возраст 10^6 лет), вращаются значительнее быстрее Солнца (Имхофф, 1982). Анализируя звезды различного возраста, было установлено, что с возрастом скорость вращения убывает: $\sim t^{-1/2}$. Звезды типа Т-Тельца обладают скоростью вращения около 150 км/с. Имхофф (1982, с. 810) отмечает, что если бы Солнце вращалось с такой скоростью, то "его момент количества движения был бы примерно равен моменту количества движения планет. Отсюда

напрашивается вывод, что солнечная туманность могла участвовать в общем вращении задолго до стадии Т-Тельца. Когда планеты сформировались, и туманность стала тонкой, обращение планет и вращение Солнца разделились. Затем, по мере того, как Солнце теряло массу, его вращение замедлялось … и по прошествии миллиардов лет оно стало столь медленным, как в настоящее время".

Замедление вращения звезды за счет потери её массы, - по-видимому, не единственный из возможных механизмов. В (Кузнецов, 1984) предложен другой механизм замедления, суть его заключалась в том, что при скорости вращения звезды порядка 300 км/с и более, значительную роль может играть анизотропия излучения. На экваторе излучение будет несколько жестче, чем на полюсах за счет проявления эффекта Доплера. Действие эффекта анизотропии излучения также, в принципе, может замедлять вращение звезды.

Самым простым решением проблемы уменьшения скорости вращения Солнца, в течение времени его эволюции, с точки зрения, развиваемой здесь физической модели, было бы его расширение, аналогично тому, как расширяется Земля и другие планеты. Если встать на такую позицию, то уменьшение скорости вращения Солнца примерно в 50 раз потребовало бы семикратного увеличения его радиуса. Эта идея остается пока гипотетичной, так как пока нет (по крайней мере, у меня) данных, подтверждающих заметное увеличение размеров звезды в процессе её "спокойной" эволюции. Принятой точкой зрения на физику торможения звезд считается замагниченный звездный ветер и связанное с ним явление уменьшения уровня поверхностной активности.

Единая последовательность: звезда – планета – спутник. Наша модель базируется на постулате, согласно которому Солнце, планеты и их спутники образовались по единому "сценарию", и в едином процессе. Механизм образования един для звезды, планеты, спутника. Все различия между ними заключаются лишь в количестве исходного материала, участвующего в этом процессе. Однако, это, казалось бы, естественное и очевидное предположение, находится в противоречии с общепринятыми на сегодня взглядами на образование планет и спутников. Поэтому, нам необходимо обосновать это предположение.

Принято считать, что в основе существования звезды лежит термоядерная реакция. Принято так же считать, что минимальная масса звезды, в которой еще способна протекать термоядерная реакция, составляет примерно 1/25 от массы Солнца. Естественно, возникает вопрос, что же получится за объект, если его масса окажется меньше минимальной? Хорошо известно, что если масса меньше, чем масса Солнца примерно в 1000 раз, то "получается" Юпитер. Есть ли в Природе объекты, больше Юпитера, но меньше 1/25 Солнца? Оказывается такие, "промежуточные" объекты - несостоявшиеся звезды, сравнительно недавно были обнаружены. Существование коричневых карликов было предсказано еще в 1963 году астрофизиком индийского происхождения Шивом Кумаром (университет штата Виргиния, США). Крис Дэвидсон (университет штата Миннесота, США) назвал эти неведомые звезды «инфракрасными карликами»; другие предлагали называть их «малиновыми карликами», но в 1975 году студентка-дипломница из университета в Беркли (США) Джил Тартер придумала термин «brown dwarf», и он прижился. На русский язык его перевели как «коричневый карлик», хотя в действительности эти объекты имеют «инфракрасный» цвет, и точнее было бы перевести brown как «темный» или «тусклый». В 1997 году были открыты два первых изолированных коричневых карлика (Kelu-1 и DENIS-PJ1228-1547). Их масса составляла примерно 1/100 массы Солнца, температура поверхности ≈ 1400 К.

Казалось бы, цепь замкнулась: Солнце - коричневый карлик - Юпитер. Однако препятствием здесь является убеждение в том, что Юпитер, это холодная планета, в центре которой находится твердый водород. Это общее убеждение даже не подвергается капли сомнения, несмотря на то, что ещё космические аппараты "Пионер Х" и "Пионер

XI” обнаружили мощное тепловое излучение, исходящее из планеты Юпитер, значительно превышающее тепловое излучение Солнца на орбите Юпитера. Кроме этого, гравитационное поле Юпитера симметрично и соответствует по своему характеру гравитационному полю газового шара. Несколько лет тому назад на страницах популярных журналов широко дискутировался вопрос о том, что представляет собой Юпитер, планету или звезду. Аналогичные наблюдения были сделаны космическими аппаратами и в окрестности Сатурна и Урана. И там тоже было обнаружено мощное тепловое излучение, превышающее по интенсивности Солнечное на их орбитах. Тем не менее, общепринятая модель внешних планет признает их холодными телами, содержащими твердый водород во внутреннем ядре, и жидкий водород в ядре внешнем. Именно в этом, жидководородном ядре, согласно холодной модели, происходит генерация магнитного поля за счет возбуждения динамо-эффекта. Таким образом, наличие “коричневых карликов” продолжает логичную последовательность “недоросших” звезд. В то же время холодные планеты, с массой, меньшей, чем у “карликов” всего в 10 раз, эту последовательность - разрушают.

Согласно развиваемой здесь модели, такая последовательность, включающая звезды, планеты и спутники, должна иметь место, хотя она, естественно, является неким, достаточно грубым приближением. Эта последовательность не учитывает многих аспектов и особенностей, среди которых, например, различия в светимости между одновозрастными звездами, обладающими одинаковыми массами и т.д. Рисунок 8-5 показывает зависимость логарифма температуры звезды, планеты, спутника от логарифма их массы. Как следует из этого рисунка, спутники, планеты и “коричневые карлики” (инфракрасные звезды), все они являются продолжением Главной последовательности звезд. Как тут еще раз не вспомнить Мак-Крея, с его идеей относительно того, что звезды и планеты (добавим: и спутники, и инфракрасные звезды) “проходят один путь”. Все их различия определяются только количеством вещества, участвующего в процессе. Именно оно определяет главную характеристику объекта - его температуру.

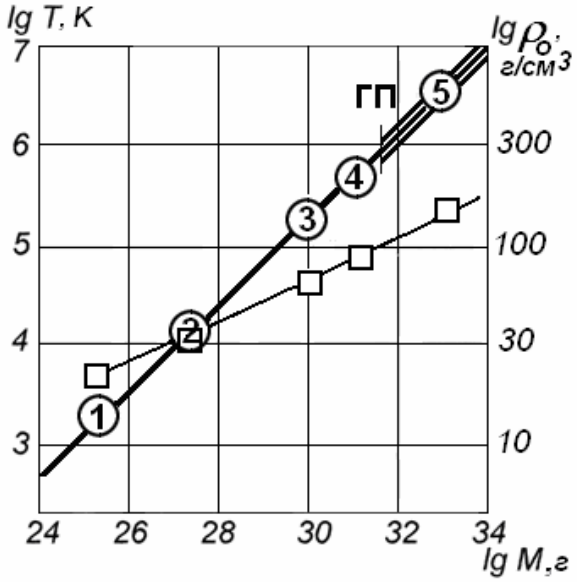


Рис. 8-5. Температура *T* образования звезд (Солнце - 5), Коричневого Карлика (4), Юпитера (3), Земли (2) и Луны (1) как функция их массы *M*. Плотность центральной части тел (квадраты) в момент их образования.

Под температурой (*T*, рис. 8-5) мы понимаем температуру центральной части звезды, планеты, спутника. Такой температурой обладало вещество космического тела в момент образования. За время эволюции Солнечной системы эта температура сохранилась

(несколько уменьшившись) лишь в центральной части тела. Величину температуры оцениваем по формуле: $T \approx 3/5 \times GM/Rc_p$, где c_p - теплоемкость вещества, G - гравитационная постоянная, R - радиус космического тела. В первом (грубом) приближении, можно считать теплоемкость и плотность вещества примерно постоянными для всех объектов, тогда выявляется простая зависимость температуры от величины массы вещества звезды, планеты, спутника: $T \sim M^{2/3}$. В эту зависимость включены звезды «Главной последовательности», "Коричневые карлики", планеты и их семь "больших" спутников. Заметим, что реально величина c_p увеличивается с ростом температуры, поэтому оценки температуры по этой формуле несколько завышены.

Зависимость подобную ($T \sim M^{2/3}$) для звезд Главной последовательности можно получить (Кузнецов, 1984), если сопоставить два графика из книги Чандрасекара (1950). На одном из них приведена зависимость светимости (в относительных единицах) от температуры T, а на втором - светимость от массы звезды M. Сопоставляя данные этих графиков, можно получить примерно: $T \sim M^{2/3}$. (В предположении, что температура поверхности звезды однозначно связана с температурой её ядра).

Обратим внимание на закономерность Солнечной системы: все тела в ней, размером от Солнца до спутника Юпитера - Европа, обладают сферической формой. Гравитационный потенциал GM/R Европы примерно равен 2 кДж/г, что при "разумной" величине теплоемкости c_p = 0.3 кал/г. град определяет температуру её вещества порядка 1.5×10^3 К. Все остальные космические тела (включая астероиды и спутники), обладающие массой, меньшей, чем у Европы, сферической формы не имеют и, по-видимому, фазы полного плавления "не проходили". Примем теплоту фазового перехода испарения (конденсации) для окиси кремния, как основного "строительного" материала планет земного типа, равной $U_и$ = 15 кДж/г, а величину теплоты плавления (кристаллизации) $U_п$ = 1 кДж/г. Космические тела Солнечной системы можно условно разделить на три класса. К первому, отнесем те, у которых $GM/R < U_п$, ко второму: $U_п < GM/R < U_и$ и к третьему те объекты, у которых $GM/R > U_и$. Малые спутники и астероиды отнесем к первому классу, ко второму, - большие спутники и маленькие (меньше Венеры) планеты и, к третьему, - планеты с массой, большей, чем у Венеры.

Таблица 8.4
Масса, радиус, гравитационная энергия и давление в центре Земли, планет и спутников.

		$M/M_{Земли}$	$R/R_{Земли}$	$E/E_{Земли}$	$p/p_{Земли}$	$E/U_п$ ($U_и$)
1	Титания	7×10^{-4}	0,08	7×10^{-3}	–	0.2
2	Европа	8×10^{-3}	0,23	0,034	0,015	1.2
3	Ио, Луна	$1{,}2 \times 10^{-2}$	0,26	0,038	0,026	1.3
4	Ганимед	$2{,}5 \times 10^{-2}$	0,4	0,06	0,04	1.4
5	Меркурий	$5{,}5 \times 10^{-2}$	0,375	0,14	0,13	4.2
6	Марс	10^{-1}	0,53	0,19	0,14	6.0
7	Венера	0,815	0,93	0,85	0,76	1.7
8	Земля	1 (6×10^{27} г)	1($6{,}4 \times 10^8$ см)	1 (30 кДж/г)	1(3,6 Мбар)	2.0
9	Уран	14,5	3,8	3,77	1,11	7.5
10	Нептун	17,2	3,9	4,35	2,34	8.7
11	Сатурн	95	9,4	10	1,4	20.0
12	Юпитер	317	11,14	28,3	7,03	57.0

Можно ли обосновать принятые нами величины теплоты плавления U_1 и теплоты конденсации U_2? Постараемся это сделать на известном материале из астрономии. Наименьшее космическое тело, обладающее шарообразной формой – Европа, наибольшее

тело, не имеющее такой формы – Титания. Их массы различаются примерно в 10 раз, а размеры всего в три раза. По-видимому, удельная энергия равна теплоте плавления для космического тела промежуточного размера. Такое тело должно иметь примерно: $M \approx 2\times10^{25}$ г и $R \approx 10^{8}$ см., а GM/R = 1кДж/г. Согласно нашей модели, Земля в момент образования полностью прошла газообразную стадию. Критерий полного испарения (Зельдович, Райзер, 1966) требует выполнения условия: $GM/R = 2\ U_и$, отсюда (см. таблицу 8.4) U_u = 15 кДж/г.

С точки зрения модели горячей Земли проблема сферической формы у крупных спутников и несферической, - у более мелких спутников и астероидов решается очень просто. Совсем не так обстоят дела с её решением в модели холодной Земли. Сошлемся на работу Слюты и Воропаева (1998), посвященной этой проблеме. Эти авторы считают, что наблюдаемый резкий переход между малыми телами с неправильной угловатой фигурой и планетными телами, обладающими сфероидальной фигурой, обусловлен пределом текучести вещества при низких температурах как силикатных, так и ледяных тел Солнечной системы. Величина дифференциальных напряжений, способных превысить предел текучести, определяется массой тела. Предел текучести, согласно модели авторов, зависит от температуры, которая различается на разных расстояниях от Солнца. Величина предела упругости определяет величину критической массы, выше которой космическое тело становится сфероидальным. Так, например, радиус железного тела, обладающего критической массой в районе пояса астероидов (T = 200 - 300 К) будет иметь 260 км, а в области системы Сатурна (T = 70 - 80 К), уже 340 км. (Надо заметить, что авторами предложено весьма не простое и не очень убедительное объяснение очевидного факта).

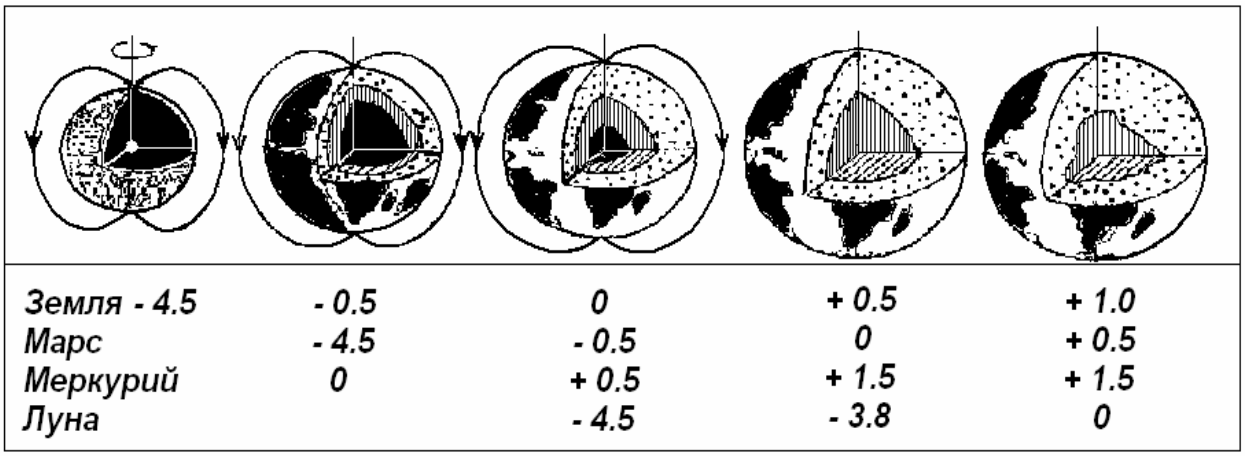


Рис. 8-6. Внутреннее строение Земли, Марса, Меркурия и Луны на различных этапах эволюции.

Сколько воды на Луне и Марсе? Наша модель позволяет более или менее строго ответить на этот вопрос, который в последнее время стал очень популярным в связи с успехами и достижениями в изучении космических тел Солнечной системы, полученными с помощью космических аппаратов. Согласно нашей модели горячей Земли (подробнее в третьей и последующих главах), её эволюция связана с образованием кристаллической мантии. Именно этот процесс происходит с образованием воды мирового океана. Отношение количества воды на Земле к массе мантии равно примерно $k = 3.5\times10^{-4}$. Будем считать, что он сохраняется таким же и для других планет и спутников Солнечной системы. Будем считать (приближенно), что вся энергия планеты GM^2/R пошла на плавление и частичное испарение массы M_o от полной массы планеты M. (Такая ситуация имела место с планетами и спутниками обладающими массой, меньшей чем у Венеры):

$$GM^2/R = M\,U_п + M_о\,2U_и,$$

Отсюда масса воды $M_В$:

$$M_В = kM/2U_и\,(GM/R - U_п)$$

Цифры, приведенные в правом столбце таблицы 8.4, позволяют оценить часть вещества планеты (спутника), которая находилась в момент образования в газообразном (солнечном) состоянии ($M_о$). В процессе эволюции это вещество сначала конденсировалось, затем кристаллизовалось, а при кристаллизации выделилась вода. Мы полагаем, что вещество, находящееся в расплавленном состоянии в момент образования планеты (спутника) воду, как и другие летучие, «потеряло». Цифры, расположенные в левой части правого столбца, показывают отношение удельной гравитационной энергии спутника (планеты) к теплоте испарения. Если это число больше 1, то оставшаяся (после вычитания 1) часть показывает, сколько вещества оказалось в газообразном состоянии. Например, отношение $E/U_п$ для Марса равно 6 (см табл.). Это означает, что 5 $U_п$ гравитационной энергии Марса пошло на испарение. Теплота испарения больше, чем теплота плавления примерно в 15 раз. Значит, фактически испарилось $5U_п/U_и = 1/3$ массы Марса (2×10^{26} г). Учитывая коэффициент $k = 3.5\times10^{-4}$, на который необходимо умножить величину испарившейся массы планеты ($M_о$), количество воды на Марсе не должно превышать 10^{22} г, а на Луне воды должно быть примерно в сто раз меньше (5×10^{20} г). Аналогично можно оценить количество воды, выделившейся на Меркурии, однако там процесс релаксации вещества внутреннего газообразного ядра ещё не окончился (на Меркурии ещё существует магнитное дипольное поле), поэтому можно назвать только приближенное количество воды: 2×10^{22} г.

17. 4. Другие планетные системы.

В ноябре 1999 года в некоторых газетах появилось сенсационное сообщение относительно того, что астрономам удалось впервые увидеть (прямым методом) вращение планеты вокруг звезды HD209458 в созвездии Пегас. Яркость этой звезды уменьшалась при прохождении планеты по её диску примерно на 1.7 %. Затмение позволило оценить размер далекой планеты. Звезда HD209458 находится от нас на расстоянии в 153 световых года.

До этого времени астрономам было известно о существовании более чем 20 планет у различных звезд. Все эти планеты были вычислены с использованием т.н. косвенного метода, по доплеровскому смещению. Кстати, в 1995 году в том же созвездии Пегас была вычислена планета, обращающаяся вокруг звезды «51 – Пегас».

Прямой метод прост по постановке, однако, сложен по исполнению. Дело в том, что излучение планеты «меркнет» в лучах более яркой «родительской» звезды. Косвенные методы включают в себя тщательное наблюдение за звездой для того, чтобы обнаружить гравитационное влияние на неё, обращающейся вокруг звезды планетой (Блэк, 1991). Когда планета перемещается по орбите, она «тянет» звезду то в одну, то в другую сторону. Эти гравитационные возмущения проявляются в слабых колебаниях звезды, накладывающихся на её траекторию движения. Они могут быть зарегистрированы как периодические изменения скорости дрейфа звезды по регистрации эффекта Доплера. К примеру, если бы какой-либо астроном следил за Солнцем с другой звездной системы, то он зафиксировал бы основное колебание нашей звезды на орбите, с периодом обращения Юпитера в 11.5 лет.

Среди звезд, у которых искали планетные системы, наиболее известная, это звезда Барнарда. Эта звезда быстрее других перемещается по небу и находится сравнительно недалеко от Солнца (6 световых лет). Примерно к 1960 году после почти 45-летнего периода наблюдений за этой звездой было вычислено, что на её орбите вращаются две планеты, размером примерно с Юпитер, с периодами обращения 12 и 24 года. Другим широко известным объектом с субзвездной массой стал открытый в 1984 году спутник

соседней с Солнцем звезды Ван Бисбрук 8, получивший обозначение VB8-b. Его масса составляла примерно 1/20 от массы Солнца. Именно этот объект был первым обнаруженным коричневым карликом. В настоящее время можно утверждать, что не существует непрерывного ряда объектов, заполняющих промежуток между звездами и планетами

Вернемся к обсуждению двух загадок из тех, о которых шла речь в главе 7. Эти наблюдения, по мнению многих астрономов, заставляют пересматривать свои взгляды на проблему образования Солнечной системы и, вообще, на устройство Мира. В первом случае, вопрос заключается в том, как же смогли сформироваться планеты вблизи звезды, когда и сама звезда и далекие планеты ещё находятся в стадии образования, Суть второго вопроса: «как же смог сформироваться столь массивный и плотный мир в такой необычайно близости от своей звезды»? Речь идет о наблюдении планеты CoRoT-Exo-3b, плотность которой достигает 45 г/см^3. Обе загадки ранее обсуждались в Главе 7 и показаны на рис. 7-3.

Астрономы из США, Мексики и Венесуэлы нашли две звезды, которые, не успев ещё полностью сформироваться, уже обзавелись целыми семьями планет. Считается, что это самые молодые планетные системы, известные к настоящему времени (рис. 7-3, слева). Ситуация изображенная на этом рисунке повторяет ситуацию, следующую из нашей модели (рис.7-3), когда планеты 6–9 (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) ещё формировались, планеты 1-4 были уже созданы, а звезда (Солнце) в это время ещё находилось в стадии формирования (её масса равна площади заштрихованного треугольника). Формирование планет 1-9 началось одновременно с формированием звезды, однако, произошла бифуркация и часть вещества, «принадлежащего» планетам 1-5, было «отобрано» звездой. Именно эта ситуация отражена на левом рис. 7-3.

Спутник CoRoT нашёл сразу несколько внесолнечных планет и, среди них, - загадочный тёмный объект неизвестной природы. Его масса в 50 раз меньше, чем у Солнца, а плотность в 4 раза больше, чем у свинца. Для бурых карликов – объектов промежуточных между планетами и звёздами масс – это слишком плотно, и, возможно, астрономам придётся переписать их теорию.

Приведем параметры планеты CoRoT-Exo-3b (далее, С) и определим «отношение» к такому объекту нашей модели образования Солнечной системы: масса Mс = $4\cdot10^{31}$ г, радиус Rс = Rю = 610^9 см, расстояние от звезды до С: r = 7.5 млн. км (что составляет 0.05 АЕ). Масса звезды немного больше массы Солнца. Для грубой оценки, массы звезд будем считать равными.

Объект С обращается вокруг звезды за 4,25 земных дня по почти круговой орбите радиусом около 7,5 миллиона километров и при массе 20,2 масс Юпитера (около 2% солнечной) имеет диаметр лишь около 0,8–0,9 юпитерианских. Средняя температура поверхности CoRoT-Exo-3b при такой близости к центральной звезде должна быть около 2 200 градусов по шкале Цельсия – если, конечно, у него нет внутренних источников энергии.

Гравитационный потенциал GM/R планеты С: GM/R = $6\cdot10^{-8}$ $4\cdot10^{31}/6\cdot10^9 = 4\cdot10^{14}$ см^{2}с$^{-2}$. GM/R звезды на расстоянии r до планеты С: GM/R = $6\cdot10^{-8}$ $4\cdot10^{31}/7.5\cdot10^{11} = 3.2\cdot10^{14}$ см^{2}с$^{-2}$. Отсюда следует, что звезда, если бифуркация произошла вблизи планеты С, могла «снести» её газовую компоненту и, в этом случае, у такой звезды крупных планет (типа Юпитера) - быть не может, чего, собственно, и не наблюдается. На рис. 8-3 эта ситуация отображена треугольником, находящимся в непосредственной близости от S (Солнца). Начальная плотность такого объекта может быть равна плотности центральной части Коричневого карлика (рис. 8-5) и могла достигать в момент образования 80 г/см^3. В процессе эволюции такая «планета» остывает, расширяется и её плотность уменьшается и достигает величины 45 г/см^3.

Наша модель позволяет оценить и то, что бы могло произойти, если бы бифуркация произошла не в районе пояса астероидов, а вблизи Меркурия. Расстояние Меркурия до Солнца r = 58.5 млн. км, GMм/Rм = $6 \cdot 10^{-8}$ Мм/Rм. Положим, что начальная плотность Меркурия была 45 г/см^3. Примем условие бифуркации в области Меркурия: GM/R Солнца ≥ GM/R Меркурия = GM/R = $6 \cdot 10^{-8}$ $2 \cdot 10^{33}/5.8 \cdot 10^{13} = 210^{13}$ см^{2}с$^{-2}$. Можно оценить массу Меркурия до бифуркации Мм$^{2/3} = 2 \cdot 10^{21}$, или: Мм = $9 \cdot 10^{32}$ г, что больше массы Меркурия ($3 \cdot 10^{26}$) в $3 \cdot 10^6$раз.

Эта ситуация отражена на рис. 8-3 положением прямоугольника на орбите Меркурия (1). Плотность этого объекта примерно на 6 порядков больше плотности Меркурия.

8. 5. ***Обсуждение модели.***

Обратимся к физике самоорганизации. Как известно, открытая система самоорганизуется в том случае, если в системе сосуществуют два процесса: диффузии и переноса (перколяции). Как отмечалось, в основе нашей модели образования Солнечной системы положено взаимодействие двух механизмов. Во-первых, это генерация и распространение волн плотности вдоль протосолнечного диска от его центра к периферии. Этот механизм приводит к образованию сгущений материи в пучностях волн. Здесь, в дальнейшем, начинается гравитационное самосжатие вещества. Во-вторых, это перенос вещества от периферии диска к образующейся в его центре звезде – Солнцу. Чем эффективнее происходит взаимодействие этих механизмов друг с другом, тем эффективнее самоорганизация, и тем ниже параметр D. Параметр D оказался ниже в области внутренних планет. Этот факт говорит о том, что процесс их образования проходил в более «комфортных» условиях, чем у больших газообразных планет. То, что этот параметр плавно меняется от D = 1.75 до D = 2.6, - показывает, что все планеты Солнечной системы образовались в едином процессе. Уменьшение плотности потока переноса массы с увеличением расстояния от Солнца очевидно, По-видимому, именно этот факт был определяющим в том, что D возрастает с ростом R. То, что масса вещества, «отнятого» у планет земного типа, точно равна массе Солнца, - так же говорит в пользу того, что планеты образовались в одном сценарии образования звезды.

Заметим, что используемое нами понятие самогравитации (самосжатия) не имеет четкого и однозначного толкования. В теории звездообразования Линя и Шу (Lin, et al., 1969; Roberts, 1969) используется понятие самогравитации, как единственный способ образования звезды в тех областях пространства, куда приходится пучность галактической волны плотности. Очевидно, что для начала процесса самогравитации необходимо выполнение условия критерия Джинса. Однако совершенно не ясно, что может произойти, если процесс самогравитации уже начался, а в силу изменившихся обстоятельств, - количество вещества стало уменьшаться, например, за счет выноса его к образующемуся Солнцу. Если предположить, что процесс самогравитации уже начался, и он начался с формирования железно-каменного ядра (принято считать, что у Юпитера и других планет гигантов, именно такое ядро), и он в любом случае прерваться не может, то наша модель оказывается вполне правдоподобной.

Обсуждая модель образования Земли и всей Солнечной системы из одного материала, мы не касались проблемы, состоящей в том, как может образоваться твердая силикатная Земля из газообразного облака. Эта проблема рассмотрена в рамках разрабатываемой модели горячей Земли (Кузнецов, 1990, 1998). Согласно модели, во внутреннем ядре Земли находится то же самое вещество, из которого образовались Солнце и планеты, как большие, так и маленькие. Другие оболочки Земли состоят из этого же вещества в конденсированном (жидком и кристаллическом) состоянии, причем,

именно в той же самой пропорции, что и на Солнце, за вычетом легких газов (водорода, кислорода, азота и др.).

Заметим, что наша модель образования Солнечной системы не учитывает эффектов вращения протосолнечной туманности и образовавшихся из неё Солнца и планет, сохранивших как вращение в плоскости эклиптики, так и приобретших собственное вращение вокруг оси. Причина состоит в том, что до сих пор нет понимания, почему все гравитирующие тела, от спутника до Вселенной, - вращаются? Очевидно, что вращение, - это фундаментальное свойство природы, однако, ясного понимания этого феномена пока нет. Учет приливных сил в модели конечно возможен, но это только усложнит модель и не даст принципиальных отличий от рассматриваемой нами ключевой идеи образования Солнечной системы. Как показано в (Votyakov, et al., 2002), медленное вращение вещества не дает заметного вклада в процесс самогравитации.

Выше мы не останавливались на таком вопросе, который может возникнуть в ходе обсуждения модели образования Солнечной системы. Вопрос состоит в том, может ли поток вещества от точки бифуркации, - к Солнцу, взаимодействуя (соударяясь) с планетой, двигающейся по своей орбите, изменить эту орбиту. Легко показать, что этого случиться не может. Докажем это на простой оценке, которую проведем для Меркурия. Почему выбран именно Меркурий? С одной стороны, это самая маленькая планета, которую проще всего «сбить» с орбиты, с другой, на неё действует самый большой поток вещества. Если окажется, что отношение импульсов $Mv/mV_m >> 1$ (орбитальный импульс значительно больше импульса бокового «удара»), то утверждение можно считать доказанным. Здесь M – масса Меркурия ($M \approx 3\times10^{26}$ г), v - орбитальная скорость ($v \approx 50$ км/с), m - масса потока, V_m – скорость падения вещества на орбите Меркурия ($V_m \approx 5$ км/с). На рис. 8-3 показано, что, полная масса потока пропорциональна площади треугольника: от точки 6 до линии 1 1', которая должна составлять примерно $10^{-5}\ M_{\odot}$. (Как было показано выше, площадь всего треугольника равна $M_{\odot}$). Выясним, какая же часть потока от $10^{-5}M_{\odot}$. может попасть на Меркурий. Для этого необходимо задаться толщиной протосолнечного диска H. Примем, что толщина H равна диаметру протосолнца на момент бифуркации H = 5 млн. км. Тогда часть потока, попадавшего на Меркурий равна отношению площади его поверхности (πr^2_M) и площади сечения потока ($2\pi R_1 \times H$), где R_1 – радиус орбиты Меркурия ($R_1 \approx 60$ млн. км). Здесь r_M – радиус планеты Меркурий ($r_M \approx 2.4$ тыс. км). Это составляет $\approx 10^{-8}$ потока. Отношение импульсов $Mv/mV_m \approx 10^7$, значительно больше 1, что и требовалось доказать.

Несмотря на эту оценку, показывающую малый вклад потока в орбитальное движение планет земной группы, именно этот поток при взаимодействии его с волновым механизмом, приводит к «корректировке» орбит этих планет таким образом, что фрактальная размерность этой системы уменьшается, что свидетельствует о более высокой степени самоорганизации. По всей видимости, это взаимодействие основано не на упругом соударении частиц потока с планетой, а, скорее, на изменении параметров самого волнового процесса.

В заключение отметим, что наша модель решает все три проблемы, упомянутые в начале: 1. Юпитер, как и другие планеты-гиганты, – планета горячая. (Можно сделать предположение, что источником теплового потока Юпитера может быть, например, механизм рекомбинации ионизированного, в момент образования планеты, водорода). 2. Коричневые карлики, - естественные в природе образования, связующие звезды с газообразными планетами-гигантами. (Оценив внутреннюю температуру Коричневых карликов, можно предположить, что действующий в их недрах механизм состоит в синтезе водорода из протонов и нейтронов). 3. Оцененное время образования планет (для Земли примерно 10 000 лет) существенно меньше 1 млн. лет, что соответствует оценке Тропа (Throop, et al., 2001), и значительно меньше принятой оценки времени образования Земли равной 100 млн. лет.

И, наконец, согласно теореме Гёделя, которая утверждает, что полнота и непротиворечивость в рамках одной логической системы не сочетаются, модель образования Земли и всей Солнечной системы, претендуя на возможную полноту картины, не может не содержать некоторых неясностей и даже противоречий. Основная идея состоит в доказательстве, казалось бы, очевидного факта, что все элементы Солнечной системы (звезда, планеты и спутники) образовались одновременно и в едином процессе. Этот вывод неумолимо приводит к требованию пересмотра общепринятой системы взглядов на звезды, Коричневые карлики, большие и малые планеты и их спутники.

Литература

Блэк Д.Ч. Миры иных звезд. В мире науки. 1991. № 3. С. 44-51.

Боденхаймер П., Блейк Д.К. Численные расчеты протозвездного гидродинамического коллапса. В сб. Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. С. 321-360.

Босс А.П. Коллапс и образование звезд. В сб. В мире науки. 1985. № 3. С. 4-10.

Воронцов-Вельяминов Б.А. Лаплас. М.: Наука. 1985. 286 с.

Забродин А.В., Забродина Е.А., Легкоступов М.С., и др. Некоторые модели описания протопланетного диска Солнца на начальной стадии его эволюции. Препринт ИПМ им. Келдыша. М.: 2006.

Зедьдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966. 686 с.

Имхофф К.Л. Эволюция звезд типа Т-Тельца и аргументы в пользу образования планет. В сб. Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. С. 800-811.

Каплан С.А., Пикельнер С.Б. Физика межзвездной среды. М.: Наука. 1979. 474 с.

Клейтон Д. Межзвездные облака. В сб. Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. С.18-52.

Козырев Н.А. Внутреннее устройство Юпитера. Астрономический журнал. 1977. Т. 54. С. 372-377.

Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1984. 92 с.

Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 216 с.

Кузнецов В.В. Земля как термодинамическая система Геология и геофизика. 1998. Т. 39. С. 993-1013.

Ларсон Р.Б. Расчеты коллапса и образование Солнечной системы. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С. 107-117.

Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.

Мак-Крей У.Х. Происхождение Солнечной системы. Обзор концепций и теорий. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир, 1976, С. 12-38.

Ньето М.М. Закон Тициуса-Боде. М.: Мир. 1976. 96 с.

Острайкер Дж.П. Гидродинамика коллапса: вращение и сжатие В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С. 221-233.

Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. 568 с.

Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М:. Мир. 1982. 870 с.

Ривс Г. Представление моделей. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С. 51-86.

Седов Л.М. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука. 1981. 386 с.

Слюта Е.Н., Воропаев С.А. Наблюдаемый переход между малыми и планетными телами Солнечной системы: эффект критической массы. ДАН. 1998. Т. 358. № 4. С. 480-483.

Снытников В.Н., Пармон В.Н., Вшивков В.А. и др. Численное моделирование гравитационных систем многих тел с газом. Вычислительные технологии. 2002. Т.7, № 3, С.72-84.

Спитцер Л. мл. Физические процессы в межзвездной среде. М.: Мир. 1981. 350 с.

Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды, М.: Наука. 1971. 854 с.
Тер-Хаар Д. Некоторые замечания о теориях происхождения Солнечной системы из первоначальной солнечной туманности. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С.107-117.
Хартман У.К. На пути к современной теории образования планет. В сб. Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. С. 71-88.
Чандрасекар С. Введение в учение о строении звезд. М.: ИЛ. 1950. 256 с.
Шмидт О.Ю. Четыре лекции о происхождении Земли. М.-Л:. Изд-во АН СССР. 1949. 70 с.

Allard F. A very cool customer. Nature. 1995. V. 378. P. 441-442.
Boss A.P. Formation of gas and ice giant planets. Earth Planet. Sci. Lett. 2002. V. 202. P. 513 – 523.
Jeans J.H. Gravitational instability and the figure of the Earth. Roy. Soc. London Proc. A. 1916. V. 93. P. 413-417.
Lin C.C., Yuan C., Shu F. H., On the spiral structure of disk Galaxies. III. Comparison with observations. Astrophys. J. 1969. V. 155. P. 721-746.
Lissauer J. What is a Planet? SCIENCE Online. (www.sciencemag.org/cgi/content/full).
Nelson L.A. A bright future for faint stars. Nature. 1995. V. 377. P. 102-103.
Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman. New York. 1983.
McCaughrean M., Reid N., Tinney C., Kirkpatrick D., Hillenbrand L., Burgasser A., Gizis J., Hawley S. What is a Planet? Science. 2001. V. 291. P. 1487.
Rebolo R., Zapareto Osorio M. R., Martin E.L. Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster. Nature. 1995. V. 377. P. 129-131.
Roberts W.W. Large-scale shock formation in spiral galaxies and its implications on star formation. Astrophys. J. 1969. V. 158. P. 123 – 143.
Savage D., Clavin W. Astronomers discover planet building is Big Mess. 2004. (http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2004-17/release.shtml).
The Correspondence of Ysaac Newton. V.3. Cambridge: Univ. Press. 1961. P. 234.
Throop H.B., Bally J., Esposito L.W., Mc Caughrean M.J., Evidence for dust grain growth in young circumstellar disks. Science. 2001. V. 292. P. 1686-1689.
Votyakov E.V., Hidmi H.I., De Martino A., Gross D.H.E. Microcanonical mean-field thermodynamics of self-gravitation and rotating systems. Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 031101-1.

Глава. 09. Сейсмология и сейсмические методы.

В главе 9 рассмотрены: общие представления о сейсмологии, краткое описание катастрофических землетрясений, оценка интенсивности землетрясений. Описание сейсмографов, сейсмической службы, сейсмическая модель Земли, сейсмические волны и годограф. Функция Грина и уравнение Адамса-Вильямсона. Собственные колебания Земли, анизотропия скоростей и splitting-функции. Приводится взгляд на прогноз землетрясения.

9. 1. Сейсмология (Аки, Ричардс, 1983).

Сейсмология - это наука, в которой фактические данные представляют собой записи механических колебаний Земли, называемых сейсмограммами. Колебания могут быть вызваны искусственными взрывами или естественными причинами – землетрясениями и извержениями вулканов. Оба этих природных явления привлекали внимание человечества в течение многих веков, и даже сегодня они вызывают наравне с научным интересом чувство мистического страха.

Огромный прогресс, достигнутый сейсмологией в течение 100 лет, был стимулирован главным образом получением постоянно улучшающихся данных. Наиболее важные шаги в этом направлении были сделаны учеными, хорошо владеющими методами математической физики. Каждое поколение сейсмологов продвигалось к получению количественных данных, преодолевая барьеры на пути расчетов сначала с помощью механических калькуляторов, а в последнее время благодаря достижениям в области цифровых микропроцессоров. В течение прошедших двух десятилетий электронно-вычислительные машины стали достаточно эффективны, чтобы с их помощью извлекать большую долю информации, содержащейся в сейсмограммах. Таким образом, количественная картина современной сейсмологии складывается из тесного взаимодействия высококачественного исходного материала, детальных механизмов источников сейсмических волн и моделей внутреннего строения Земли.

Результаты современной сейсмологии используются в инженерном деле для проектирования сейсмостойких сооружений, в разведке полезных ископаемых и при поиске месторождений нефти и природного газа. Другая область использования сейсмологических данных связана с важнейшими политическими, экономическими и социальными проблемами, касающимися обнаружения ядерных взрывов (и распознаванием их среди естественных землетрясений). А также, и с сокращением возможного сейсмического риска, путем выявления сейсмически опасных участков при строительстве крупных промышленных сооружений и плотин. Принято считать, что в самое последнее время сейсмология достигла такого уровня развития, что надежный прогноз землетрясений становится доступной целью обозримого будущего. Острая необходимость развивать этот последний аспект исследований ясна уже из упоминания некоторых фактов: более 240 тысяч человек погибло при землетрясении 28 июля 1976 г. в Китайской Народной Республике; стоимость ущерба, нанесенного 4 февраля 1976 г. в Гвадемале, сравнима с годовым валовым национальным продуктом этой страны; даже сравнительно слабое землетрясение 9 февраля 1971 г. в Сан-Фернандо, Калифорния, вызвало убытки на сумму более 550 миллионов долларов. Подобные цифры делают надежное прогнозирование землетрясений столь важным, что в ближайшее десятилетие сам предмет сейсмологии, вероятно, претерпит значительные изменения и значимость его возрастет, подобно тому как она выросла в 60-е годы в ответ на необходимость контролировать любое соглашение о запрещении испытаний ядерного оружия, которое могло быть заключено между США и СССР. (Первая глобальная сеть калиброванных сейсмографов, а также несколько групп станций с большой апертурой были созданы

первоначально для того, чтобы улучшить возможности обнаружения и распознавания подземных ядерных взрывов по данным сейсмологии).

Сейсмология занимает особое место во всем спектре наук о Земле. Прежде всего, она имеет дело только с механическими свойствами и динамикой процессов в Земле. Во-вторых, она предлагает инструмент, с помощью которого можно изучать внутреннее строение Земли до самых больших глубин и с большей разрешающей способностью и надежностью, чем можно достичь в любой другой области геофизики. Высокая разрешающая способность и надежность достижимы по той причине, что из всех типов волн, которые могут наблюдаться после ослабления при прохождении через различные структуры внутри Земли, сейсмические волны являются наиболее короткими. Они подвержены наименьшим искажениям формы и наименьшему затуханию амплитуд по сравнению с другими объектами геофизических наблюдений, как, например, тепловой поток, статическое смещение, деформация, сила тяжести или электромагнитные поля.

Третьей отличительной особенностью сейсмологии является то, что она позволяет нам узнать *современное* состояние недр Земли. Сейсмология привлекает непосредственный интерес общества благодаря тому, что она нацелена на изучение тектонической активности, протекающей в *настоящее* время.

Рис. 9-1. Сравнение энергий землетрясений, потребления электроэнергии и ядерных взрывов.

Методы сейсмологии, подобно другим геофизическим методам, применимы в громадном диапазоне масштабов. Эти масштабы можно классифицировать по размерам сейсмических источников (как искусственных, так и естественных) и по размерам сейсмологической сети наблюдений. Взрывные заряды, применимые при сейсмологических наблюдениях, варьируют по величине от менее одного грамма до более одной мегатонны (диапазон 10^{12}). Диапазон вариации энергии землетрясений ещё больше:

от самых слабых микроземлетрясений, - до таких грандиозных событий, как Чилийское землетрясение 22 мая 1960 г. Он достигает множителя примерно 10^{18} по силе эквивалентного точечного источника (сейсмическому моменту). Линейные размеры сети сейсмографов меняются от десятков метров при исследовании оснований промышленных сооружений до 10 000 км у глобальной сети сейсмических станций, т.е. в 10^6 раз.

Интерпретация сейсмограмм развивалась обычным в науке путем, начиная с исходных догадок, которые позднее подтверждались или контролировались проверкой их соответствия новым данным. Мы упростим задачу интерпретации сейсмограмм, искусственно отделяя влияние источника от влияния среды. Исторически наши знания об источниках сейсмических волн и о строении Земли как среды, в которой эти волны распространяются, развивались способом «качелей». Например, на некоторой стадии источник может быть лучше изучен, чем среда, - в этом случае новые данные используются для уточнения знаний о среде в предположении, что источник известен. На следующей стадии новые данные объединяют с уточненными знаниями о среде, чтобы пересмотреть первоначальные знания об источнике.

В сейсмологии, как и во всех остальных областях геофизики, влияние источника и влияние среды тесно связаны между собой. Двойная ошибка – одна относительно источника и другая в отношении среды – может привести к результату, согласующемуся с наблюдениями. Требуется глубоко понимать физические принципы, чтобы не соблазниться видимым соответствием. Поучительным примером такой двойной ошибки служит история идентификации *P*- и *S*-волн. На заре сейсмологии велись споры о том, которые из волн – сжатия или сдвига вызывают основное смещение в случае локального землетрясения. Основное смещение было вызвано *S*-фазой, потому что оно наблюдалось вторым (*second*) и следовало за более слабой *P*-фазой, названной потому, что она вступала первой (*prime*). В 1906 г. Ф. Омори, основоположник сейсмологии в Японии, исследовал эту проблему, используя сейсмограммы одного землетрясения, записанные с помощью лучшей в то время местной сети станций. Пользуясь своими формулами, связывающими время между вступлениями *P*- и *S*-волн с расстоянием между сейсмографом и эпицентром землетрясения, а также зная относительные времена вступления волн по данным нескольких станций, он определил, что эпицентр расположен примерно в 500 км южнее острова Хонсю. Затем он обнаружил, что движение частиц у *S*-фазы имеет преобладающее направление север-юг, т.е. казалось очевидным, что *S*-фаза продольно поляризована. Если бы при этом он принял, что *S*-фаза должна быть сдвиговой волной, в которой частицы смещаются по перпендикуляру к направлению распространения, тогда он смог бы правильно поместить очаг землетрясения на глубину около 500 км под островом Хонсю и тем самым разрешить наблюдавшееся несоответствие. Вместо этого он сделал ошибочный вывод, что *S*-фаза не представляет собой сдвиговых волн. Действительно, эта двойная ошибка не противоречила господствующим тогда представлениям об очагах землетрясений и сейсмических волнах. В то время уже достаточно хорошо была известна концепция изостазии, которая использовалась при объяснении гравитационных наблюдений, и никто не предполагал, что очаги землетрясений могут существовать глубоко внутри зоны, которая считалась тогда пластичной. Вывод по поводу *S*-фазы находился в согласии также с так называемой доктриной Маллета, по которой считалось, что основное смещение в эпицентральной области вызвано продольными волнами. Роберт Маллет (который, кстати, первым измерил скорость сейсмических волн в полевых условиях при использовании взрывчатых веществ) пришел к этому выводу на основе проведенного им первого научного полевого исследования сооружений, поврежденных землетрясением, в эпицентральной области Неаполитанского землетрясения 1857 г.

В 1906 г. было хорошо известно существование волн сжатия и волн сдвига в твердом веществе. Со времен открытия закона Гука в 1660 г. основными достижениями в

теории упругости можно считать проведенные в 1821 г. Навье исследования общего уравнения равновесия колебаний, а также эксперименты Френеля, показавшие, что свет состоит из поперечно-поляризованных волн, проходящих через эфир. До этих экспериментов обычно считалось, что в безграничной сплошной среде могут распространяться только продольные волны. Успехи в теории распространения упругих волн были достигнуты благодаря исследованиям Коши (который к 1822 г. развил концепцию шести независимых компонент деформации) и Пуассона (который использовал ньютоновское представление о межмолекулярных силах в твердом веществе и предположил, что сила притяжения между любой парой молекул пропорциональна отклонению от их положения равновесия). Пуассон обнаружил два типа волн, которые мы знаем теперь как *P* и *S*, и на основе принятой им частной модели сделал вывод, что скорость *P*-волн в √3 раз больше скорости *S*-волн. Общую теорию дал Грин, который ввел функцию упругой энергии для произвольно анизотропного тела с 21 независимым коэффициентом. Для изотропного тела число коэффициентов сводилось к двум.

В введении к своему классическому учебнику (вышедшему в 1892 г. и переизданному в 1944 г.) Ляв дал блестящий исторический обзор развития теории упругости. Что касается ранней истории наблюдательной сейсмологии, то она хорошо описана Дьюи и Байкрли.

Объяснение рэлеевских волн, которые могут распространяться вдоль свободной поверхности упругого тела, было дано позже получения первой записи волн землетрясений. Первая теоретическая сейсмограмма была рассчитана Лэмбом для точечного импульсного источника, помещенного в однородное полупространство. Рассчитанная на поверхности сейсмограмма состоит из последовательности трех импульсов, соответствующих *P*-, *S*- и рэлеевской волнам, и она гораздо проще наблюдаемых записей.

Когда в начале 80-х годов XIX-века были записаны первые сейсмограммы землетрясений, сейсмологи поразились, почему колебания длятся так долго. Дело в том, что рэлеевские волны обладают свойством дисперсии (поэтому волны, имеющие различную частоту, распространяются с разной скоростью), и это является одной из причин длительных колебаний. Но, кроме того, наблюдаются колебания после вступления *P*- и *S*-волн и перед приходом поверхностных (например, рэлеевских) волн. Джеффрис изучил и отверг множество объяснений, сделав вывод, что «единственное предположение, которое выдерживает критику, состоит в том, что колебания вызваны отражениями первоначального импульса внутри поверхностных слоев». В 1969 г., когда была получена первая сейсмограмма с Луны, сейсмологи снова были поражены большой длительностью интервала времени, в течение которого продолжались колебания. И снова объяснение, вероятнее всего, лежит в рассеянии волн на неоднородностях.

Приложение методов Лэмба к реальным землетрясениям и взрывам внутри Земли пришлось отложить приблизительно до 1960 г., когда благодаря работам Беньоффа, М. Юинга, Ф. Пресса и других стали доступны высококачественные записи длиннопериодных сейсмических волн. Длиннопериодные волны усредняют мелкомасштабные неоднородности Земли, и в этом случае Земля ведет себя как эквивалентное однородное тело. Процесс в очаге землетрясения также проще для длинных периодов. По этой причине чрезвычайно простая модель задачи Лэмба может принести практическую пользу при интерпретации сейсмограмм длиннопериодных волн.

9. 2. Катастрофические землетрясения (Трухин и др. 2005).

Ежегодно на Земле сейсмографы фиксируют более 100 тысяч землетрясений. Из них людьми ощущаются около 10 тысяч и разрушительными бывают около 100 землетрясений. Эти подземные бури наносят большой ущерб жизнедеятельности и приводят к огромным человеческим жертвам. В то же время геофизикам они дают

возможность достаточно детально изучать внутреннее строение Земли. При этом одной из важнейших целей геофизических исследований является предсказание времени и места предстоящих землетрясений. В случае решения этой сложнейшей проблемы появилась бы возможность своевременного предупреждения населения о предстоящем землетрясении, что позволило бы уменьшить до минимума или исключить вовсе гибель людей.

Обратим внимание на наиболее крупные, катастрофические землетрясения, происшедшие во II тысячелетии.

Извержению вулкана Везувий в Италии 24 августа 79 г. предшествовала серия продолжительных землетрясений, в результате которых разрушались храмы, гибли люди. Во время извержения вулкана полностью погибли города Помпея и Геркуланум. Одним из самых разрушительных землетрясений за
всю историю человечества является землетрясение на Среднем Востоке, происшедшее в 1201-1202 гг. Оно ощущалось на площади 2 млн. км2, включая Египет, Сирию, Малую Азию, Сицилию, Армению, Азербайджан. По данным историков погибло
более 1 млн. человек.

В русских летописях упоминается о сильном землетрясении 1230 года, которое захватило Киев, Переяславль, Владимир, Новгород. В Киево-Печерской лавре церковь Пресвятой Богородицы распалась на четыре части, рухнула трапезная. В Переяславле церковь св. Михаила распалась на две части. О человеческих жертвах не сообщается. В Китае катастрофическое землетрясение с магнитудой M = 8,0 произошло в 1556 г. в провинции Сиань, расположенной на берегу реки Хуанхэ, где равнины наполнены рыхлыми осадками. По данным историков целые города погружались в грунт, разжиженный вследствие сейсмических колебаний. Землетрясение произошло в 5 часов утра, и число жертв было огромно - около 830 тыс. человек.

В Китае 28 июля 1976 г. под городом Таншан произошло одно из самых крупных землетрясений XX столетия. Землетрясение имело магнитуду 8,2, его разрушительная энергия была ужасной. Жилые дома, промышленные строения превратились в груду обломков. Были обрушены мосты, искривлены железнодорожные рельсы, перевернуты поезда, повреждены автострады, разорваны трубопроводы, разрушены плотины. В полуторамиллионном городе погибла почти половина населения.

Сильнейшее землетрясение произошло 1 ноября 1755 г. в Лиссабоне — столице Португалии. По современным оценкам сейсмологов его магнитуда была около 8,6, т. е. на максимальном энергетическом пределе. В 9 часов утра раздался звук, похожий на подземный гром. Это был первый их трех главных толчков, который продолжался 6 мин. Оставшиеся в живых пытались покинуть рушащийся город. Через час после первого толчка море отступило, обнажив приливную полосу, и нахлынуло на берег в виде нескольких волн цунами высотой от 5 до 7 м. Волны накрыли набережную и людей, после отступления волн от массивной каменной набережной не осталось и следа. Город Лиссабон превратился в груды развалин, погибло около 50 тыс. человек.

19 апреля 1906 г. в Калифорнии произошло одно из крупнейших землетрясений с магнитудой 8,3. В результате землетрясения на поверхности Земли образовался глубокий разлом шириной около 6 м и длиной 450 км (разлом Сан-Андреас). Во время землетрясения произошло три толчка, которые продолжались чуть более 1 мин. Были разрушены многие районы Сан-Франциско. Из-за разрывов газопроводов возникли пожары - сгорели все деревянные постройки, из которых, в основном, состоял город. Число погибших — около 700 человек.

В Турции во время землетрясения в 1939 г. (M = 7,9) в г. Эринджан погибло 40 тыс. человек. С тех пор в Турции произошло более 20 катастрофических землетрясений, унесших 20 тыс. человеческих жизней. Самым разрушительным было землетрясение, произошедшее 17 августа 1999 г. (M = 7,7). Его жертвами стали 14 тыс. человек.

В Чили 22 мая 1960 г. произошло катастрофическое землетрясение, оно разрушило город Консепсьон, а также крупные промышленные центры: Пуэрто-Монт, Валдивия,

Осорно. Без жилья остались миллионы чилийцев. Возникшее после землетрясения цунами смыло порт Анкунд и обрушилось практически на все Тихоокеанское побережье, достигло берегов Японии, где от цунами погибло 120 человек.

В Иране, где происходит много землетрясений, в 1972 г. произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 7,1. Был полностью разрушен город Кир, погибло 5400 человек. Еще более сильное землетрясение (М = 7,7) произошло в г. Тебесе в 1978 г. В городе и окрестностях погибло 15 тыс. человек.

На Аляске 26 марта 1964 г. произошло одно из самых мощных землетрясений (М = 8,5). Продолжительность главного толчка составила 4 мин. Разрушения охватили площадь более 65 тыс. км2. Погибло 130 человек. В результате образовавшегося цунами погибло еще 11 человек.

В Ташкенте 25 апреля 1966 г. произошло землетрясение средней энергии, 5,3 балла по шкале Рихтера. Город был почти полностью разрушен, так как не были соблюдены правила антисейсмического строительства.

В Армении 7 декабря 1988 г. произошло сильное землетрясение, около 7 баллов по Рихтеру. В зону землетрясения попали десятки городов Армении, Азербайджана и Грузии. Полностью был разрушен город Спитак, огромные разрушения были в Ленинакане, Кировакане. Погибло 25 тыс. человек, без жилья остались более 500 тысяч.

В Перу 1 мая 1970 г. произошло сильное землетрясение с магнитудой 7,8. Разрушения наблюдались на площади 100 тыс. км^2. Наиболее катастрофические последствия были в густонаселенной долине Уайлас. Менее чем за 30 секунд в городе Уарасе обрушилась большая часть зданий, погибла половина его населения - 10 тыс. человек. В г. Юнгай в результате схода снежных лавин погибло 15 тыс. человек.

В Мексике 19 сентября 1985 г. произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой 8,2. Наиболее сильно пострадала столица Мехико - город с 17-миллионным населением. Целые жилые кварталы превратились в груду развалин, как карточные домики падали небоскребы, рухнула 100-метровая телебашня. Тысячи людей оказались заживо погребенными под развалинами домов, школ, церквей.

Новый сильный толчок последовал 20 сентября (М = 7,3), 30 сентября произошло третье землетрясение. В период с 19 по 30 сентября сейсмостанции зарегистрировали свыше 70 толчков интенсивностью от 4,5 до 7,8 по шкале Рихтера.

21 октября в Мехико вновь ощущались подземные толчки, а 29 октября произошло новое землетрясение интенсивностью 5,7 баллов по Рихтеру. Всего погибло 7,5 тыс. человек, 350 тысяч мексиканцев лишились крова.

В районе Японских островов активность земных недр настолько высока, что в среднем в год здесь случается 1500 ощутимых подземных толчков. Самые сильные из них в основном возникают в двух гигантских разломах земной коры - Суруга и Сагами, располагающихся в открытом океане вдоль японского побережья. Именно здесь находился эпицентр крупнейших сейсмических бедствий в 1498, 1605, 1707, 1854, 1923, 1944 гг.

Самое сильное японское землетрясение произошло 1 сентября 1923 г. Оно имело интенсивность М = 8,3. Землетрясение охватило область провинции Южный Конто (включая Токио и Иокогаму) — экономические, политические и культурные центры Японии. Эпицентр землетрясения, получившего название «Великого землетрясения в Конто», находился примерно в 80 км к юго-западу от Токио, возле острова Осима в заливе Сугами.

Мощнейший подземный удар буквально за несколько секунд полностью и частично разрушил более 254 тыс. домов. Остальное довершили вспыхнувшие пожары: легкие домики из дерева, фанеры и бумаги были уничтожены огнем в течение считанных часов. Водопроводы были повреждены и бездействовали, пламя бушевало беспрепятственно. Более половины Токио и практически вся Иокогама были сожжены дотла. Число жертв было ужасающим: 40 тыс. человек собрались в городском парке,

спасаясь бегством из горячих жилищ, и лишь 2 тысячи из них остались в живых, остальные задохнулись в дыму.

Многие маленькие города по берегу залива были уничтожены гигантскими волнами цунами, высота которых в ряде мест превышала 10-12 м. Жестокая подземная буря, разрушив Токио и Иокогаму, оставила без крова 3,5 млн человек и унесла 143 тыс. человеческих жизней. Ежегодно 1 сентября в день «Великого землетрясения в Конто» по всей Японии, особенно в Токио, проводятся учения с целью научить население правильному поведению во время буйства стихии.

Сильнейшие землетрясения происходили не только в историческое время, они с определенной, но далеко не всегда понятной, закономерностью взрывали и продолжают взрывать в разных географических регионах земную кору и верхнюю часть литосферы нашей планеты. Существует точка зрения, что пока это происходит, на Земле будут поддерживаться условия, необходимые для существования жизни. В заключение приведем краткие сведения о трех очень сильных землетрясениях, последовавших одно за другим с сентября по декабрь 2003 г.

25 сентября произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой 8,3 на острове Хоккайдо (Япония). Глубина очага - 27 км. Были человеческие жертвы (589 человек), разрушения дорог, дамб, произошли оползни, обвалы. Образовавшееся цунами с высотой волн от 4 м прокатилось вдоль юго-восточного побережья Хоккайдо. Последнее такое же ужасное землетрясение в этом регионе произошло 4 марта 1952 г. с магнитудой 8,1.

Рис. 9-2. Последствия землетрясения на Алтае 27 сентября 2003 г (фото А.С. Гибшера).

27 сентября 2003 г. сильнейшее землетрясение с магнитудой 7,3 произошло в России на Алтае, недалеко от границы с Монголией (рис. 9-2). Глубина очага - 16 км. Были человеческие жертвы, большие разрушения. Землетрясение ощущалось в Прокопьевске, Новосибирске, Абакане, Барнауле, Кемерово, Красноярске и других городах Восточной Сибири. Последнее крупное землетрясение в этом регионе произошло 20 декабря 1761 г. с магнитудой 7,7.

26 декабря 2003 г. землетрясение с магнитудой 6,6 произошло в юго-восточном Иране. Глубина очага — 10 км. Огромное количество людей погибло (16 200 человек), разрушено около 85% зданий и другой инфраструктуры в окрестностях города Вам.

Максимум интенсивности землетрясения наблюдался в городах Баме (9 баллов по шкале Рихтера) и Баравате (8 баллов). Последнее катастрофическое землетрясение наблюдалось в этом регионе более 2 000 лет назад.

Все три землетрясения вызвали очень крупные разрывы в земной коре, протяженность которых достигала нескольких километров.

9. 3. Сейсмичность Земли.

Сейсмичность и вулканизм Земли, а так же способы их реализации, - тектонические землетрясения и вулканы, предназначенные для "сброса" накопившейся в Земле тектонической энергии, - являются общепланетарной особенностью. В основе этих грандиозных диссипативных процессов лежат два различных элементарных акта: образование трещины и возникновение расплава. И тот, и другой, являются реакцией среды на внешнюю нагрузку. Первый ведет к сейсмичности, второй - к вулканизму. Основная причина возникновения подобных явлений на Земле состоит в реализации принципа минимизации её потенциальной гравитационной энергии (Глава 17). Еще Ньютон заметил, что форма Земли соответствует расплавленному состоянию ее недр. По-видимому, присутствие на Земле вулканических процессов определяет это соответствие. Однако, не только вулканизм "отслеживает" соответствие формы Земли принципу минимизации энергии. Совсем недавно авторы (Chao et al., 1995) пришли к заключению, что землетрясения могут приводить к тому, что наша планета становится в большей степени сферической и более компактной, а ее гравитационная энергия уменьшается (не совсем ясным способом) "перекачиваясь" в тепло. Более того, эти авторы утверждают, что землетрясения не столько «сбрасывают» тектонические напряжения, сколько перераспределяют их влияние по литосфере Земли.

Распределение землетрясений по земному шару (рис. 9-3). Наибольшая сейсмическая активность наблюдается в Тихоокеанском поясе. Согласно таблицам Гутенберга и Рихтера, в нем выделилось 75,4% энергии неглубоких землетрясений, происшедших с 1904 по 1952 г., 22,9% — в Трансазиатской, или Альпийской зоне, протянувшейся от Индонезии через Гималаи к Средиземноморью. На остальную часть земного шара приходится менее 2%. Энергия, выделяющаяся при промежуточных и глубоких землетрясениях, в еще большей степени концентрируется в Тихоокеанском поясе.

Наибольшая сейсмичность проявляется у дугообразных структур на земной поверхности. Такую форму в наиболее интересных случаях имеют расположенные рядом океанические желоба, цепочки вулканических островов. К последним приурочены аномалии силы тяжести, а очаги землетрясений располагаются здесь вдоль плоскости, уходящей в глубь Земли под углом 45°.

Вообще география землетрясений очень пестра. Даже в европейских странах, которые по современным представлениям стабильны в сейсмическом отношении, время от времени бушуют серьезные подземные бури. Прежде всего, это относится к странам побережья Северного моря, Бельгии, Швейцарии и другим странам Европы. До настоящего времени землетрясений не наблюдалось только в Антарктиде, несмотря на то, что там есть и молодые горы, и действующие вулканы. Это - своего рода сейсмологическая загадка.

Глубокофокусные землетрясения происходят реже и сконцентрированы в более ограниченных зонах, чем мелкофокусные. Практически все глубокие землетрясения происходят в Тихоокеанском поясе. Самый глубокий толчок зафиксирован на глубине 720 км; более глубокие части Земли абсолютно асейсмичны.

Создается впечатление, что все землетрясения вплоть до глубины 720 км связаны с общей системой движений, происходящих в мантии и коре. Распределение землетрясений по поверхности Земли показывает, что глубокие и поверхностные землетрясения

приурочены к одним и тем же географическим районам. Возможно, все они определяются общим глубинным механизмом.

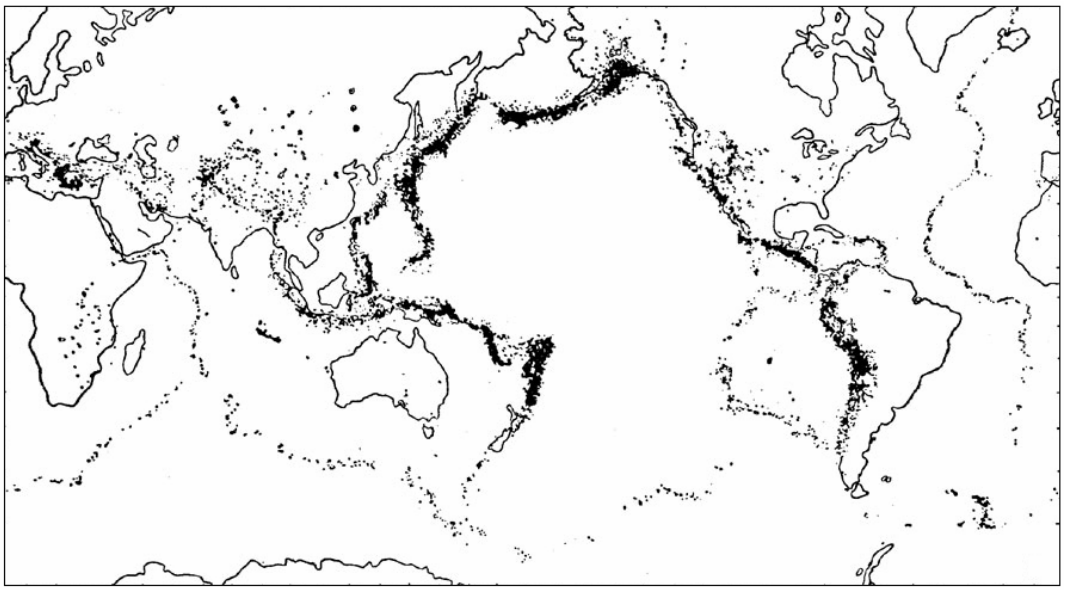


Рис. 9-3. Распределение сейсмичности на Земле.

Пример локального размещения землетрясений в зоне субдукции. Субдукция представляет собой очень сложный геологический процесс. Даже взглянув на одно из проявлений субдукции - сейсмичность, можно смело утверждать об этом. Используемая сегодня модель субдукции сводит всю сейсмичность зон субдукции к зонам Беньофа (сейсмофокальным зонам) и приповерхностной зоне землетрясений. Однако, при изучении сейсмического каталога JMA (Japan Meteorological Agency) за период с 1989 по 1995 гг., авторами (Вадковский, Веселовский, 2000) был обнаружен факт существования скоплений очагов землетрясений, которые не могли быть отнесены ни к одной из известных сейсмических зон. За их характерную субцилиндрическую форму, ориентированную преимущественно вертикально с возможным отклонением в несколько градусов, - В.Н. Вадковский дал им название: «сейсмические гвозди».

Сводная характеристика «сейсмических гвоздей», полученная авторами в результате исследования трех из них, выделенных в пределах Японской зоны субдукции (о. Хонсю) (рис. 9-4).

1. «Сейсмические гвозди» образуются как в породах висячего крыла, так и в континентальной земной коре, причем в последней их значительно больше, что, по-видимому, связано с ее большей хрупкостью. Глубина их образования ограничена снизу значением 75 км.
2. «Сейсмические гвозди» состоят главным образом из очагов малоамплитудных землетрясений (порядка 2-3 баллов).
3. «Сейсмические гвозди» имеют следующие пространственные характеристики: высота - 50-70 км; максимальный поперечный размер ~4-6 км; количество очагов землетрясений, слагающих «сейсмический гвоздь» от 100 до 1000; время образования от 2 недель до нескольких месяцев, а возможно и больше. Стоит заметить, что «сейсмические гвозди» нужно рассматривать масштабно. Например, было замечено, что некоторые «сейсмические гвозди» состоят из нескольких более мелких «сейсмических гвоздей», подобных им.
4. Возникновение «сейсмических гвоздей» -процесс затухающий, но отличающийся от характера затухания афтершоков землетрясений.
5. Были замечены различия в морфологии «сейсмических гвоздей».

Существуют «сейсмические гвозди», начавшие образовываться над очагом относительно сильного землетрясения (на 1-2 балла превосходящее магнитуды землетрясений самого «сейсмического гвоздя». В противовес им наблюдаются гвозди без начального сильного землетрясения.

6. Землетрясения, очаги которых формируют «сейсмический гвоздь», происходят одновременно по всей его протяженности.

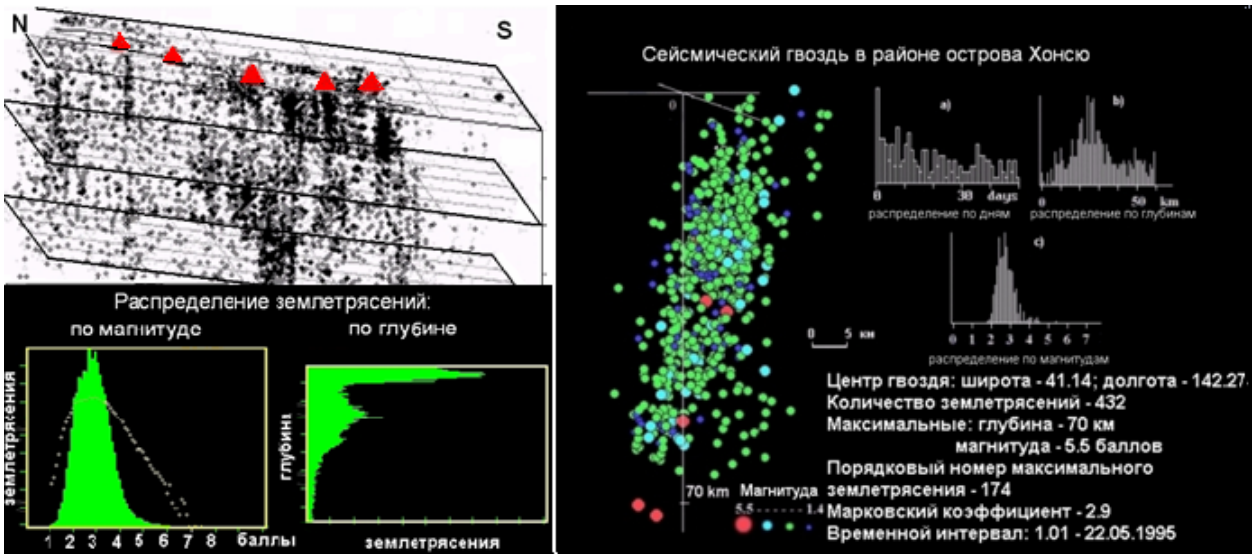


Рис. 9-4. Сейсмические гвозди в зоне субдукции Японии. Красные треугольники – вулканы (Вадковский, Веселовский, 2000).

Сейсмичность Земли как процесс самоорганизации. Сейсмичность Земли является результатом действия на Земле процессов самоорганизации. По-видимому, сейсмичность, в этом плане, является неотъемлемой частью процессов самоорганизации, неся на себе своеобразную роль диффузии (перколяции) напряжений. Роль переноса в этих процессах выполняет, в таком случае, движение (дрейф, растекание) литосферы. По-видимому, понять природу самоорганизующихся процессов, происходящих на Земле, можно только после того, как будет достигнута необходимая ясность в физике движения (геодинамике) литосферы и физике самого землетрясения.

Принципиальный момент ударно-волновой модели землетрясения состоит в том, что в геологической среде, которая подвержена только литостатической нагрузке ($\sigma\downarrow$), землетрясение возникнуть не может. Только образование в напряженной геологической среде когерентности акустических свойств и возникновение дальнего порядка и, как следствие этого, - возникновение землетрясения, возможно только при векторном сложении литостатической и касательной нагрузок. Более того, должно соблюдаться вполне определенное их соотношение. На Земле возникновение тангенциальных (касательных) напряжений (σ_τ) приводит к растеканию литосферы (движению плит), которое может служить своеобразным «переносчиком» напряжений на сравнительно большие расстояния (аналогично тому, как это происходит в гидравлике). Таким образом, в сейсмичности Земли можно выделить цепочку взаимодействующих друг с другом процессов: «возникновение $\sigma_\tau \rightarrow$ течение литосферы $\rightarrow$ смещение литосферных масс $\rightarrow$ возникновение соответствия: $\sigma_\tau + \sigma\downarrow \rightarrow$ землетрясение $\rightarrow$ смещение литосферных масс $\rightarrow$ изменение величины $\sigma_\tau \rightarrow$ течение литосферы и т.д.». В этой цепочке можно выделить два основных элемента: дрейф – течение литосферы и диффузия - перераспределение напряжений при землетрясениях. Сумма этих процессов, взаимодействующих между

собой и приводящих к их взаимному усилению, является необходимым условием для самоорганизации. В соответствии с обоснованным нами принципом минимизации гравитационного потенциала (минимизации высоты геоида), цель самоорганизующихся на Земле процессов подобного типа состоит в приведении зон глубоководных желобов и островных дуг (зон субдукции) к гравитационному (изостатическому) равновесию.

Рассмотрим в качестве примера самоорганизации результаты исследований эффекта миграции сейсмичности вдоль зон субдукции Тихого океана. Остановимся на двух недавних работах (Кузнецов, Кейлис-Борок, 1997; Рундквист и др., 1998), хотя таких исследований много больше. В первой работе авторы выделили цепочку сейсмической активности, начавшейся со второй половины 40-х годов в районе Новой Зеландии - Тонга и мигрирующей вдоль Тихоокеанического пояса по «часовой стрелке» до Южной Америки. Этот этап закончился известным сильнейшим Чилийским землетрясением 1960 г. Сейсмическая активность распространялась, по оценке авторов, со скоростью около 3000 км/год ($v \approx 10$ см/с). Во второй работе рассмотрен более поздний период времени (1963 – 1995 гг.) и выявлена миграция активности сейсмичности Тихоокеанического пояса в обратном (к первой работе) направлении, преимущественно «против часовой стрелки», примерно с такой же скоростью. Характерный размер кластера (сейсмоактивного сегмента) составляет ~ 1000 км ($l \approx 10^8$ см). Зная v и l, можно оценить диффузионный параметр сейсмичности γ ($\gamma \approx 10^9$ см^2/с).

Используем формулу фрактальной размерности D: $D = (\alpha/\gamma)\cdot l$ и оценим скорость течения литосферы α (скорость дрейфа): $\alpha \approx D^2\gamma/l$, т.к. $D \approx 1$. Величина α составляет примерно 10^{-7} см/с, что соответствует скорости растекания литосферы (до 10 см в год). Приведенная оценка показывает, что сейсмичность Тихоокеанического пояса (составляющая примерно 80 % полной сейсмичности Земли) непосредственно связана с растеканием литосферы (движением плит). Этот вывод тривиален и именно в таком виде он следует из плитной тектоники. В нашей модели он наполнен принципиально другим физическим смыслом. Суть его состоит в том, что на Земле в настоящее время реализуется принцип минимизации гравитационной энергии, происходят самоорганизующиеся процессы переноса и диффузии, направленные на минимизацию высоты геоида в районе островных дуг и зон субдукции. Результатом влияния этих процессов является возникновение пространственных кластеров-фракталов в виде сейсмоактивных зон (сегментов) и сейсмического фликкер-шума, фиксируемого как известный закон Гутенберга-Рихтера. Дрейф сейсмичности сначала по «часовой стрелке», а потом – «против», должен быть связан (по нашей модели) с изменением вектора течения (дрейфа плит). К сожалению, нам неизвестно точно, как изменялась скорость растекания литосферы за последние 50 лет, и поэтому нет возможности убедиться в правомерности (или ошибочности) нашей модели. Однако, можно попытаться получить эту информацию, например, анализируя вертикальные движения земной коры в зонах субдукции и изменения уровня Тихого океана.

Физика землетрясения изучается в различных научных центрах мира более 80 лет. Начало этим исследованиям было положено Х.Ф.Рейдом (Reid, 1911), когда он выдвинул свою “теорию упругой отдачи” (рис. 9-5), которая сохранила основную суть и используется сейсмологами до настоящего времени. Эта теория базировалась на хорошо заметной аналогии между структурами разлома, образовавшегося в момент землетрясения в Сан-Франциско в 1908 г., и разлома Сан-Андреас, на котором построен этот город, оказавшийся в 1908 г. практически разрушенным. Суть модели Рейда состояла в том, что трещина, которая привела к разрушению города, распространялась с глубины несколько десятков километров к поверхности Земли и оказалась внешне очень похожей на существовавший здесь разлом Сан-Андреас. Идея Рейда в других случаях сильных землетрясений не нашла такого яркого, как это было в Сан-Франциско, подтверждения. Прошло много лет после того, как Рейд сформулировал свою идею упругой отдачи. За

прошедшие с тех пор годы было высказано много похожих идей, однако, физика землетрясения так и осталась не ясной.

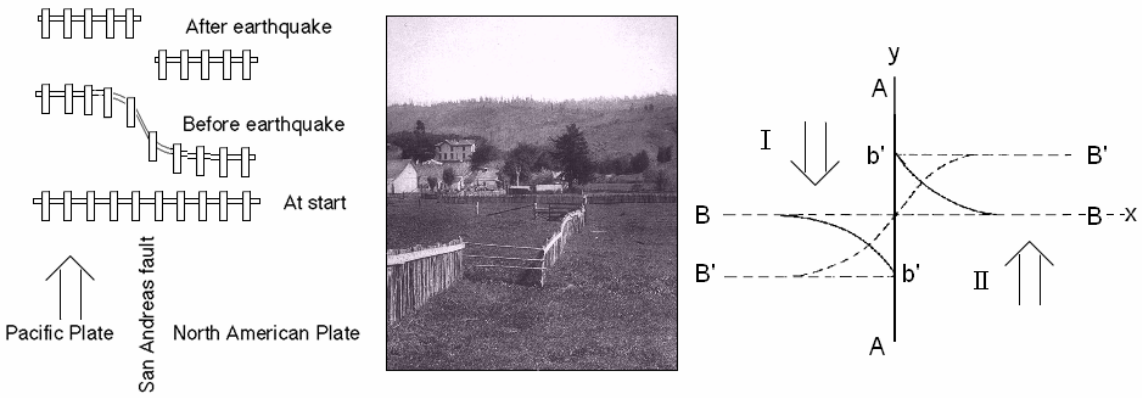


Рис. 9-5. Принцип упругой отдачи Рейда.

Модели сейсмичности. Модель Барриджа-Кнопова. Модель Барриджа-Кнопова (Б-К) (Burridge, Knopoff, 1967), высказанная более 40 лет тому назад с целью объяснить появление повторных ударов землетрясений, в последние годы получила преобладающее над другими идеями развитие. К модели Барриджа-Кнопова проявляют интерес как геофизики (Ito, Matsuzaki, 1990; Brown, Scholz, 1991; Rundle, 1991; Nielsen et al., 1995), так и физики теоретики (Bak et al., 1987; Bak, Tang, 1989; Carlson et al., 1991; Knopoff et al., 1992; Olami et al., 1992; Klein, Rundle, 1993; Christensen, 1993; Ding, Lu, 1993; Sahimi et al., 1993; Carlson et al., 1994). Б-К модель в значительной мере базируется на т.н. идее "прерывистого скольжения" (stick-slip), высказанной Брайсом и Баерли (Б-Б) (Brace, Byerlee, 1966) за год до Б-К. Суть Б-К модели ясна из рис. 16-1 (Brown, et al., 1991), на котором показано, что движущаяся плита соединена с неподвижной плитой посредством *N*-дискретных элементов (блоков), связанных между собой и плитами, посредством "пружин" (реологических параметров). Идею stick-slip можно пояснить на примере санок, стоящих на поверхности с трением, которые тянут веревкой с пружиной. В начале натягивается пружина, а санки стоят, затем, когда усилие становится больше чем сила трения, санки начинают движение скачком. Если таких "санок" много, как в Б-К модели, то взаимное влияние дискретных элементов (санки, "прыгая", дергают за собой другие) может приводить к тому, что одновременно в spring-block модели могут "прыгнуть" сразу несколько элементов. Это, по Б-К, и есть "главный удар" землетрясения, в то время как "прыжки" других блоков, это повторные удары, или афтершоки. Модель Б-К исследовалась в лаборатории экспериментально и на компьютере, - численно (Burridge, Knopoff, 1967). В результате было показано, что модель проявляет свойства, присущие экспериментальному закону повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера. В экспериментах наблюдалось подобие главного удара (main shock), форшоков и афтершоков.

Уравнение движения дискретных элементов в Б-К модели (Burridge, Knopoff, 1967):

$$m_j \, d^2x_j/dt^2 = T_j - T_{j-1} + T_j^* + F_j^*, \; j = 1, 2, \ldots, N, \qquad (9.1)$$

где m_j - масса дискретного элемента, $T_j = \mu_j(x_{j+1} - x_j)$ - напряжение в пространстве между двумя элементами: $j+1$ и j, $T_j^* = -\lambda_j (x_j - Vt)$ - сила, вызывающая "прыжок" j-того элемента, V - его скорость, μ_j, λ_j и m_j - положительные константы, F_j^* - функция скорости dx_j/dt, в которую входят: сила трения, эффекты излучения и вязкости. Предполагается, что:

$$F_j^* = - E_j(dx_j/dt) + F_j(dx_j/dt), \qquad (9.2)$$

где - $E_j(dx_j/dt)$ - “отвечает” за излучение, а $F_j(dx_j/dt)$ - показывает комбинацию эффектов, связанных с вязкостью и трением.

При экспериментальном изучении поведения образцов горных пород при нагружении внешним давлением было обнаружено, что действующая на образец сила изменяется в зависимости от величины регистрируемого изменения длины образца в “виде пилы”. Б-Б модель нашла геологическое объяснение этим результатам как “прерывистое скольжение” (stick-slip) двух плит друг по другу вдоль разлома при наличии трения (Brown, et al., 1991).

Несмотря на то, что Б-К и Б-Б модели были высказаны еще 30 лет назад, интерес к ним у ученых возрос лишь в последние годы. Это объясняется тем, что наметились определенные успехи в физике нелинейных явлений, в частности, в области т.н. самоорганизующихся систем. Модель Б-К была признана как вполне подходящая основа для отработки этих идей. Кроме этого, в настоящее время принято считать, что эта модель, из всех других, наиболее адекватна землетрясению.

Все Б-К модели базируются на фундаментальном экспериментальном законе Гутенберга-Рихтера, согласно которому число землетрясений N с энергией E:

$$N_{(Eo > E)} \sim E^{-B} . \qquad (9.3)$$

Землетрясения и минимизация гравитационной энергии. Рассмотрим результаты работ, посвященных роли сильных землетрясений в изменении гравитационной энергии Земли (Chao, Gross, 1987; Chao, Gross, 1995-a; Chao et al., 1995-b). Авторы считают, что землетрясения, кроме энергии диссипации, выделившейся при разрушении, переносят значительное количество энергии и перераспределяют её между вращением Земли, упругим полем, гравитационным полем и теплом. Авторы вычислили косейсмическое изменение глобальной гравитационной энергии, индуцированной 11015 большими землетрясениями, которые произошли с 1977 по 1993, Чао и Гросс полагают, что землетрясения привели, за это время, к весьма заметному (около 2×10^{12} Вт) уменьшению величины гравитационной энергии Земли. Это значительно больше, чем та доля энергии, которая пошла за это время на увеличение скорости вращения Земли (6.7×10^{9} Вт) и больше энергии сейсмических волн (4.7×10^{9} Вт).

Принято считать, что энергия землетрясения идет частично на разрушение, частично на нагрев, частично излучается в виде сейсмической волны. По мнению Чао и Гросса, всё это так, если не учитывать, что Земля самогравитирующая, вращающаяся система. Учет последнего обстоятельства приводит к необходимости принимать во внимание изменение статического поля деформаций Земли. Интегрированное по всему земному шару перераспределение масс, связанное с этим полем смещений, изменяет как момент инерции Земли, и скорость её вращения, так и гравитационное поле, и гравитационную энергию Земли. Изменение гравитационной потенциальной энергии равно работе, выполненной против силы тяжести веществом Земли при смещении $u(r)$:

$$\Delta E = - \int \rho(r)\, u(r)\, g(r)\, dV, \qquad (9.4)$$

где $\rho(r)$ - плотность, $g(r)$ - ускорение силы тяжести, интегрирование выполняется по объему Земли V.

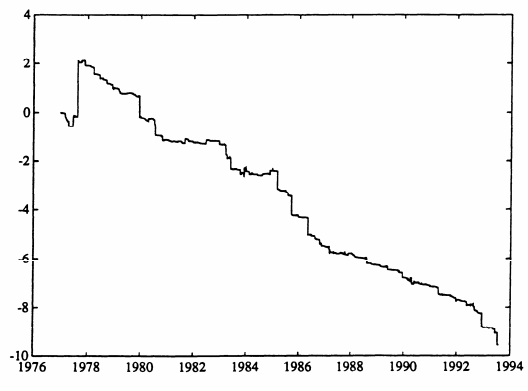


Рис. 9-6-а. Уменьшение кумулятивной гравитационной энергии Земли (в lg-масштабе) индуцированное 11015 землетрясениями в течение 1977 – 1993 г.г. (Chao et al., 1995-а).

Авторы использовали данные Гарвардского каталога о величинах тензора сейсмического момента центроида ряда землетрясений с магнитудой больше 5, произошедших с 1977 по 1993 г.г. Обнаружилось, что землетрясения имеют неслучайное поведение, характеризуемое тенденцией к уменьшению гравитационной энергии Земли (см. рис. 9-6-а). На этом рисунке показано кумулятивное изменение гравитационной энергии, обусловленное 11015 большими землетрясениями. То, что землетрясения стремятся уменьшить гравитационную энергию Земли, подтверждает факт, что именно сила тяжести является их причиной и управляющим механизмом. Чао и Гросс вычислили, пользуясь данными Гарвардского каталога, изменение кумулятивной энергии этих землетрясений в течение этого же периода времени (рис. 9-6-б). Оба рисунка находятся в хорошем согласии, из них видно, что увеличение энергии сейсмических волн землетрясений, за один и тот же промежуток времени, примерно на три порядка меньше, чем убыль гравитационной энергии Земли. Основной вывод авторов состоит в том, что землетрясения «делают» Землю более компактной и, как ни странно, более напряженной.

Оценим порядок величины гравитационной энергии, теряемой Землей благодаря “работе” землетрясений. В год это составляет примерно 10^{27} эрг, или, иначе (хотя эта оценка большого смысла не имеет), землетрясениям потребовалось бы примерно 10^{12} лет для полной диссипации всей гравитационной энергии Земли. “Потери” гравитационной энергии примерно в 10 раз меньше теплового потока Земли.

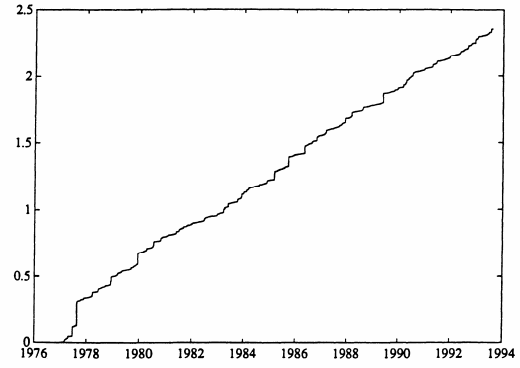


Рис. 9-6-б. Увеличение кумулятивной энергии сейсмических волн индуцированное 11015 землетрясениями в течение 1977 – 1993 г.г. (Chao et al., 1995-а).

Ансамбль излучающих трещин. Идея самоорганизации ансамбля трещин, излучающих звуковой импульс при их раскрытии, была высказана автором (Кузнецов, 1992, Кузнецов, 2001), где изложена только феноменология явления. Ниже рассмотрим теорию

самоорганизации ансамбля раскрывающихся трещин. Суть нашей модели состоит в постулировании возможного механизма когерентного взаимодействия трещин друг с другом путем обмена излучаемых ими акустических волн. Как известно, при раскрытии трещины излучается звуковой импульс акустической эмиссии (АЭ). Этот импульс "несет" определенную долю энергии и, дифрагируя на микротрещине, передает ей энергию, "помогая" раскрыться. Трещина начинает расти и излучает при этом "свой" импульс, который взаимодействует со следующей трещиной и т.д. При этом может наблюдаться эффект лавинного образования трещин, звуковые импульсы которых когерентно складываются, обеспечивая при этом явление усиления звуковой волны (Ishido, Nishizawa, 1984) и возникновение фрактальных структур.

Образование трещин и фрактальный характер акустической эмиссии. Приведем результаты наблюдения процесса образования трещин и связанной с ними акустической эмиссии, возникающей в образце горной породы при постоянной и плавно меняющейся нагрузке (Ishido, Nishizawa, 1984; Kusunose et al., 1991; Lei et al., 1992; Журков и др., 1980). В первых трех из перечисленных работ, испытания проводились на образцах из гранита в виде цилиндра, диаметром 50 мм и высотой 100. В (Ishido, Nishizawa, 1984) образцы нагружались одноаксиальным сжатием величиной 94 МПа. По торцам цилиндра и на его боковых стенках укреплялись ортогонально друг другу датчики, - излучатели и приемники ультразвука: пара датчиков - параллельно оси цилиндра и две пары - перпендикулярно ей. Частота зондирования 500 кГц. В процессе эксперимента измерялись: время прохождения звука от излучателя к приемнику (и вычислялись скорости звука: v_{11}, v_1 и v_2), относительные амплитуды сигнала зондирования (A_{11}, A_1 и A_2) и частота (интенсивность - I_o) сигналов акустической эмиссии (АЭ). Авторы показали, что интенсивность акустической эмиссии (I), после выдержки образца под постоянным давлением в течение примерно 50 часов, резко возрастает. Синхронно с этим явлением изменяются скорости звука и амплитуды сигналов зондирования: v_{11} и A_{11} - возрастают, а v_1, v_2 и A_1, A_2 - уменьшаются. После окончания пика активности АЭ, величины скоростей и амплитуд не восстанавливается до прежнего уровня (характерного для начала пика АЭ).

Несколько ранее аналогичные результаты по исследованию нестационарного характера акустической эмиссии были получены авторами (Журков и др., 1980). Правда, в отличие от работы (Ishido, Nishizawa, 1984), здесь не проводилось измерения скоростей и амплитуд зондирующего звукового сигнала. Скорость образования трещин (I), в этой работе, спонтанно возрастала в 10 - 15 раз относительно фонового уровня I_o и затем так же резко убывала. Авторы не нашли убедительного объяснения наблюденному явлению. Они считают маловероятным, чтобы во всем объеме нагруженного образца резко повысилась активность образования трещин. По их мнению, это возможно лишь в некоторой его области, оказавшейся по каким-то причинам в особом положении. Авторы полагают замеченное явление интересным в том плане, что более детальное изучение кинетики развития такого локального разрушения может помочь в выяснении причин появления форшоков и афтершоков, а возможно, и объяснить причину некоторых предвестников землетрясений. Обратим внимание на то, что в обоих экспериментах, в момент усиления интенсивности АЭ (I), соблюдалась зависимость: $I_o \sim N$; $I \sim N^2$, где N - число образовавшихся трещин в ед. времени. Это свойство присуще сверхизлучению Дике.

Работы по исследованию особенностей АЭ в образцах гранита продолжены в (Kusunose et al., 1991; Lei et al., 1992) и др. В этих работах изучалась пространственная и временная структура распределения гипоцентров и механизмы излучения АЭ. Показано, что структура распределения гипоцентров имеет фрактальный характер. По мере увеличения объемного сжатия образца, местоположение гипоцентров АЭ постепенно изменялось: от случайного в начале процесса до объединения гипоцентров в группы (кластеры), на второй стадии, и объединения (нуклеации) их в единый "ансамбль" - на третьей (см. рис. П4-9). Авторы этих работ обнаружили, что в образцах гранита

(изучались два типа гранитов с различными размерами зерен: 2 микрона у “OG”- гранита и 5 микрон, у “IG”) происходит группирование гипоцентров АЭ в пространственно-временные фракталы. Одновременно, по мере увеличения сжатия, меняется размерность фракталов: *d* сначала возрастает, а к третьей стадии - уменьшается (рис. П4-9). Оказалось, что различные граниты имеют на начальном этапе различные величины *d:* чем больше размер зерна, тем меньше размерность фракталов.

Обратим внимание на достоверный экспериментально обнаруженный факт *уменьшения фрактальной размерности по мере увеличения степени организованности структуры.*

9. 4. Интенсивность землетрясений (Трухин и др. 2005).

Для изучения землетрясения необходимо определить инструментальным способом его силу, место возникновения и частоту происхождения этих явления в данном месте и преимущественные места их возникновения. Возбуждаемые землетрясением упругие колебания подобно лучу света от прожектора способны осветить детали строения Земли.

Землетрясения различают по интенсивности, происхождению, глубине очага.
Интенсивность землетрясений в России и в большинстве других стран оценивается по 12-бальной шкале. Землетрясение силой в 1 балл не ощущается, а отмечается только приборами. Землетрясение в 12 баллов является сильной катастрофой.
Наблюдаются тяжелые разрушения всех сооружений, изменение русел рек, образование водопадов. Происходят сильные изменения рельефа местности на больших пространствах. На поверхности грунта видны волны, подобные - морским. Иногда наблюдается подбрасывание отдельных предметов.

По происхождению землетрясения бывают тектонические, вулканические, обвальные. По глубинам очагов землетрясения делятся на обыкновенные (< 70 км), промежуточные (70-300 км) и глубокие (300-700 км).

Количественную оценку силы землетрясения можно выразить отношением α/g (коэффициент сотрясения), где $\alpha = 4\pi^2 a/T$ – амплитуда ускорения почвы при гармоническом колебании:

$$x = a \sin(2\pi/T)t .$$

(*a* — амплитуда смещения почвы); α может быть измерена непосредственно специальными приборами.

Б. Б. Голицын предложил оценивать энергию землетрясения на расстоянии Δ по формуле:

$$F_\Delta = \frac{E}{2\pi\Delta^2} e^{-k\Delta}, \qquad M = \lg\frac{a}{T} + f(\Delta, h) + C, \tag{9.5}$$

где *E* - энергия колебания в очаге, *k* — эмпирическая константа.
Интенсивность проявления землетрясений на поверхности измеряется в *баллах* и зависит от глубины очага и магнитуды землетрясения, служащей мерой его энергии.

Интенсивность землетрясений оценивается в сейсмических баллах (таблица 1)

Таблица
9.1. **ШКАЛА МЕРКАЛЛИ**

I балл	Не ощущается людьми
II балла	Ощущается в спокойной обстановке на верхних этажах зданий.
III балла	Ощущается в помещениях; кажется, будто под окнами проезжает легкий грузовик. Качаются висячие предметы

IV балла	Кажется, будто проезжает тяжелый грузовик; звенят оконные стекла, посуда, скрепят двери.
V баллов	Ощущается на улице; просыпаются люди, выплескивается из посуды жидкость.
VI баллов	Ощущается всеми; испуганные люди выбегают на улицу; трескается штукатурка и кирпичная кладка; сдвигается и переворачивается мебель; лопаются оконные стекла.
VII баллов	Трудно стоять на ногах; ощущается водителями движущихся автомобилей; осыпается штукатурка, падают кирпичи, керамическая плитка и т.д.; звенят большие колокола; на поверхности водоемов возникают волны.
VIII баллов	Трудно вести автомобиль; падает штукатурка, рушатся некоторые кирпичные стены, дымовые трубы, башни, памятники; обламываются ветки деревьев; в сыром грунте образуются трещины.
IX баллов	Общая паника; лопаются каркасы строений и подземные трубы; образуются значительные трещины в грунте и песчаные воронки.
X баллов	Рушится большинство кирпичей кладки, каркасных сооружений и фундаментов; серьезные повреждения плотин и насыпей; рушатся мосты; мощные оползни.
XI баллов	Серьезная деформация железнодорожных путей; полностью выходят из строя подземные трубопроводы.
XII баллов	Практически полное разрушение; нарушение линии горизонта; взлетают в воздух отдельные предметы.

Сейсмические волны проходят внутри земного шара в тех местах, которые недоступны наблюдению. Все, что они встречают на пути, так или иначе их изменяет. Поэтому анализ сейсмических волн помогает выяснить внутреннее строение Земли.

При помощи сейсмографа можно оценить энергию землетрясения. Слабые землетрясения высвобождают энергию порядка 10 000 кг/м, т.е. достаточную, чтобы поднять груз весом 10 тонн на высоту 1 м. Этот энергетический уровень принимается за ноль, землетрясению, имеющему в 100 раз больше энергии соответствует 1, еще в 100 раз более сильному соответствуют 2 единицы шкалы. Такая шкала называется шкалой Рихтера в честь известного американского сейсмолога из Калифорнии Ч. Рихтера. Число в такой шкале называется магнитудой и обозначается - *M*. В самой шкале верхний предел не предусмотрен, по этой причине шкалу Рихтера называют открытой. В действительности сама Земля создает практический верхний предел. Сильнейшие из зарегистрированных землетрясений имели магнитуду 8,9. Таких землетрясений с начала инструментальных наблюдений зарегистрировано два, оба под океаном. Одно произошло в 1933 у берегов Японии, другое – в 1906 у берегов Эквадора. Таким образом, магнитуда землетрясения характеризует количество энергии, выделяемой очагом во все стороны. Эта величина не зависит ни от глубины очага, ни от расстояния до пункта наблюдения. Сила проявления землетрясения зависит не только от магнитуды, но и от глубины очага (чем ближе очаг к поверхности, тем больше сила его проявления), от качества грунтов (чем более рыхлый и неустойчивый грунт, тем больше сила проявления). Имеет значение, конечно, и качество наземных построек. Сила проявления землетрясения на земной поверхности определяется по шкале Меркалли в баллах. Баллы отмечаются цифрами от I до XII (цифры римские, чтобы не было путаницы с магнитудой).

Под сейсмичностью подразумевается географическое распределение землетрясений, их связь со строением земной поверхности и распределение по энергиям или магнитудам.

Очаг землетрясения - объем геологической среды, где происходят разрывы пород и высвобождение упругих напряжений. Размер области очага и величина сбрасываемых упругих напряжений обусловливает энергию сейсмических волн и магнитуду землетрясения. Так, протяженность очага землетрясения с магнитудой M = 7.0 и более превышает 50 км. Мерой величины очага является также сейсмический момент - произведение модуля сдвига горных пород на площадь разрыва и амплитуду смещения. Место в очаге, в котором начинается разрыв, называется гипоцентром (фокусом) землетрясения, а его проекция на земную поверхность - эпицентром. По типу смещения пород в очаге он может быть охарактеризован как сдвиг, сброс, надвиг или более сложная их комбинация. Очаги, в зависимости от глубины расположения, подразделяются на мелкофокусные - в пределах земной коры до глубины 70 км; промежуточные - в верхней мантии в интервале глубин 70-300 км и глубокофокусные на глубине от 300 до 600-700 км. Последние связаны с зонами субдукции (погружения) литосферных плит в мантию Земли.

Интенсивность в баллах (выражающихся целыми числами без дробей) определяется при обследовании района, в котором произошло землетрясение, или опросе жителей об их ощущениях при отсутствии разрушений, или же расчетами по эмпирически полученным и принятым для данного района формулам. Среди первых сведений о произошедшем землетрясении становится известной именно его магнитуда, а не интенсивность. Магнитуда определяется по сейсмограммам даже на больших расстояниях от эпицентра.

Интенсивность проявления землетрясений на поверхности измеряется в баллах и зависит от глубины очага и магнитуды землетрясения, служащей мерой его энергии. Магнитуда связана с полной энергией землетрясения, но эта зависимость не прямая, а логарифмическая, с увеличением магнитуды на единицу энергия возрастает в 100 раз, т. е. при толчке с магнитудой 6 высвобождается в 100 раз больше энергии, чем при магнитуде 5, и в 10 000 больше, чем при магнитуде 4.

Часто в средствах массовой информации, оповещающих о сейсмических катастрофах, отождествляется шкала магнитуд (Рихтера шкала) и сейсмическая шкала интенсивности, измеряемая в сейсмических баллах, т. к. журналисты, сообщающие о 12 баллах "по шкале Рихтера", путают магнитуду с интенсивностью.

Интенсивность тем больше, чем ближе очаг расположен к поверхности, так, напр., если очаг землетрясения с магнитудой, равной 8, находится на глубине 10 км, то на поверхности интенсивность составит 11-12 баллов; при той же магнитуде, но на глубине 40-50 км воздействие на поверхности уменьшается до 9-10 баллов.

Табл. 9.2. Примерное соотношение магнитуды и бальности в зависимости от глубины очага

h, км	Магнитуда			
	5	6	7	8
10	7	8 — 9	10	11 — 12
20	6	7 — 8	9	10 — 11
40	5	6 — 7	8	9 — 10

Магнитудой землетрясения называется его численная характеристика, определяемая по амплитудам сейсмических волн, рождающихся в очаге. Магнитуда для поверхностных волн обозначается как *M*, для объемных волн - *m*. Впервые шкала магнитуд предложена

Рихтером. В дальнейшем она была усовершенствована. Магнитуду можно определить по формуле:

$$M = \lg \frac{a}{T} + f(\Delta, h) + C, \tag{9.6}$$

где a — амплитуда смещения почвы (в мкм) в поверхностных волнах, T - преобладающий период (в с), Δ - эпицентральное расстояние, измеряемое углом между радиусами, проведенными из центра Земли через очаг землетрясения и через сейсмическую станцию, h - глубина очага землетрясения. Функция $f(\Delta, h)$ является результатом обработки многочисленных записей и учитывает убывание амплитуды волны с расстоянием. Последний член C, - представляет собой «станционную» поправку, учитывающую условия установки регистрирующей аппаратуры. Функция $f(\Delta, h)$ приводит наблюдения к единому эпицентральному расстоянию, для которого можно уже непосредственно сравнивать амплитуды волн. Начало отсчета шкалы выбирается по достаточно малой стандартной амплитуде, которая считается соответствующей землетрясению с магнитудой, равной нулю. Самое сильное землетрясение — это Ассамское (1952 г.), его магнитуда 8,7. Современная аппаратура позволяет регистрировать землетрясения с магнитудой до - 2, - 3 с точностью ± 0,1.

Существует зависимость между магнитудой и полной энергией землетрясения E. Величина a/T - служит мерой деформации грунта под действием сейсмической волны. Связь между E и M выражается эмпирической формулой:

$$\lg E = A + BM \tag{9.7}$$

Коэффициенты A и B определяются сравнением магнитуды с энергией сейсмических волн от землетрясений той же магнитуды. Такое определение A и B связано с тем, что энергия волны в единице объема горной породы пропорциональна квадрату деформации. Если бы землетрясения разной магнитуды возбуждали цуги волн одинаковой формы, то коэффициент B был бы равен 2. На самом деле спектр и длина цуга волн зависят от магнитуды.

По Гутенбергу и Рихтеру уравнение (9.7) записывается так:

$$\lg E = 11{,}8 + 1{,}50M \tag{9.8}$$

или для объемных волн

$$\lg E = 6{,}5 + 2{,}3m, \tag{9.9}$$

где магнитуда объемных волн m равна 2,5 + 0,63M.

Если подставить в (9.8) M = 8,7, то для самого сильного землетрясения получим E = $5 \cdot 10^{24}$ эрг. Это громадная энергия, которая составляет 0,05% от полного количества тепла, теряемого за год всей Землей (~ 10^{28} эрг). Отсюда можно сделать вывод, что процессы, определяющие накопление такой большой энергии в очагах, должны определяться основными свойствами мантии, они не могут быть случайными.

Для сравнения укажем, что энергия, выделившаяся при взрыве атомной бомбы в Хиросиме, ~ 10^{20} эрг. Однако если взорвать все накопленные к настоящему времени ядерные заряды (Q > $5 \cdot 10^{10}$ т), то это будет равносильно небывалому землетрясению с магнитудой больше чем 11,3: (Q —заряд в килотоннах). Эта формула применима при расчетах подземных ядерных взрывов.

Если подсчитать энергию, выделяющуюся всеми землетрясениями за год, то мы увидим, что наибольшую энергию производит катастрофическое (одно!) землетрясение, остальные добавляют еще 15% от величины $5 \cdot 10^{24}$ эрг для M = 8,7.

Очаги землетрясений, ранжированные по магнитуде M, распределены упорядоченно не только по времени (закон Гуттенберга и Рихтера), но и в пространстве (Уломов, 1999). Как оказалось, среднестатистические расстояния d_M (км) между эпицентрами ближайших пар сейсмических очагов размерами L_M (км) и магнитуды M описываются соотношениями:

$$d_M = 10^{(0.6M - 1.94)}; \; L_M = 10^{(0.6M - 2.5)}$$

Величина d_M фактически характеризует средний размер геоблоков, способных генерировать землетрясения магнитудой M. Коэффициент 0.6 при M свидетельствует об изменении размеров очагов L_M и соответствующих межэпицентральных расстояний d_M в 2 раза при каждом последовательном шаге в 0.5 единицы магнитуды. Величина d_M/L_M равна 3.63 и не зависит от магнитуды землетрясения. К примеру, для магнитуды M = 3, $d_M \approx 700$ м, а $L_M \approx 200$ (см. рис. 1).

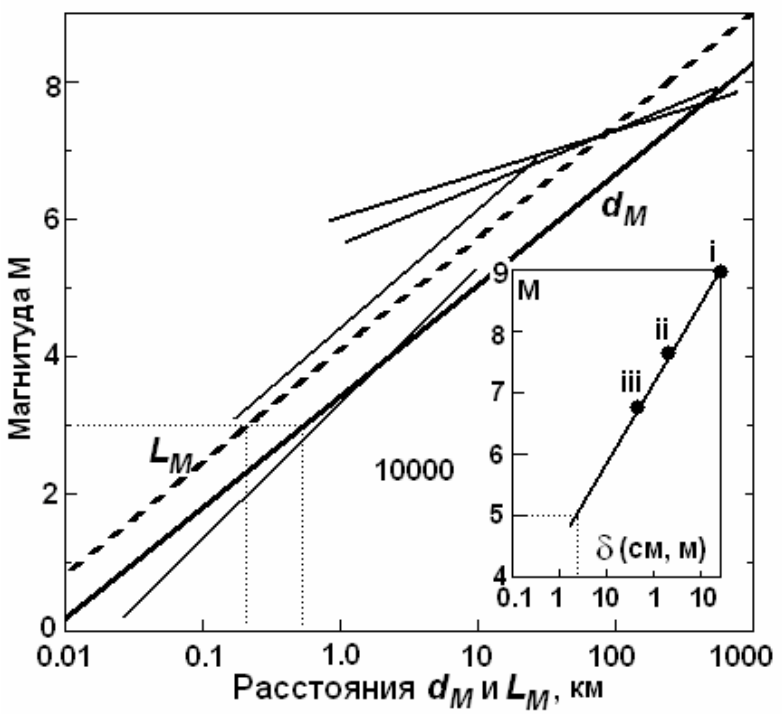


Рис. 9-7-а. Магнитуда землетрясения M – размер геоблока d_M, длина разлома L_M (Уломов, 1999). Тонкие линии – данные по длине разломов различных авторов. На врезке: зависимость M – δ. Точки показывают параметры землетрясений на Суматре (i), Алтае (ii) и в Калифорнии (iii).

Многочисленные наблюдения сейсмологов позволили выявить связь между магнитудой землетрясений и длиной разлома (тонкие линии на рис. 1). Для ГУ – длина разлома связана с размером шахты (геоблоком). Согласно (Уломов, 1999), магнитуда M = 4.7 соответствует $L_M \approx 2.5$ км, а $d_M \approx 8$ км. Линейный размер очага техногенного землетрясения вполне мог достигать такой величины. Оценим максимально возможные величины L_M и d_M учитывая известные размеры этой шахты. Размеры шахтного поля шахты Распадская: по простиранию - 12,7 км, по падению - 4,3 км, площадь - 54,5 кв.км. (http://premier.gov.ru/visits/ru/11167/info/11170/). Естественно считать максимальный размер шахты – размером геоблока. Согласно рис. 9-7-*а*, при размере геоблока $d_M \approx 13$ км, максимальная магнитуда землетрясения может достигать M = 5, длина разлома при этом: L_M = 3.8 км. Это очень сильное землетрясение, напомним, что это максимально возможное его значение для шахты размером с Распадскую. Например, для землетрясения магнитудой M = 6, $L_M \approx 15$ км, а $d_M \approx$ 50-60 км, что явно больше размеров среды, охваченной одной шахтой. В этом случае мы имеем дело уже с тектоническим землетрясением. Ещё один пример. Размер очага одного из самых сильных землетрясений, произошедших 26 декабря 2004 г. вблизи о. Суматра магнитудой M = 9, $L_M \approx 1000$ км.

Известно, что в момент землетрясения часть грунта разуплотняется и превышает прежний уровень на величину δ. Оценим связь между δ и магнитудой M из следующих соображений. По всей вероятности, она должна быть пропорциональна магнитуде

землетрясения M, предположим, что $M \sim lg\delta$. Из наблюдений, выполненных на Чуйском землетрясении 2003, $M = 7.5$, $\delta = 100$ см, на Нортриджском землетрясении (Калифорния) 1994: $M = 6.7$, $\delta = 50$ см. Для сравнения: при землетрясении на Суматре (2004) $M = 9$ разуплотнение достигало 20 м. Построим зависимость $M \sim lg\delta$, для трех известных землетрясений (врезка на рис. 7-9-*а*).

Изучение землетрясений. Изучением землетрясений занимается сейсмология. Сейсмические волны, возникающие при землетрясениях, используются также для изучения внутреннего строения Земли, достижения в этой области послужили основой для развития методов сейсмической разведки. Наблюдения за землетрясениями ведутся с древнейших времен. Детальные исторические описания, надежно свидетельствующие о землетрясениях с сер. 1 тыс. до н.э., даны японцами. Большое внимание сейсмичности уделяли и античные ученые – Аристотель и др. Систематические инструментальные наблюдения, начатые во 2-ой пол. 19 в., привели к выделению сейсмологии в самостоятельную науку (Б.Б.Голицын, Э.Вихерт, Б.Гутенберг, А.Мохоровичич, Ф.Омори и др.).

Длительность землетрясений. Продолжительность землетрясений различна, часто число подземных толчков образует рой землетрясений, включающих предшествующие (форшоки) и последующие (афтершоки) толчки. Распределение наиболее сильного толчка (главного землетрясения) внутри *роя* носит случайный характер. Магнитуда сильнейшего афтершока меньше на 1,2 чем у основного толчка, эти афтершоки сопровождаются своими вторичными сериями последующих толчков.

Суматра-Андаманское землетрясение стало не только одним из самых разрушительных, но и одним из самых затянувшихся природных катаклизмов за то время, пока ученые наблюдают за тектоникой планеты.

Международная группа сейсмологов с первого подземного толчка следит за развитием подземной динамики в этом регионе. Они утверждают, что случай Индонезии - уникальный. "Обычно землетрясения небольшой силы длятся не более секунды, толчки средней силы – около нескольких секунд, а Суматру трясло по 500-600 секунд (это почти 10 минут!)", - рассказывает ученый Чарльз Аммон.

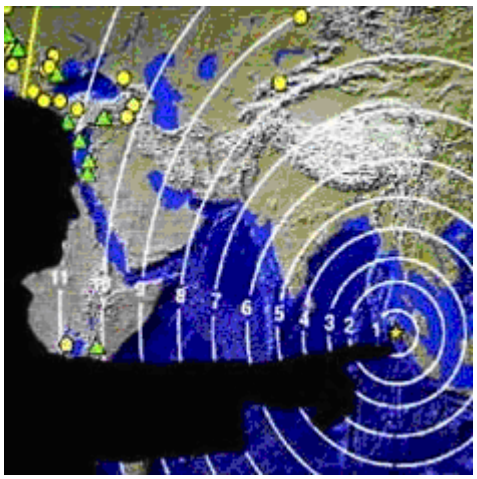


Рис. 9-7-*б*. Землетрясение на Суматре. 26.12.2004 00:58:50.7 UTC.

Профессор Университета Колорадо Роджер Билхам полагает, что "сила землетрясения была эквивалентна 100 гигатоннам взрывчатки!" Он также отмечает аномальную длительность подземных толчков.

Землетрясение, очаг которого находился в центре Индийского Океана, оставило в Земле гигантскую воронку диаметром почти 3 тыс. километров. Во многих местах острова грунт поднялся от 5 до 20 метров.

Длительность фронта основного удара землетрясения составляет около секунды. На рис. 9-8 приведена запись толчка Спитакского землетрясения 7.12.88. Вслед за первым ударом следует ещё более мощный афтершок. Это далеко не единственный случай, например, сильнейший афтершок с M >> 5.8 Ташкентского землетрясения произошел всего через 43 секунды после главного толчка, имевшего магнитуду M = 6.8. Эпицентр главного афтершока находился в 5¸6 километрах к юго-западу от эпицентра главного толчка и имел несколько меньшую глубину очага. В силу этого сейсмические лучи от этого афтершока пришли к строениям заведомо с несколько другой стороны и с другим углом выхода. При этом колебания от афтершока «наложились» на колебания, созданные главным толчком. Основной удар землетрясения в Нортридже 17.01.1994 состоял из трех следующих один за другим перекрывающих по основанию друг друга импульса с общим основанием длительностью 8 секунд. Анализ этих и других импульсов главного удара сильного землетрясения показывает, что фронт импульса не длиннее одной секунды.

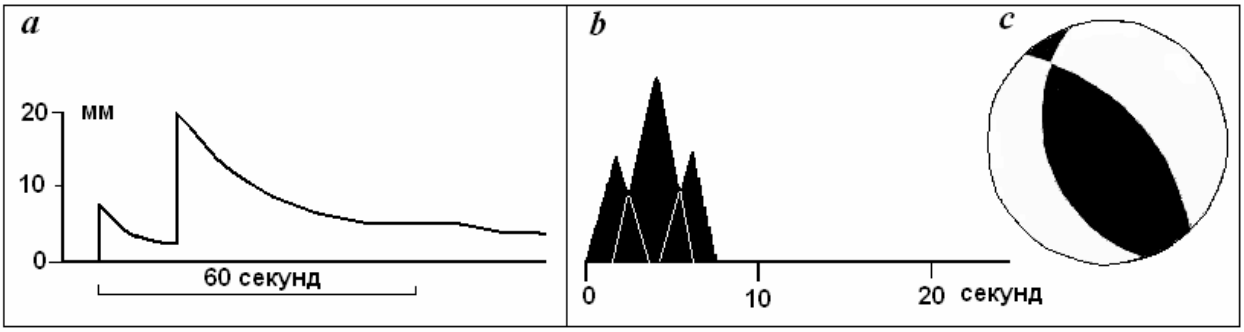


Рис. 9-8. Пример огибающих записей Спитакского землетрясения 7.12.88 с импульсным типом вступлений - *a*. Импульс Нортриджского землетрясения 17.01.1994 – *b*. Диаграмма первых вступлений (стереограмма) Нортриджского землетрясения (Механизм очага strike/dip/slip: 130/42/116) - *c* (Thio, Kanamori, 1996).

Параметры землетрясений. Очаги землетрясений располагаются на глубинах до 700 км, но большая часть (3/4) сейсмической энергии выделяется в очагах, находящихся на глубине до 70 км. Размер очага катастрофических землетрясений может достигать 100 × 1000 км. Его положение и место начала перемещения масс (гипоцентр) определяют путем регистрации сейсмических волн, возникающих при землетрясениях (у слабых землетрясений очаг и гипоцентр совпадают). Проекция гипоцентра на земную поверхность именуется эпицентром. Вокруг него располагается область наибольших разрушений (эпицентральная, или плейстосейстовая, область)

Диаграммы первых вступлений. Механизм очага землетрясения является одним из важнейших параметров, характеризующих сейсмическое событие. В современной сейсмологии он связывается с внезапной подвижкой горных пород, сопровождающейся излучением сейсмических волн по поверхности ослабленной прочности, и отражает одновременно пространственную ориентацию осей главных напряжений, возможных плоскостей разрывов и подвижек в очаге землетрясения.

История изучения механизма очага началась в начале 20-го века, когда профессор Сида из университета г. Киото (Япония) обнаружил, что на станциях, расположенных по разные стороны от эпицентра землетрясения, первые импульсы на сейсмограммах являются разнонаправленными и подчиняются некоторой закономерности. В разных азимутах первые смещения на сейсмограмме показывают либо направленность от очага

(сжатие на станции, или плюс), либо к очагу (растяжение на станции, или минус). Как правило, распределение импульсов противоположного знака позволяет провести две перпендикулярные линии, отделяющие области расширения (растяжения) от областей сжатия (модель двойного диполя). Эти линии получили название нодальных. Более того, достаточно закономерно "ведет себя" и амплитуда первых смещений: чем ближе станция расположена к нодальной линии, тем меньше амплитуда. Таким образом, нодальные линии образуют 4 квадранта, соседние квадранты имеют разные знаки вступлений, а противоположные - одинаковые.

В качестве входной информации используются, главным образом, знаки первых вступлений продольных волн (P). Выделить знаки вступлений поперечных волн (S) на фоне коды P-волн гораздо труднее. Кроме того, при определении механизма очага можно использовать отношения амплитуд разных типов волн (SV/P, SH/P, SV/SH).

Чтобы объяснить наблюдаемое распределение полярности первых вступлений сейсмических волн по азимуту, было предложено несколько теоретических моделей очага с разными системами сил, действующих в точечном источнике. Теория излучения упругих волн точечным источником начала разрабатываться еще в 19-ом столетии (теория упругости Лява); в сейсмологии основы теории сейсмических источников заложил Накано в 1923 г. Основными типами точечных источников являются: сосредоточенная сила, диполи (двойная сила) и центр расширения. Последний тип фактически не применим к тектоническим землетрясениям, т.к. механизм процесса разрушения в очаге представляется скольжением в плоскости разрыва (разлома). Многочисленные работы показали, что источник типа двойного диполя (комбинация двух диполей) с моментом или без момента наилучшим образом удовлетворяет наблюденным данным (рис. 9-9).

При графическом изображении механизма очага землетрясения, последний - представляется сферой единичного радиуса с центром в очаге. Учитывая центральную симметрию принятой теоретической картины излучения, при расчетах используют, как правило, половину фокальной сферы (верхнюю или нижнюю). Все точки, лежащие на верхней или нижней полусфере, проектируются на экваториальную стереографическую проекцию градусной сети шара, проходящую через центр последнего.

Стереограммы механизмов очагов, соответствующие основным типам смещений по разломам показаны на рисунке. Но чаще всего решение механизма очага представляет собой сочетание основных типов (например, сбросо-сдвиг, сдвиго-взброс и т.д.). Очень редко встречаются так называемые взрезы - тип смещений, при которых происходит вертикальное движение блоков друг относительно друга по вертикальной плоскости.

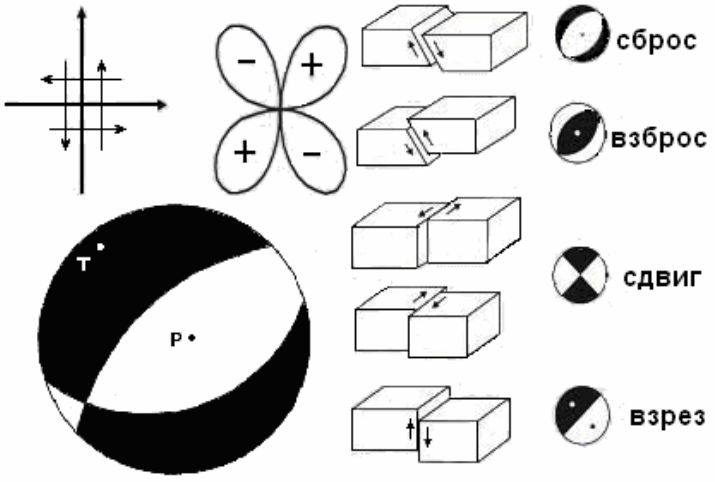


Рис. 9-9. Силовая модель очага землетрясения - двойная пара сил и диаграмма направленности для P-волн. Положение эпицентра и фокальный механизм землетрясения.

Типы смещений по разломам и соответствующие им стереограммы фокальных механизмов.

Помимо нодальных плоскостей механизм очага показывает ориентацию главных осей напряжений растяжения (T) и сжатия (P), под действием которых и происходит подвижка. Поскольку механизм очага оценивается ретроспективно, то ось сжатия P находится в квадранте минусов, а ось растяжения T - в квадранте плюсов. Оси напряжений характеризуются азимутом (AZ) и углом их погружения относительно горизонта (PL). В зависимости от ориентации осей напряжений выделяется несколько режимов напряженного состояния земной коры. При горизонтальном растяжении и вертикальном сжатии создаются условия растяжения, при горизонтальном положении обеих осей - условия сдвига, и при вертикальном растяжении и горизонтальном сжатии наблюдается режим сжатия. Очевидно, что в первом случае доминирующим типом смещения будут являться сбросы, во втором сдвиги и в последнем взбросы (надвиги).

9. 5. Сейсмографы.

Принцип действия сейсмических датчиков – сейсмометров, - образующих систему сейсмографа, в которую входят такие узлы - сейсмометр, преобразователь его механического сигнала в электрическое напряжение и регистратор - накопитель информации, основан сразу на первом и третьем законе Ньютона - свойстве масс к инерции и к тяготению. Главным элементом устройства любого сейсмометра является масса, имеющая некий подвес к основанию прибора. В идеале масса не должна иметь каких-либо механических или электромагнитных связей с корпусом. Просто висеть в пространстве! Однако это пока нереализуемо в условиях притяжения Земли. Различают вертикальные и горизонтальные сейсмометры. Во-первых, масса имеет возможность перемещения только в вертикальной плоскости и обычно вывешена с помощью пружины для противодействия силе притяжения Землей. В горизонтальных сейсмометрах масса имеет степень свободы только в горизонтальной плоскости. Положение равновесия массы сохраняется как с помощью гораздо более слабой пружины подвеса (как правило, плоские пластины) и возвращающей силой притяжения Земли, которая сильно ослаблена реакцией почти вертикально расположенной осью подвеса и действует в почти горизонтальной плоскости перемещения массы.

Наиболее древние устройства для фиксации актов землетрясения обнаружены и восстановлены в Китае (Саваренский, Кирнос, 1955). Прибор не имел средств записи, а только помогал определению силы землетрясения и направление на его эпицентр. Такие приборы называются сейсмоскопами. Древний китайский сейсмоскоп относится к 123 г. нашей эры и представляет собой произведение искусства и инженерной техники. Внутри художественно оформленного сосуда находился астатический маятник. Масса такого маятника располагается выше упругого элемента, который поддерживает маятник в вертикальном положении. В сосуде по азимутам расположены пасти драконов, в которых помещены металлические шарики. При сильном землетрясении маятник ударял по шарикам и они сваливались в маленькие сосуды в форме лягушек с открытыми ртами. Естественно, максимальные удары маятника приходились вдоль азимута на очаг землетрясения. По шарикам, обнаруживаемым в лягушках можно было определить, откуда пришли волны землетрясения. Подобные приборы называются сейсмоскопами. Они широко используются и сейчас, давая ценную информацию о сильных землетрясениях в массовых масштабах на большой территории. В Калифорнии (США) размещены тысячи сейсмоскопов с записью астатическими маятниками на сферическом стекле, покрытом сажей. Обычно, видна сложная картина движения острия маятника по стеклу, - в которой можно выделить колебания продольных волн, указывающие направление на очаг. А максимальные амплитуды траекторий записи дают представление о силе землетрясении. Период колебаний маятника и его затухание заданы таким образом,

чтобы моделировать поведение типичных построек и, таким образом, оценивать бальность землетрясений. Бальность землетрясений определяется по внешним характеристикам воздействия колебаний на человека, животных, деревья, типичные здания, мебель, посуду и т.п. Существую разные шкалы бальности. В средствах массовой информации применяется "бальность по шкале Рихтера". Это определение рассчитано на массового жителя и не соответствует научной терминологии. Правильно говорить - магнитуда землетрясения по шкале Рихтера. Она определяется по инструментальным измерениям с помощью сейсмографов и условно обозначает логарифм максимальной скорости записи, отнесенное к очагу землетрясения. Такая величина условно показывает выделившуюся энергию упругих колебаний в очаге землетрясения.

Подобный сейсмоскоп сделал в 1848 году итальянец Каччиаторе, в котором маятник и шарики заменены ртутью. При колебаниях грунта ртуть выливалась в сосуды, расположенные равномерно по азимутам. В России используются сейсмоскопы С.В.Медведева, в Армении разработаны сейсмоскопы АИС А.Г.Назарова, в которых применены несколько маятников, имеющих разные частоты. Они дают возможность грубо получать спектры колебаний, т.е. зависимость амплитуды записей от частот колебаний при землетрясении. Это ценная информация для проектировщиков антисейсмических построек.

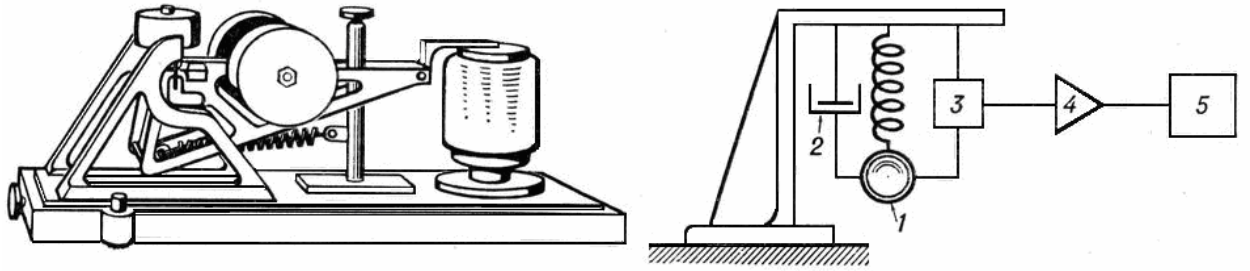


Рис. 9-10. Внешний вид сейсмометра СКМ-3 (слева). Схема сейсмографа: 1 — груз сейсмометра; 2 — демпфер (устройство для гашения собственных колебаний груза); 3 — преобразователь движения груза в электрический сигнал; 4 — фильтр-усилитель; 5 — самописец (справа).

Первый сейсмограф, имевший научное значение, был построен 1879 г. в Японии Юингом. В качестве груза для маятника было чугунное кольцо весом 25 кг, подвешенное на стальной проволоке. Общая длина маятника составила почти 7 метров. За счет длины получен момент инерции в 1156 кг·м^2. Относительные перемещения маятника и грунта записывались на закопченном стекле, вращающемся вокруг вертикальной оси. Большой момент инерции способствовал снижению влияния трения острия маятника о стекло. В 1889 г. японский сейсмолог опубликовал описание горизонтального сейсмографа, послужившего прототипом для большого числа сейсмографов. Подобные сейсмографы изготавливались в Германии в 1902-1915 гг. При создании механических сейсмографов задача повышения чувствительности могла быть решена только с помощью увеличительных рычагов Архимеда. Сила трения при записи колебаний преодолевалась за счет огромной массы маятника. Так сейсмограф Вихерта имел маятник с массой 1000 кг. При этом достигалось увеличение всего 200 для периодов записываемых колебаний не выше собственного периода маятника 12 сек. Наибольшей массой обладал вертикальный сейсмограф Вихерта, вес маятника которого был 1300 кг, подвешенный на мощных винтовых пружинах из 8 мм стальной проволоки. Чувствительность составила 200 для периодов сейсмических волн не выше 5 сек. Вихерт был великим изобретателем и конструктором механических сейсмографов и построил несколько разных и остроумных приборов. Запись относительного движения инертной массы маятников и грунта осуществлялась на закопченной бумаге, вращаемой непрерывной лентой часовым механизмом.

Переворот в технике сейсмометрии произвел блестящий ученый в области оптики и математики князь Б.Б.Голицын. Он изобрел способ гальванометрической записи землетрясений, т.о. Россия стала основоположницей в мире сейсмографов с гальванометрической регистрацией. Впервые в мире им разработана теория сейсмографа в 1902 году. Он создал сейсмограф и организовал первые сейсмические станции, на которых были установлены новые приборы. Германия имела опыт производства сейсмографов и первые сейсмометры Голицына были изготовлены там. Однако записывающий аппарат был спроектирован и изготовлен в мастерских Российской Академии Наук в Петербурге. И до сих пор этот аппарат носит все характерные черты первого регистрира. Барабан, на котором закреплялась фотобумага длиной почти 1 м и шириной 28 см, приводился во вращательное движение со смещением при каждом обороте на выбранное и сменяемое согласно задаче наблюдений расстояние вдоль оси барабана. Разделение сейсмометра и средства записи относительных движений инертной массы прибора было настолько прогрессивным и удачным, что подобные сейсмографы получили всемирное признание на многие десятилетия вперед. Б.Б.Голицын выделил следующие преимущества нового способа регистрации:

1. Возможность простым приемом получать большую по тем временам чувствительность .
2. Осуществление регистрации на расстоянии от места установки сейсмометров. Удаленность, сухое помещение, доступность к сейсмическим записям для дальнейшей их обработки придали новое качество процессу сейсмических наблюдений и исключение нежелательных воздействий на сейсмометры со стороны персонала сейсмической станции.
3. Независимость качества записи от *дрейфа* нуля сейсмометров.

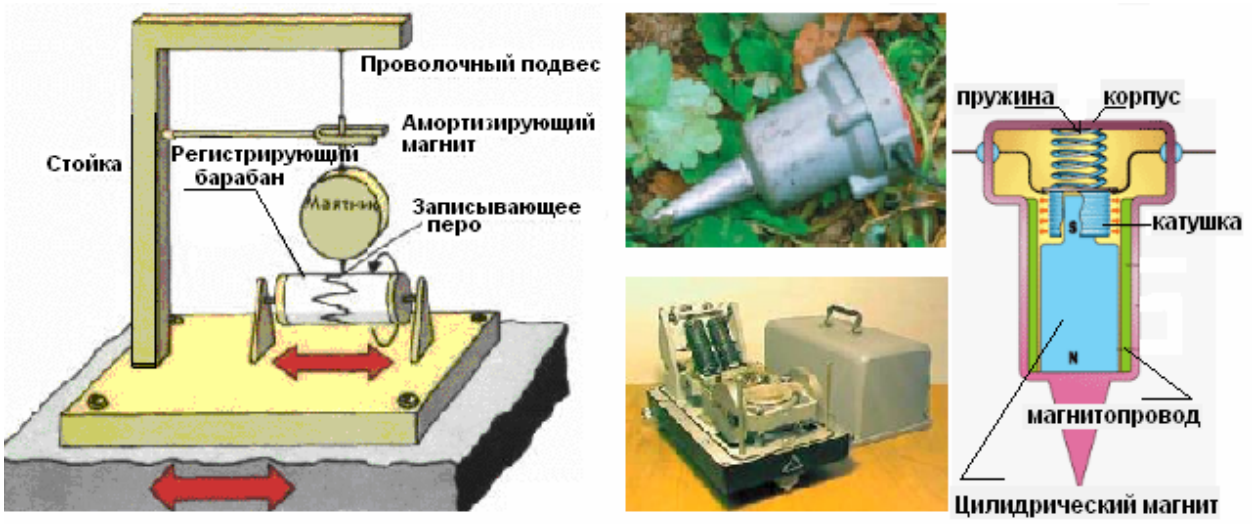


Рис. 9-11. Различные сейсмографы, внешний вид и устройство. Вертикальный сейсмометр установки КСЭШ-Р со снятым корпусом.

Эти главные преимущества и определили на многие десятилетия развитие и использование гальванометрической регистрации во всем мире.

Вес маятника не имел такого значения, как в механических сейсмографах. Было только одно явление, которое надо было учитывать - магнитоэлектрическая реакция рамки гальванометра, находящейся в воздушном зазоре постоянного магнита, на маятник

сейсмометра. Как правило, эта реакция уменьшала затухание маятника, что приводило к возбуждению лишних собственных его колебаний, искажавших волновую картину записываемых волн от землетрясений. Поэтому Б.Б.Голицын использовал массу маятников порядка 20 кг, чтобы пренебречь обратной реакцией гальванометра на сейсмометр.

Сейсмическая служба http://slovari.yandex.ru/dict/bse/article/00069/81200.htm - выполняет комплекс работ по непрерывным наблюдениям за землетрясениями и обработке материалов по стандартным программам и методике. Наблюдения ведутся сетью сейсмических станций. Главная задача сейсмической службы (СС) - систематическое определение основных параметров очагов землетрясений (координаты гипоцентра, время возникновения удара в очаге, энергетическая характеристика и др.). Исходным материалом для обобщения являются сейсмограммы и первичные бюллетени сейсмических станций.

СС осуществляется в ряде стран мира: в России создана Единая система сейсмических наблюдений (ЕССН), в США — Национальная сейсмическая служба (NOS), в Японии — Японское метеорологическое агентство (JMA). Национальные сейсмологические центры обобщают материалы наблюдений сейсмических станций отдельных стран. Для детального изучения сейсмичности организуются региональные СС. Современные тенденции в развитии СС заключаются в создании сети автономных необслуживаемых сейсмических станций, систем группирования с телеметрической передачей информации, регистрации её в цифровом виде и широком обобщении данных с применением ЭВМ. Международная СС ведётся Международным сейсмологическим центром в Великобритании, где обобщаются данные большинства сейсмических станций мира. Первичная информация со станций передаётся в сейсмологический центр в виде данных о времени вступления и амплитудах сейсмических волн в специальном виде. Далее осуществляется обработка сейсмологических данных на ЭВМ. В результате систематически определяются координаты гипоцентра и магнитуда землетрясения.

Данные наблюдений СС используются для изучения сейсмичности и строения Земли, а также процессов в очагах землетрясений.

По мере развития представлений о строении Земли, очагах землетрясений, методов оценки сейсмической опасности задачи СС расширяются (например, вводится систематическое определение дополнительных параметров очагов землетрясений — механизма очага, его размеров и др.). Предполагается составление статистических обобщений о землетрясениях, специальных сейсмологических таблиц об особенностях распространения сейсмических волн и др.

Данные СС публикуются в "Сейсмологических бюллетенях сети опорных сейсмических станций России" (с 1962); "Землетрясениях в СССР" (Ежегодник, с 1964); "Bulletin of the International Seismological Centre" (Edin., с 1967); "The Seismological Bulletin of the Japan Meteorological Agency" (Tokyo, Japan, с 1951).

9. 6. Сейсмические волны.

Функция Грина в динамической теории упругости (Аки, Ричадрс. 1983)**.** Для получения математического представления о смещениях, типичных для задач сейсмологии, - получено представление в виде формулы, выражающей смещение (в произвольной точке пространства и времени) через величины, вызвавшие движение. Согласно теореме единственности, таковыми являются объемные силы, напряжения, приложенные к поверхности рассматриваемого упругого тела, или смещения на этой поверхности. В разрывных движениях, связанных с землетрясениями, сейсмический источник сложный: он охватывает конечную часть плоскости разрыва (или конечный объем) и действует в течение конечного времени, и в общем случае ему

соответствуют движения (в очаге) различного направления и величины. Теорема представления — не что иное, как технический прием, при помощи которого смещение от реалистической модели источника синтезируется из смещений, вызванных простейшим из источников, а именно однонаправленным единичным импульсом, точно локализованным в пространстве и времени.

Смещение от такого простого источника - есть функция Грина динамической теории упругости. Если единичный импульс приложен в $x = \xi$ и $t = \tau$ в n-ом направлении, то мы обозначаем i-ю компоненту смещения в произвольных (x, t) как $G_{in}(x, t; \xi, \tau)$. Очевидно, что эта функция Грина – тензор.

Она зависит от координат приемника и источника и удовлетворяет в V уравнению

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} G_{in} = \delta_{in}\delta(x-\xi)\delta(t-\tau) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(c_{ijkl} \frac{\partial}{\partial x_i} G_{kn} \right) \tag{9.10}$$

В качестве начальных условий принято, что $G(x, t; \xi, \tau)$ и $\partial[G(x, t; \xi, \tau)]/dt$ равны нулю при $t \leq \tau$ и $x \neq \xi$. Чтобы однозначно определить G, необходимо только задать граничные условия на S; в различных приложениях мы будем использовать набор различных граничных условий.

Если граничные условия не зависят от времени (например, S всегда абсолютно жестко), то начало отсчета времени можно произвольно сдвигать, и мы видим из (9.10), что G зависит от t и τ только в комбинации $(t - \tau)$. Отсюда

$$G(x, t; \xi, \tau) = \mathbf{G}(x, t - \tau; \xi, 0) = G(x, -\tau; \xi, -t), \tag{9.11}$$

что является соотношением взаимности для времен источника и приемника.

Если G удовлетворяет на S однородным граничным условиям, можно использовать (9.10), чтобы получить важные соотношения взаимности для пространственных положений источника и приемника. Пусть f - единичный импульс, приложенный в m-ом направлении в $x = \xi_1$, в момент времени $t = \tau$, и g - единичный импульс, приложенный в n-м направлении в $x = \xi_2$ в момент времени $t = -\tau_2$. Тогда

$$u_i = G_{im}(x, t; \xi_1, \tau_1) \quad \text{и} \quad v_i = G_{in},(x, t: \xi_2 \ -\tau_2),$$

так что непосредственно вытекает

$$G_{nm}(\xi_2, \tau + \tau_2; \xi_1, \tau_1) = G_{mn}(\xi_1, \tau - \tau_1; \xi_2, -\tau_1). \tag{9.12}$$

Пусть $\tau_1 = \tau_2 = 0$. Тогда

$$G_{mn}(\xi_2, \tau; \xi_1, \tau_1) = G_{mn}(\xi_1, \tau; \xi_2, 0) \tag{9.13}$$

что указывает на чисто пространственную взаимность. Принимая в (9.13) $\tau = 0$, получаем

$$G_{mn}(\xi_2, \tau; \xi_1, \tau_1) = G_{mn}(\xi_1, -\tau_1; \xi_2, -\tau_2), \tag{9.14}$$

что устанавливает пространственно-временную взаимность.

Практическое вычисление функции Грина динамической теории упругости может быть связано с большими трудностями. Этот вопрос рассматривается для простейших упругих тел (однородных, изотропных, неограниченных), а также для случая больших расстояний между источником и приемником в неоднородных средах.

Теоремы единственности и взаимности. Рассмотрение вопросов единственности (для поля смещений u в теле с объемом V и поверхностью S) естественно начать с нескольких общих замечаний о способах определения движений. Мы покажем, что достаточно задать объемные силы внутри V и напряжения по всей S, чтобы единственным образом определить поле смещений, возникающих в V, относительно заданных начальных условий. Другой возможный способ оценить влияние S на поле смещений состоит в задании граничных условий для самих смещений (на поверхности S) вместо напряжений.

Например, S может быть абсолютно жесткой. Может показаться, что напряжение на S и смещение на S — независимые характеристики поля смещений в объеме V. Однако это не так, важно осознать, что напряжения на S определяют смещения на S, и наоборот.

Смещение $u = u(x, t)$ внутри объема V с поверхностью S однозначно определяется, начиная с момента t_0 начальными значениями смещения и скорости частиц в момент t_0 в V и значениями на всех временах $t \geq t_0$ следующих величин:
- объемных сил f и тепла D поступающего в V;
- напряжений T в любой части S_1, поверхности S;
- смещений на S_2 (оставшейся части S, т.е. $S_1 + S_2 = S$) (S_1или S_2 может совпадать с S).

Теорема взаимности. Сформулируем несколько общих соотношений между парой решений для смещений в упругом теле объемом V.

Положим, что $u = u(x, t)$ — одно из этих полей смещений, вызванное объемными силами f, граничными условиями на S и начальными условиями в момент $t = 0$. Пусть $v = v(x, t)$ - другое поле смещений, порожденное объемными силами g при граничных условиях на S и начальных условиях при $t = 0$, в общем отличных от условий для u. Чтобы различить напряжения на поверхностях, нормальных к n в этих двух случаях, мы будем использовать обозначения $T(u, n)$ для напряжений при смещениях u и, аналогичным образом, $T(v, n)$ для напряжений при смещениях v.

Если существует такой момент τ_0, до которого u и v равняются нулю по всему V (и, следовательно, $du/dt = dv/dt = 0$ при $\tau \leq \tau_0$) то свертка

$$\int_{-x}^{x} \rho\{\ddot{u}(t) \cdot v(\tau - t) - u(t) \cdot v(\tau - t)\} dt \,, \tag{9.15}$$

равна нулю.

Теорема Ламе. Если поле смещений $u = u(x, t)$ удовлетворяет условию:

$$\rho\ddot{u} = f + (\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot u) - \mu\nabla \times (\nabla \times u) \tag{9.16}$$

И если объемная сила и начальные значения du/dt и u выражаются через потенциалы Гельмгольца как:

$$f = \nabla\Phi + \nabla \times \Psi; \dot{u}(x, 0) = \nabla \times B; u(x, 0) = \nabla C + \nabla \times D, \tag{9.17}$$

с нулевыми $\nabla \cdot \Psi . \nabla \cdot B . \nabla \cdot D$,

то существуют потенциалы φ и ψ для u, обладающие следующими четырьмя свойствами:

$$1)\ u = \nabla\varphi + \nabla \times \psi; \tag{9.18}$$

$$2)\ \nabla \cdot \psi = 0; \tag{9.19}$$

$$3)\ \ddot{\varphi} = \frac{\Phi}{\rho} + \alpha^2 \nabla^2 \varphi \quad \left(\alpha^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right); \tag{9.20}$$

$$4)\ \ddot{\psi} = \frac{\Psi}{\rho} + \beta^2 \nabla^2 \psi \quad \left(\beta^2 = \frac{\mu}{\rho}\right). \tag{9.21}$$

($\nabla\varphi$ и $\nabla \times \psi$ называются соответственно P и S- компонентами u.

Свойства P-волны в дальней зоне. Введем понятие P-волны в дальней зоне, для которой смещение u^P в виде:

$$u_i^P(x, t) = \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \gamma_i \gamma_j \frac{1}{r} X_o\left(t - \frac{r}{\alpha}\right). \tag{9.22}$$

Тогда вдоль данного направления γ от источника эта волна:

1) затухает как r^{-1};

2) имеет форму колебания, зависящую от пространствнно-временной комбинации $t - r/\alpha$, и, следовательно, распространяется со скоростью α. Для $t = 0$ r/α - время прихода Р-волны в r;

3) имеет амплитуду смещения, пропорциональную приложенной силе в задержанный момент времени;

4) направление смещения u^P в x параллельно направлению γ от источника.

Свойства S-волны в дальней зоне. Волна S в дальней зоне несёт смещение u^S вида:

$$u_i^S(x,t) = \frac{1}{4\pi\rho\beta^2}(\delta_{ij} - \gamma_i\gamma_j)\frac{1}{r}X_o\left(t - \frac{r}{\beta}\right). \qquad (9.23)$$

Вдоль единичного вектора γ, направленного от источника к приемнику, эта волна:

1) затухает как r^{-1};

2) имеет время прихода S-волны в r; равное r/β и распространяется со скоростью β.

3) имеет амплитуду смещения, пропорциональную приложенной силе в задержанный момент времени;

4) направление смещения u^S в x перпендикулярное направлению γ от источника. Следовательно, в дальней зоне S-волна – *поперечная волна,* поскольку направление движения частиц в ней нормально направлению распространения.

Диаграммы излучения и приведены на рис. 9-12.

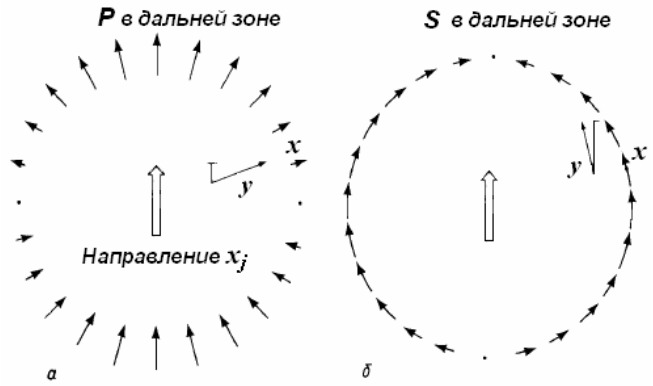


Рис. 9-12. Диаграммы направленности излучения волн Р и S в дальней зоне точечной силой, действующей в направлении x_j.

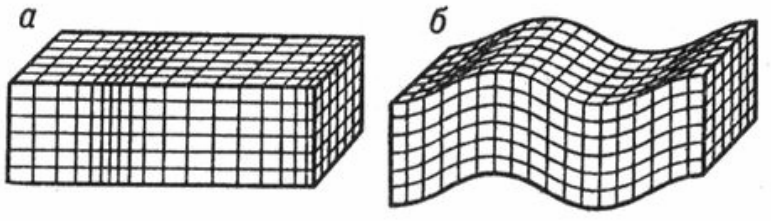


Рис. 9-13. Характер движения частиц в волнах Р (*а*) и S (*б*).

Годограф сейсмических волн. Годографом сейсмической волны называется график зависимости времени пробега волны от источника до приемника волны (регистрирующего устройства) от эпицентрального расстояния. Эпицентральное расстояние - это угол с вершиной в центре шара, которым изображается Земля, а сторонами этого угла являются радиус-векторы источника и приемника.

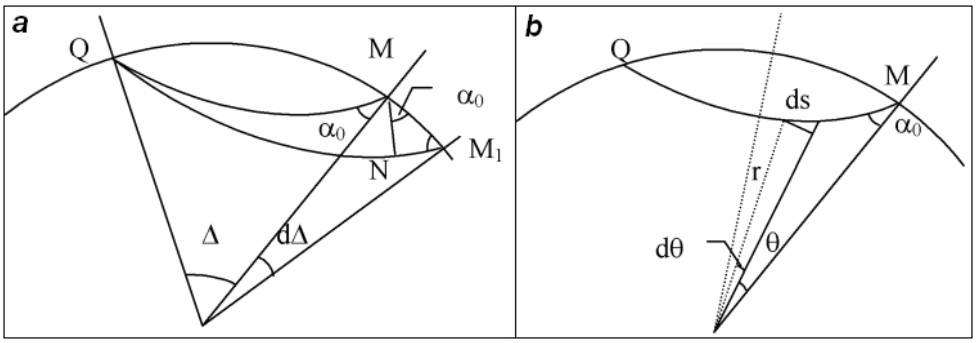


Рис. 9-14. Схемы сейсмических лучей.

Из закона Снелиуса следует, что сейсмический луч, направленный внутрь Земли, будет отклоняться от нормали к сферическому пласту, так как с увеличением глубины скорость упругих колебаний, за редким исключением, увеличивается. Поэтому сейсмический луч, который вышел из точки Q на поверхности Земли, погрузившись на некоторую глубину, снова выйдет на поверхность в точке M, где установлен сейсмоприемник (сейсмостанция). Другой луч из той же точки, почти совпадающий с первым, выйдет на поверхности в точке M_1 (рис.9-14-а).

Опустим перпендикуляр из точки M на второй луч. Точку пересечения этого перпендикуляра с траекторией второго луча обозначим через N. Точки M, N, M_1 образуют треугольник. Примем за основание этого треугольника сторону N M_1. Угол при вершине обозначим через α_o - это угол падения первого луча на поверхность раздела, в частности, на поверхность Земли. Тогда увеличение пути второго луча по отношению к первому, будет равно $NM_1 = MM_1 \sin \alpha_o$. Пусть время, которое необходимо, чтобы волна достигла точки M равно $T(\Delta)$, а точки M_1 – соответственно $T(\Delta + d\Delta)$, где $d\Delta$ - приращение эпицентрального расстояния, равное MM_1/r_o

Следовательно, $dT(\Delta) = T(\Delta + d\Delta) - T(\Delta) \approx \frac{NM_1}{v_o} \sin \alpha_o = \frac{r_o \sin \alpha_o}{v_o} d\Delta$.

Отсюда следует:

$$\frac{dT(\Delta)}{d\Delta} = \frac{r_o \sin \alpha_o}{v_o} \quad . \tag{9.24}$$

В полученной формуле индекс "0" означает, что соответствующие величины относятся к приповерхностному слою на выходе сейсмического луча. Однако, можно показать, что величина приведенного отношения не изменяется вдоль всей траектории луча, он является параметром луча $p = \frac{r \sin \alpha}{v}$. Остается выяснить, каким образом с помощью параметра луча, который можно получить из годографа, определить изменение скорости в зависимости от радиус-вектора $\vec{r}$.

Обозначим изменение эпицентрального расстояния от текущей точки до точки M через θ, тогда элементарную длину дуги на траектории луча можно определить из выражения $ds^2 = dr^2 + (rd\theta)^2$, которое следует из элементарного треугольника, изображенного на рис. 9-14. Но $rd\theta = ds \sin \alpha$, поэтому $ds = rd\theta / \sin \alpha$. Выразим sinα через параметр луча $\sin \alpha = vp/r$. Теперь $ds = (r^2/vp)d\theta$. Введем обозначение: $\eta = r/v(r)$.

Теперь полученное выражение будет выглядеть так: $ds = r\frac{\eta}{p} d\theta$. Следовательно, $\left(r\frac{\eta}{p} d\theta \right)^2 = dr^2 + (rd\theta)^2$. С помощью элементарных преобразований приходим к выражению $dr = \sqrt{\frac{\eta^2}{p^2} - 1} rd\theta$. Следовательно, $d\theta = \frac{pdr}{r\sqrt{\eta^2 - p^2}}$. Чтобы получить

эпицентральное расстояние нужно проинтегрировать полученное выражение по r от точки, где расстояние текущей точки на траектории луча находится на наименьшем расстоянии от центра сферы до точки на поверхности (точка выхода луча), а результат удвоить. Такая простая схема возникает лишь при гипотезе о сферически симметричной Земле, так как только в этом случае самая глубокая точка траектории делит ее пополам.
Итак,

$$\Delta = 2\int_{r_{\min}}^{r_0} \frac{pdr}{r\sqrt{\eta^2 - p^2}}. \qquad (9.25)$$

Мы получили интегральное уравнение относительно функции $\eta(r)$, с помощью которой легко определяется и скорость сейсмической волны: $v(r) = r/\eta(r)$.
Один из примеров годографа приведен на рис.9-15.

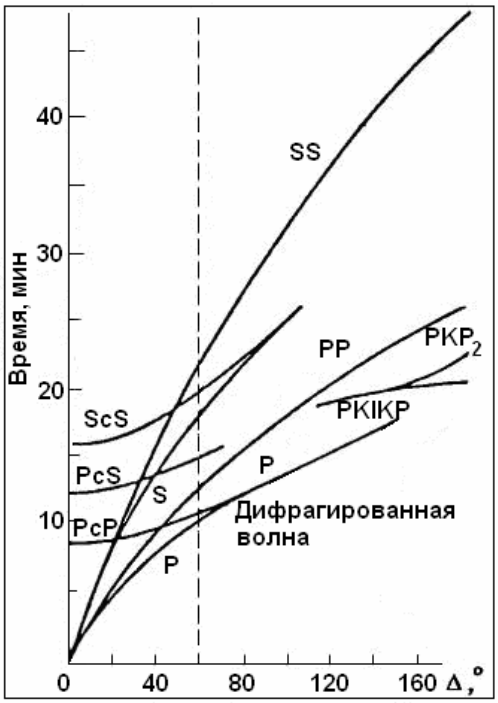


Рис. 9-15. Сейсмический годограф.

Деформации и напряжения в сплошной среде. Модули упругости. В изотропной среде упругие свойства не зависят от направления. Количество упругих модулей уменьшается до двух λ и μ - называемых коэффициентами Ламэ. В этом простейшем случае компоненты напряжений выражаются через компоненты деформаций следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda\Theta + 2\mu\gamma_{xx}; \tau_{xy} = \mu\gamma_{xy}; \\ \sigma_y &= \lambda\Theta + 2\mu\gamma_{yy}; \tau_{xz} = \mu\gamma_{xz}; \\ \sigma_z &= \lambda\Theta + 2\mu\gamma_{zz}; \tau_{yz} = \mu\gamma_{xz}; \end{aligned} \qquad (9.26)$$

где $\Theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ - дилатация.

В различных задачах оперируют с пятью различными модулями упругости для изотропной среды, включая λ и μ, из которых только два являются независимыми.

1. Модуль Юнга (E), определяющий связь между нормальным напряжением и продольной деформацией в стержне.

2. Коэффициент Пуассона (σ) – значение отношения поперечной и продольной деформаций стержня при его продольном растяжении или сжатии.

3. Модуль всестороннего (объемного) сжатия (K) характеризует связь между объемной деформацией (дилатацией) и величиной равномерного всестороннего давления, т.е. суммой нормальных напряжений.

4. Модуль сдвига (μ) характеризует связь между деформацией скошения прямого угла, например, γ_{xy} и касательным напряжением τ_{xy}.

5. Модуль λ - коэффициент при дилатации в уравнении связи между деформациями сжатия-расширения и нормальными напряжениями. В жидких и газообразных средах, где отсутствуют сдвиговые деформации ($\mu = 0$), модуль λ численно равен модулю объемного сжатия K.

Ниже приводятся основные зависимости между указанными модулями для изотропной среды:

$$K = \frac{1}{3}\cdot\frac{E}{1-2\sigma} = \frac{2\mu(1+\sigma)}{3(1-2\sigma)} = \lambda + \frac{2}{3}\mu;$$
$$\mu = \frac{1}{2}\cdot\frac{E}{1+\sigma} = \frac{3K(1-2\sigma)}{2(1+\sigma)} = \frac{3}{2}(K-\lambda) = \frac{\lambda(1-2\sigma)}{2\sigma}; \qquad (9.27)$$
$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} = \frac{3K\sigma}{1+\sigma} = K - \frac{2}{3}\mu = \frac{2\sigma\mu}{1-2\sigma}.$$

Отсюда нетрудно найти выражение E и σ через любую пару других параметров.

Волны в однородной безграничной среде. Обозначим через X, Y, Z составляющие внешних массовых сил, действующих на элемент объема δV, через j_x, j_y, j_z – проекции полного ускорения центра тяжести элемента δV по осям координат, вызванного силами инерции. Силы, согласно принципу Даламбера, пропорциональны ускорениям, т.е. вторым производным компонент смещений во времени.

Элемент объема находится в равновесии, которое для любых полей напряжений в случае изотропной среды записываются в виде:

$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\Theta}{\partial x} + \mu\nabla^2 u + \rho X = \rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2};$$
$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\Theta}{\partial y} + \mu\nabla^2 v + \rho Y = \rho\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \qquad (9.28)$$
$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\Theta}{\partial z} + \mu\nabla^2 w + \rho Z = \rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}.$$

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа.

При отсутствии внешних сил, т.е. когда действуют только силы инерции, возникающие в процессе установившихся колебательных движений, в этих уравнениях следует положить $X = Y = Z = 0$. В этом случае путем формальных преобразований можно получить два фундаментальных уравнения:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma \ge 0).$$

Где составляющие вектора $rot\vec{u} = \vec{\omega}$ определяются выражениями

$$\omega_x = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}\right); \omega_y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right); \omega_z = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right); \qquad (9.29)$$

Из системы уравнений непосредственно следуют уравнения:

$$\nabla^2\vec{u} = \frac{1}{{v_P}^2}\frac{\partial^2\vec{u}}{\partial t^2};$$
$$\nabla^2\vec{u} = \frac{1}{{v_S}^2}\frac{\partial^2\vec{u}}{\partial t^2}. \qquad (3.30)$$

Первое из уравнений описывает распространение продольных (компрессионных), второе – поперечных (сдвиговых) волн. Скорости v_P и v_S выражаются через упругие параметры и плотность, т.е.

$$v_P = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}}; v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \qquad (9.31)$$

Отношение их зависит только от коэффициента Пуассона:

$$\frac{v_S}{v_P} = \gamma = \sqrt{\frac{(1-2\sigma)}{2(1-\sigma)}}. \qquad (9.32)$$

Отсюда следует, что в сплошной среде, для которой выполняется закон Гука, $\frac{v_S}{v_P}$ не может быть больше $\frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma \geq 0)$.

В совокупности продольные и поперечные волны, вызванные массовыми силами, называются объемными волнами.

Особенности распространения сейсмических волн (Пузырев, 1997)**.** В однородном полупространстве, кроме объемных продольных и поперечных, могут существовать поверхностные волны Рэлея, распространяющиеся вдоль свободной границы. Амплитуда их быстро убывает по мере удаления от свободной границы. При наблюдениях на поверхности однородной среды амплитуды волн Рэлея убывают с расстоянием по закону $r^{-1/2}$, т.е. медленнее, чем объемных P- и S-волн.

Поверхностные волны Рэлея имеют эллиптическую поляризацию, при этом вертикальная компонента по абсолютной величине всегда больше горизонтальной. Кроме того, горизонтальная компонента значительно быстрее убывает с глубиной и при некоторых значениях глубин ($z \approx 0.2\ \lambda$s) обращается в нуль. При $z > 0.2\ \lambda$s направление движения частиц по эллипсу изменяется на противоположное. Необходимо отметить, что в однородном полупространстве волна Рэлея не обладает дисперсией, т.е. фазовые и групповые скорости не зависят от частоты и равны друг другу. Скорость распространения волны Рэлея V_R всегда ниже скорости V_S.

Отражение и преломление упругих волн подчиняется законам геометрической оптики, в частности, закону Снеллиуса. Распространение сейсмических волн в горных породах представляет собой сложный процесс, характеризуемый рядом параметров: динамических и кинематических. К кинематическим параметрам относится изучение фронтов и лучей, что связано со временем распространения волн. К динамическим, – амплитуда и энергия, форма импульса и спектральные особенности, пространственная поляризация и особенности интерференции. Такие характеристики среды, как глубины и формы залегания сейсмических границ, величины скоростей распространения волн и т.д., находятся на основе изучения времен вступления импульсов, которые измеряются с более высокой точностью, чем, например, амплитуды смещения почвы.

В изотропной неоднородной среде лучи всегда перпендикулярны фронтам волн, поэтому, зная конфигурацию лучей, можно однозначно определить распределение фронтов.

Приведем некоторые данные о скоростях распространения сейсмических волн. Согласно формулам 9.31, скорости V_P и V_S обратно пропорциональны корню квадратному из плотности. В действительности, как показывают многочисленные измерения, для

горных пород имеет место противоположная зависимость (рис. 9-16) – с увеличением плотности скорость растет. Это связано с тем, что с уплотнением породы за счет горного давления, существенно возрастают модули упругости (E, K, μ).

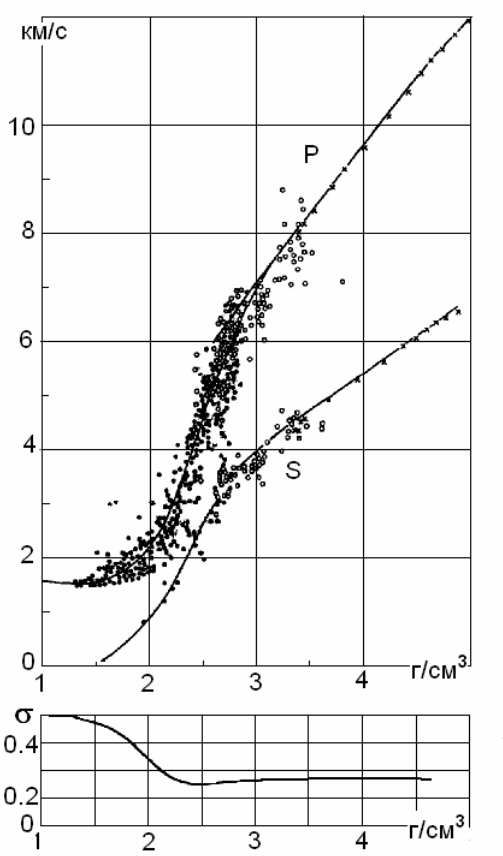


Рис. 9-16. Зависимость между плотностью и скоростями Vp и Vs, а также коэффициентом Пуассона σ для различных горных пород (Пузырев, 1997).

В реальных геологических средах, как, впрочем, и в любых твердых телах, амплитуда плоских волн уменьшается с расстоянием за счет необратимых тепловых потерь и диффузного рассеяния на мелких неоднородностях. При этом отдельные спектральные составляющие импульса затухают по-разному, т.е. имеет место дисперсия волн. Высокочастотные компоненты затухают существенно сильнее, чем низкочастотные. В связи с этим, в импульсе, по мере его распространения во всё возрастающей степени будут преобладать низкие частоты.

Затухание сейсмических импульсов с расстоянием, не связанное с явлением отражения и преломления на границах, т.е. собственно поглощение, вводится в виде: $\exp[-\alpha(f)r]$, где α - коэффициент поглощения, зависящий от частоты f, r – расстояние, пробегаемое волной.

Экспериментальные исследования показывают, что в широком диапазоне частот коэффициент поглощения линейно зависит от частоты. На рис. 9-17 приведены результаты измерений поглощения продольных сейсмических волн в горных породах по данным сейсмологии (-2 - -1), сейсморазведки (0 – 2), акустического каротажа и лабораторных измерений (4 - 7).

Наряду с коэффициентом α, имеющим размерность м-1, вводится безразмерный параметр поглощения, получивший название добротности. Связь между α и Q выражается формулой: $Q = \pi f/V\alpha = \pi/\lambda\alpha$. Предполагается, что добротность Q в первом приближении не зависит от частоты, т.к. уже учитывается линейная аппроксимация $\alpha(f)$.

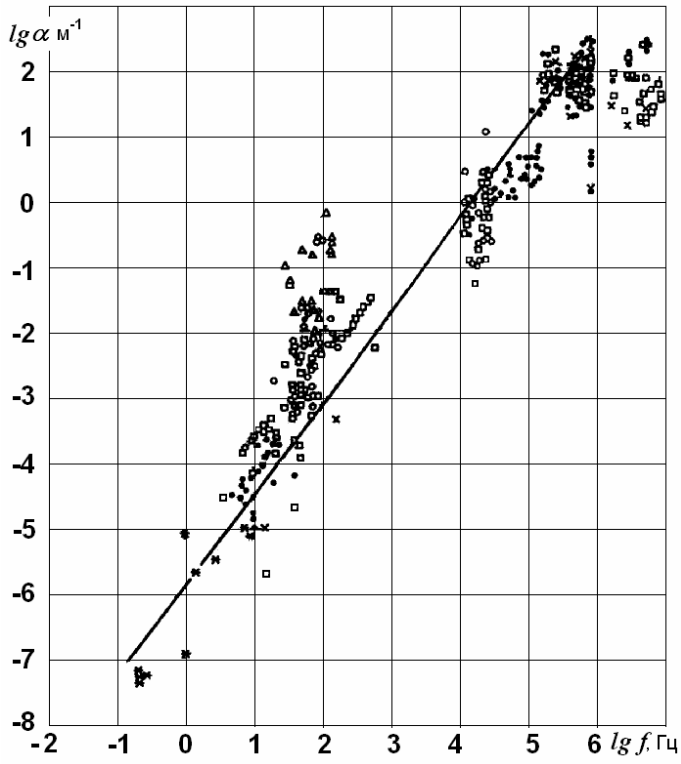


Рис. 9-17. Зависимость коэффициентов поглощения от частоты волны для пород различного литологического состава (Пузырев, 1997).

9. 7. ***Сейсмологическая модель Земли*** (Пантелеев, 2001).

Сильное землетрясение порождает объемные волны, которые пронизывают тело планеты, как бы освещая его изнутри. Подобно лучу света сейсмический луч подчиняется законам оптической оптики, законам отражения и преломления. Однако сейсмические лучи в теле планеты не прямые линии, а искривляются в зависимости от скорости распространения, то есть от упругих свойств пород, из которых сложена Земля.

Для идентификации траекторий сейсмических лучей применяются следующие обозначения:

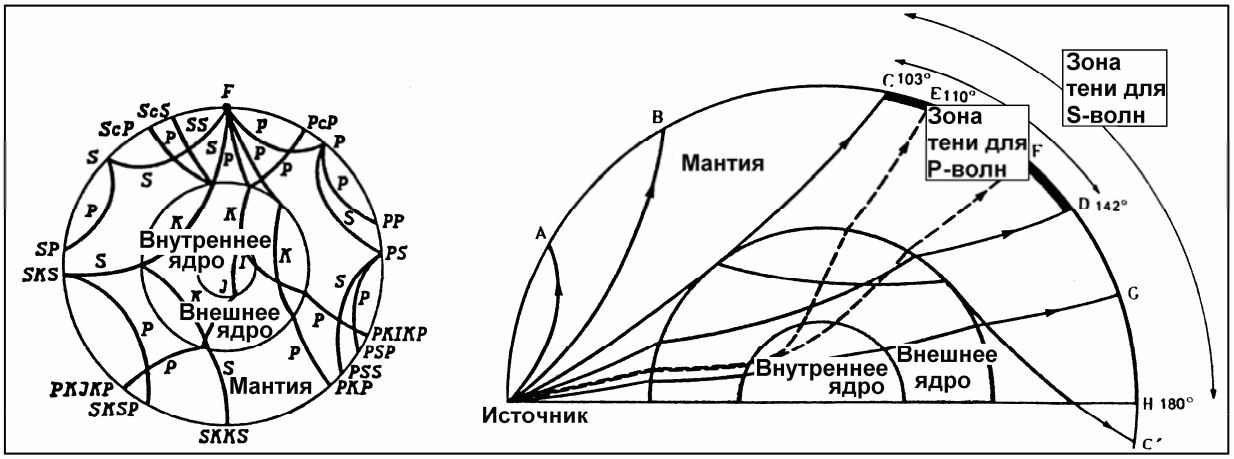


Рис. 9-18. Траектории сейсмических волн (и их обозначения), распространяющихся внутри Земли от источника F; Выбранные лучи Р-волн.

P - продольная волна,
S - поперечная волна,
c - волна, отраженная от внешнего ядра,
K - волна, прошедшая через внешнее ядро,
i - отраженная от внутреннего ядра волна,
I - продольная волна, прошедшая через внутреннее ядро,
J- поперечная волна, прошедшая через внутреннее ядро.

Например, обозначение волны PKiKP говорит о том, что данная продольная волна прошла через внешнее, жидкое ядро, отразилась от внутреннего ядра, затем снова прошла через жидкое ядро и вышла как продольная волна. При пересечении поверхности раздела или отражении от нее тип волны может поменяться: из продольной она может стать поперечной и наоборот. Возможны варианты: SS, SP, PcS и т.д.

Ядро Земли впервые сейсмологи обнаружили в 1906 году, а Гутенбергу в 1914 году удалось определить глубину его залегания (2885 км). Граница раздела внешнего ядра характерна тем, что на ней резко падает скорость продольной волны от 13,6 км/с до 8,1 км/с. Поперечная волна вообще через внешнее ядро не проходит, что говорит о том, что оно жидкое. Твердое, внутреннее ядро обнаружила Леман (Дания) в 1936 году. Она показала, что оно расположено на глубине приблизительно равной 5000 км.

В 1909 году югославский ученый Мохоровичич обнаружил резкое возрастание скоростей сейсмических волн на глубине около 35 км. Эту границу стали считать границей земной коры или границей Мохо. В океане она расположена ближе к поверхности земли на глубине 10-15 км и даже ближе, в горных районах, наоборот, уходит вглубь до 50-80 км.

В современном представлении Земля - это сложный многослойный объект. Каждый из слоев имеет также достаточно сложную структуру, которая изучается различными геофизическими методами (сейсмическими, магнитными, гравитационными и др.). Остановимся на одной, наиболее распространенной модели Земли. Это - модель Буллена.

Модель строения Земли Буллена

Зона	наименование слоя	глубина (км)	плотность ($г/см^3$)
A	кора	35	3,2
B	силикаты	400	3,5
C	фазовые переходы	900	4,0
D	нижняя мантия	2700	5,0
D'	переходная зона	2883	
E	внешнее ядро	4980	10-11
F	переходная зона	5120	
G	внутреннее ядро	6371	12

Зоны B и C образуют так называемую *верхнюю мантию*, а зона D - нижнюю мантию. Мантия Земли состоит из силикатных пород. По мере увеличения давления и температуры в веществе происходят фазовые переходы: определенные виды пород из

твердой фазы переходят в жидкую. Такие фазовые переходы отмечены в зоне C и в зоне D'. Принято считать, что металл находящийся в Земле в момент её образования, выплавляется и внешнее ядро (зона E) целиком состоит из расплавленного металла. Через эту зону поперечные волны не проходят, так как модуль сдвига равен нулю. В переходной зоне F жидкая фаза металла переход в твердую фазу и внутреннее ядро состоит из твердого металла с плотностью 12. При этом предполагается что если изменить физические условия и поместить этот металл в условия "нормальной" температуры и давления, то его плотность окажется равной 7.

70 лет тому назад Инге Леман (Lehman, 1936) открыла внутреннее ядро Земли. В своей статье, посвященной этому событию, она писала о необходимости использования *новых свойств материи* при описании самых глубинных частей нашей планеты. Что изменилось во взглядах на природу внутреннего ядра за эти 60 лет, ведь и до Инге Леман ядро Земли принято было считать железным? Надо сказать, что обнаруженная в течение последних 10 лет анизотропия свойств внутреннего ядра, о которой пойдет речь ниже, пока объясняется свойствами кристаллического железа. То есть, примерно так же, как это было и во времена открытия И. Леман.

После открытия Леман, некоторые сейсмологи, анализируя волны, проходящие через внутреннее ядро, еще продолжали сомневаться в том, твердое оно или жидкое. Они были практически убеждены в том, что внутреннее ядро (G-ядро, по модели Буллена) твердое, однако прямым доказательством этого была бы регистрация волны, проходящей через G-ядро как сдвиговая, т. н. PKJKP-волны (см. рис. 9-18). Единственная, до недавнего времени, публикация, посвященная обнаружению этой волны (Julian et al., 1972), не получила признания у сейсмологов. Jeroen Tromp назвал проблему обнаружения PKJKP-волн и прямого доказательства твердого состояния внутреннего ядра Holy Grail (Святым Граалем) сейсмологии (Tromp, 1995). (Holy Grail - святая чаша, здесь имеется в виду не столько сама чаша с кровью Христа, якобы собранной при распятии одним из его учеников, сколько символ того, что эту чашу безрезультатно искали многие поколения странствующих средневековых рыцарей).

Внутреннее ядро вероятнее всего действительно твердое, об этом свидетельствует результат прямого наблюдения PKJKP-волны и измерения её скорости. Сейсмологам при использовании французской сейсмологической сети удалось зарегистрировать поперечную (S) сейсмическую волну (от глубокофокусного землетрясения 1996 г Flores Sea), проходящую через внутреннее ядро (Okal, Cansi, 1998). Этот результат был подтвержден другими авторами (Deuss, et al., 2000) при наблюдении S волны через внутреннее ядро от этого же землетрясения, а так же от глубокофокусного землетрясения 1994 г в Боливии. Измеренная величина скорости S-волн во внутреннем ядре (3.65 км/с) практически совпадает с величиной скорости, принятой в модели Земли и оцененной по величине скачка скорости P-волн на границе внутреннего ядра и уравнению Адамса - Вильямсона. Это обстоятельство означает, что внешнее (E) ядро и внутреннее (G), состоят из одного вещества.

Уравнение Адамса - Вильямсона следует из вполне разумных предположений об однородности химического состава Земли и допущении, что гидростатическое давление выражается формулой:

$$dp = - \rho g dr,$$

где ρ и g плотность и ускорение силы тяжести при радиусе r. Модуль сжатия K представляет собой отношение приращения давления к величине возникшего при этом сжатия (при условии, что количество тепла и масса вещества не изменяются), т.е.

$$K = \rho\, dp/d\rho.$$

Учитывая, что $v_s^2 = \mu/\rho$; $K/\rho = v_p^2 - (4/3)\, v_s^2 = \phi$, здесь ϕ - сейсмический параметр, получаем уравнение Адамса - Вильямсона:

$$d\rho/dr = -\rho g/\phi.$$

Решение этого уравнения совместно с $g = Gm/r^2$, если известен сейсмический параметр, находит распределение плотности по радиусу Земли (G – гравитационная постоянная). Зная величину скорости S-волн во внутреннем ядре можно оценить величину коэффициента Пуассона, который, как оказалось, значительно больше, чем должен был бы быть, если бы ядро было из железа.

Эта оценка, далеко не единственный экспериментальный результат по изучению ядра Земли сейсмическими методами. В последнее время рядом авторов был проведен численный анализ большого количества сейсмических трасс (310 000, по данным Su, Dziewonski, 1994), проходящих через ядро. Выявлены поистине удивительные особенности. Речь идет об обнаружении явления анизотропии волновых свойств внутреннего ядра, состоящего в том, что скорости волн, проходящих по Земле параллельно оси ее вращения, оказываются чуть-чуть больше, чем скорости тех же волн, но когда они распространяются в плоскости земного экватора. Самое приметное состоит в том, что полученные результаты по скоростям PKIKP-волн находятся в хорошем соответствии и согласии с результатами анализа спектров собственных колебаний (Кузнецов, 1997).

Собственные колебания Земли. У Земли, как и у любого упругого тела, можно возбудить характерные для него колебания. Примерами вынужденных собственных колебаний могут служить колокол, скрипичная струна или столб воздуха в трубе органа и т.п. В Земле в результате прохождения сильного землетрясения, возбуждаются естественные (собственные) механические колебания, которые иной раз могут продолжаться в течение многих часов и даже дней. Например, длина записи колебаний после Чилийского землетрясения 1960 года на сейсмографе станции Изабелла (Калифорния) составляла 16 тыс. минут. Периоды собственных колебаний значительно различаются. Самые медленные колебания захватывают всю толщу Земли, неся информацию о составе и свойствах не только коры и мантии, но и ядра, как внешнего, так и внутреннего. Регистрируют эти колебания с помощью сети низкочастотных сейсмографов акселерометров, гравиметров и наклономеров. Вычисление спектров собственных колебаний представляет собой довольно сложную математическую процедуру.

Впервые собственные колебания Земли (СКЗ) были обнаружены в 1954 году Беньоффом при анализе сейсмограмм Камчатского землетрясения 1952 года. Он отождествил основное сфероидальное колебание Земли с периодом 57 мин. с соответствующим колебанием, выделенным при анализе сейсмограмм.

Собственные колебания Земли можно характеризовать некоторой функцией и связанной с ней собственной частотой ${}_n\omega_l^m$. Число обертонов n (по аналогии с квантовой механикой, главное квантовое число), угловое (орбитальное) число l и азимутальное число m, являются целыми числами, которые используются для обозначения конкретной моды колебания. Для каждого значения l существуют $2l + 1$ связанных значений m: $m = -l$, ..., $m = 0$, ..., $m = l$. Мультиплет ${}_nS_l$ (сфероидальная мода) или ${}_nT_l$ (тороидальная мода) представляют собой все $2l+1$ собственных колебаний (синглетов) с одними и теми же квантовыми числами n и l. В модели сферически симметричной Земли все синглеты внутри данного мультиплета имеют одинаковую собственную частоту ${}_n\omega_l$. Синглеты $2l+1$ являются вырожденными. Любое отклонение Земли от сферичности убирает это вырождение и заставляет синглеты расщепляться таким образом, что каждый отдельный синглет имеет свою, отличную от других, собственную частоту ${}_n\omega_l^m$.

Альтерман и др. (1964) привлекли внимание к классу сфероидальных колебаний, названному ими ядерными колебаниями (core oscillation). Теоретически такой тип колебаний оказался особо чувствительным к изменениям в строении центрального ядра. Амплитуды колебаний существенны только в ядре, а в мантии они пренебрежимо малы. Надо сказать, что ядерное колебание присуще только модели “B” Буллена и отсутствует

во всех остальных рассмотренных авторами моделях. Напомню, что согласно модели "B" Буллена, плотность вещества внутреннего ядра была примерно в полтора раза выше, чем ее общепринятое значение. Эта модель была признана неправомерной, однако, идея ядерных колебаний, в несколько искаженном виде, осталась. Как будет показано ниже, в широком наборе мод СКЗ существуют колебания, обладающие повышенной чувствительностью к свойствам ядра (в том числе, внутреннего ядра) относительно свойств вещества мантии.

Расщепление мод колебаний. При анализе записей сейсмограмм катастрофического Чилийского землетрясения 22 мая 1960 года впервые был обнаружен эффект расщепления (раздвоения) частот СКЗ. Тогда же было высказано предположение, что расщепление частот вызвано вращением Земли. На основе известных классических результатов была выдвинута гипотеза о том, что во вращающемся круговом бассейне, волны, бегущие по отношению к воде в направлении вращения, имеют более длинные периоды, чем волны, движущиеся в противоположную сторону. Основы теории этого явления применительно к расщеплению мод собственных колебаний Земли, связанных с ее вращением, были заложены Пекерисом и др. (1964). В последствии было показано, что вращение Земли - не единственная причина расщепления. Необходимо учитывать так же эллиптичность Земли и ее ядра, в частности.

Наибольшие отклонения Земли от сферичности обязаны ее вращению и эллиптичности. Связанное с этими явлениями расщепление представляется в виде: $\omega^m = \omega_l\ (1 + bm + cm^2)$, где индексы n и l опущены для ясности. Параметр ω_l - центральная частота мультиплета. Эффекты первого порядка, связанные с вращением Земли, отражает параметр b, а линейное расщепление - функция m. Эллиптичность Земли и эффекты второго порядка отражает параметр c и квадратичное расщепление - m^2.

Masters и Gilbert (1981) первыми обнаружили, что величина расщепления значительно превышает теоретическую оценку, основанную на учете вращения и эллиптичности Земли. В последние годы количество аналогичных наблюдений возросло до 20 (Tromp, 1993). По началу предполагалось, что причина несогласия наблюдаемого расщепления с теоретическими оценками кроется в особенности строения границы ядро-мантия, которая, в свою очередь, как предполагалось, должна быть симметрична относительно оси вращения. Для объяснения аномального расщепления были выдвинуты три механизма. Первый основывался на учете латеральной неоднородности ядра, пропорциональной сферической гармонике Y_2^0. Такая модель, по-видимому, воспроизводит большую часть наблюдаемого расщепления, однако автор этой работы полагает, что необходимая для наблюдаемого расщепления неоднородность нереальна. Второй механизм строится на том, что учитывает пространственные неоднородности на границе внутреннего ядра и границе ядро-мантия (Tromp, 1993). Третий механизм учитывает аномалии времени распространения PKIKP-волн и предполагает, что связанная с этим анизотропия свойств внутреннего ядра проявляет цилиндрическую симметрию относительно оси вращения Земли. Tromp (1993) считает, что наличие латеральных неоднородностей не способно объяснить наблюдаемые эффекты, связанные с расщеплением.

Рассмотрим цилиндрическую анизотропию внутреннего ядра, как возможную причину расщепления мод СКЗ. Простейший тип анизотропии, которая обладает цилиндрической симметрией относительно оси вращения Земли, - это поперечная изотропия, включающая 5 упругих параметров: A, C, F, L и N (Love, 1927). Эти параметры связаны с тензором поля, имеющим декартовы компоненты. Третья ось - это ось вращения Земли. Параметры: C и A связаны со скоростью P-волн ($v^2_p\rho$), которые распространяются соответственно параллельно и перпендикулярно оси вращения Земли. Параметры L и N, в свою очередь, связаны с величинами скоростей S-волн ($v^2_s\rho$), которые, аналогично предыдущему, распространяются параллельно и перпендикулярно оси

вращения. Параметр F соответствует скоростям волн, распространяющихся под другими углами к оси вращения. Этот тип анизотропии, так же как вращение и эллиптичность, вызывает расщепление мод колебаний. Учет анизотропии приводит к некоторому изменению вида ω^m:

$$\omega^m = \omega'_1 (1 + bm + c^2 m + c'm^2 + dm^4). \quad (9.33)$$

Коэффициенты c' и d описывают эффекты, связанные с анизотропией внутреннего ядра, и определяются тремя параметрами:

$$\alpha = (C - A)/A_o, \beta = (L - N)/A_o, \gamma = (A - 2N - F)/A_o,$$

где $A_o = (k + 4/3\ \mu)$ - функция объемного модуля k и модуля сдвига μ, имеет смысл квадрата скорости P-волн. Когда $\alpha > 0$, P-волны во внутреннем ядре распространяются медленнее в экваториальной плоскости, чем вдоль оси вращения Земли. Аналогично, когда $\beta > 0$, S-волны внутреннего ядра распространяются медленнее вдоль экватора, чем вдоль оси вращения. Третий параметр γ, оказывает влияние на P- и S-волны, распространяющиеся в других направлениях.

Авторы (Woodhouse et al., 1986), используя данные 7 мультиплетов, получили величины коэффициентов: α = 6.7 %, β = 0.7 %, γ = -2.7 %. Используемая авторами модель предсказывала разницу во времени распространения PKIKP-волн между экваториальными и полярными путями примерно 8 секунд. Хотя наблюдаемая величина составляет 2.2 сек. Расхождение во времени распространения волн может быть уменьшено, если в модель ввести зависимость анизотропии от радиуса внутреннего ядра. Используя зависимость $\sim r^2$, авторы получили α = 10.4 %, β = 1.9 %, γ = -3.3 % на границе внутреннего ядра, что давало 4.1 сек. вместо 8.

Распределение по радиусу внутреннего ядра трех модальных параметров α, β и γ Tromp (1993) обосновывал новыми данными по наблюдениям времени распространения P-волн, особенно под углами 130-136°. Заметим, что он же в своей следующей работе (Tromp, 1995), приводит уже несколько отличное от этого распределение практически тех же параметров. Действительно, параметры, представляющие для нас наибольший интерес:

$$\alpha = (C - A)/A_o \text{ и } \varepsilon = (C - A)/2A_o$$

отличаются в два раза, характер их поведения вдоль радиуса внутреннего ядра несколько различается, но в области границы (R = 1200) в обоих случаях наблюдаются особенности. Это говорит о том, что анизотропия волновых свойств внутреннего ядра проявляется вблизи границы, с одной стороны, и, с другой, о том, что знание картины распространения скоростей волн во внутреннем ядре играет решающую роль в понимании явления анизотропии.

Анизотропия скоростей. Скорость P-волны может быть получена из выражения:

$$v^2_p\rho = A\sin^4\xi + C\cos^4\xi + 2(2L + F)\sin^2\xi\cos^2\xi, \quad (9.34)$$

где ξ - угол между направлением распространения P-волны и N - S осью. В случае изотропии A = C = 2L + F. Авторы (Morelli et al., 1986) рассмотрели анизотропию скоростей сейсмических волн как возмущение к изотропному полю. Основанием к подобному подходу может служить то, что величина возмущения не превышает единиц процентов от целого. Обозначая ε и σ как возмущения, получаем:

$$C = (1 + 2\varepsilon)A; \quad 2L + F = (1 + \sigma)(AC)^{1/2}.$$

С учетом этого, выражение для скорости P-волны:

$$v_p = v_{eq}(1 + \varepsilon\cos^2\xi + \sigma\cos^2\xi\sin^2\xi), \quad (9.35)$$

где $v_{eq} = (A/\rho)^{1/2}$ - экваториальная скорость. В этой модели предполагалось, что величины возмущений возрастают $\sim r^2$, таким образом, что они максимальны на границе внутреннего ядра. Максимальные значения параметров анизотропии: $\varepsilon = 0.032 \pm 0.005$ и $\sigma = -0.064 \pm 0.015$ для углов ξ = 170°-180°.

Авторы одной из первых работ этого цикла (Poupinet et al., 1983), изучая анизотропию скоростей P-волн во внутреннем ядре, определяли разность времен

распространения (travel-time) PKIKP- и P-волн (см. рис. 9-18). Анализ 400 наблюдений 143°-трасс PKIKP-волн показал, что разница в прохождении их в направлении вдоль оси вращения и поперек нее составляет примерно 1.5 ± 0.5 сек. Чуть медленнее волны распространяются вблизи экватора по сравнению с волнами, регистрируемыми вблизи Северного и Южного полюсов.

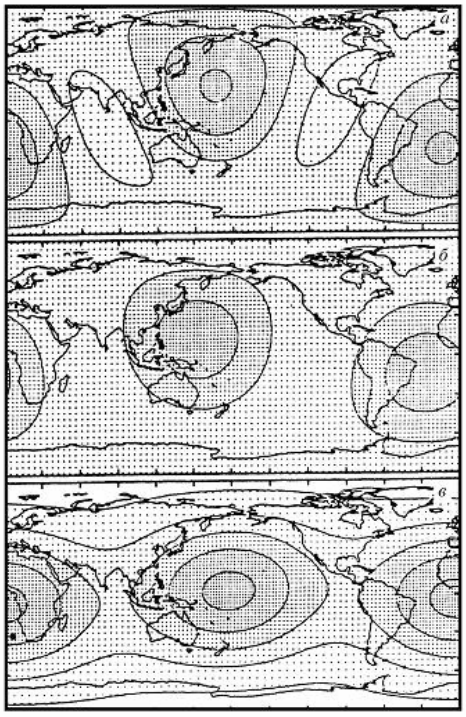


Рис. 9-19. Распределение латеральной анизотропии скорости P-волн во внутреннем ядре под разными углами: *а* = 170-180°; *б* = 155-170°; *в* = 120-135°. Вся шкала ± 0.15 км/с. Чем светлее, тем выше скорость P-волн (Morelli et al., 1986).

Для иллюстрации эффекта, в этой работе приводится пространственное распределение задержек по поверхности Земли. Авторы выделяют два “медленных” региона в Тихом океане с “захватом” части Южной Америки и Атлантического океана. “Быстрые” регионы располагаются на материках Северной Америки, северо-восточной части Азии, а так же Австралии, Новой Зеландии и Антарктиды. Разница времен прихода волны между “медленными” и “быстрыми” регионами ≈ 2 сек. Изучение трасс PKIKP-волн, распространяющихся под другими углами, показало, что основная неоднородность, которая дает задержку во времени, распределена не равномерно по радиусу внутреннего ядра, а сосредоточена вблизи ее границы. Специальное уточнение этого результата было сделано в более поздней работе (Song, Helmberger, 1993). Здесь использовались сейсмические трассы не только от землетрясений, но и от взрывов атомных зарядов. Авторы пришли к однозначному выводу относительно того, что анизотропия волновых свойств внутреннего ядра сосредоточена вблизи его границы с внешним ядром. (Заметим, что эту точку зрения, как будет показано ниже, разделяют далеко не все авторы). Внешнее ядро вклада в анизотропию не дает. В уже упоминавшейся нами работе (Morelli et al., 1986) приведен рисунок (рис. 9-19), на котором показано, как изменяется латеральная анизотропия G-ядра в зависимости от угла “зрения”, т.е. от угла сейсмической трассы. Группа трасс, распространяющихся под углами 170-180° (на рис 9-19-а), оказывается наиболее чувствительной к цилиндрической анизотропии. Авторы (Morelli et al., 1986) инвертировали эти данные для ε и σ и затем использовали их для коррекции других данных, изображенных на рис. 9-19-б и 9-19-в. Картина полностью изменяется на обратную, - если такой коррекции не вводить. K.C. Creager (1992) приходит к

заключению, что некоторый слой, толщиной примерно в 70 км, расположенный на глубине 100-300 км от границы внутреннего ядра вглубь, “отвечает” за анизотропию его волновых свойств (Creager, 1992). По его мнению, цилиндрическая асимметрия не является самым лучшим приближением теоретической модели и получаемых результатов наблюдений. Для лучшего совпадения, автор (Creager, 1992) перемещает ось анизотропии на 5° относительно оси вращения Земли и помещает ее в точку с координатами 85° S и 300° E. Анизотропия внутреннего ядра, несмотря на эти приемы, обладает неоднородным распределением по долготе. Однако, к примеру, в другой работе (Shearer et al., 1988), выполненной на несколько лет раньше, ее авторы заранее ограничивают себя рассмотрением только цилиндрической анизотропии и приходят к выводу, что она равномерно распределена по радиусу внутреннего ядра, что, как было выяснено рядом других авторов, не совсем верно.

Splitting-функция. В ряде работ (Tromp, 1993; Tromp, 1995; Woodhouse et al., 1986) и особенно в (Giardini et al., 1988), которой мы будем в основном придерживаться, развита техника синтеза спектра колебаний и оценки величины коэффициентов c_{st}, которые полностью характеризуют расщепление данного мультиплета ($s = 0, 2, 4... 2l$; $-s \le t \le s$). Наглядное представление этих коэффициентов дается с помощью специальной функции расщепления (splitting-функции) $\eta(\theta,\varphi)$. Выясним физический смысл этой функции и входящего в нее коэффициента c_{st} ...

Вклад отдельного изолированного мультиплета в наблюдаемую сейсмограмму записывается как функция времени t:

$$u(t) = Re[exp(i\omega t)\, \boldsymbol{r}\, exp(i\boldsymbol{H}t)\, \boldsymbol{s}], \qquad (9.36)$$

$\boldsymbol{r}$ - функция (вектор) приемников, $\boldsymbol{s}$ - функция (вектор) источника, ω - частота мультиплета. Вектора $\boldsymbol{r}$ и $\boldsymbol{s}$ выражаются формулами: $\boldsymbol{r}_m = R_k^m(\theta_r, \varphi_r)$, $\boldsymbol{s}_m = S_k^m(\theta_s, \varphi_s)$, где k - индекс мультиплетности (объединение l, m и n); θ_r, φ_r; θ_s, φ_s - ко-широта и долгота приемника и источника. Вектор $\boldsymbol{s}$ зависит от тензора момента землетрясения, $\boldsymbol{r}$ - от ориентации сейсмографа.

Матрица расщепления H может быть записана:

$$H_{mm'} = \Omega\, \beta_m\, \delta_{mm'} + \omega_o \sum_{s=0}^{2l} \sum_{t=-s}^{s} \gamma_{es}\, c_{st}. \qquad (9.37)$$

Здесь первый член правой части уравнения характеризует вклад в расщепление сил Кориолиса: Ω - угловая скорость вращения Земли, а β_m - параметр Кориолиса расщепления мультиплета. Коэффициент c_{st} линейно зависит от внутренней неоднородности Земли; γ_{es} полностью определяется $Y_s^t(\theta, \varphi)$ - сферической гармоникой степени s и порядка t. Согласно (Giardini et al., 1988), коэффициент c_{st} может быть выражен в виде:

$$c_{st} = \delta_{s2}\, \delta_{t0}\, c^{ell} + \int \delta m_{st}(r)\, M_s(r)\, dr + \sum \delta h_{sc}\, H_s, \qquad (9.38)$$

где $M_s(r)$, H_s - известные функции распределения интенсивности мультиплетов СКЗ вдоль по радиусу Земли (kernels), $\delta m_{st}(r)$ - гармонические коэффициенты неоднородности Земли. Под неоднородностью Земли в работах по анизотропии ядра понимается относительное возмущение скоростей P-волн, S-волн и плотности ρ:

$$\delta m_{st}(r) = (\delta v_{pst}/v_{po},\ \delta v_{sst}/v_{so},\ \delta\rho_{st}/\rho_o), \qquad (9.39)$$

где подстрочный индекс “o” означает отнесение данного параметра к стандартной модели Земли. Первый член выражения для c_{st} показывает вклад в расщепление гидростатической эллиптичности Земли. Последний, - характеризует вклад в расщепление разрывов в параметрах модели Земли. Заметим, что они оба обладают осевой симметрией и не должны давать латеральной анизотропии в расщеплении.

Изучение анизотропии расщепления мультиплетов СКЗ и построение splitting-функции сводится, в конечном счете, к тому, чтобы, используя набор сейсмограмм и вычислив спектры, определить $\delta m_{st}(r)$. По известной $\delta m_{st}(r)$, зная параметры источника и приемника, определяются коэффициенты c_{st}. Например, предположим, что неоднородность приводит к возникновению максимального количества мультиплетов $s_{max} \leq 2\ l$. Тогда число коэффициентов $s_{max} = 1/2(s_{max} + 1)\ (s_{max} + 2)$. Например, для моды степени 2, для которой $s_{max} = 4$, имеется только 15 коэффициентов c_{st}, и они представляют все спектры этой моды.

Наглядное представление коэффициентов расщепления c_{st} дается функцией расщепления (splitting-функцией):

$$\eta(\theta, \varphi) = \sum_{s=0}^{2l} \sum_{t=-s}^{s} c_{st}\, Y_s^t(\theta, \varphi). \qquad (9.40)$$

Отбор данных. При отборе мод СКЗ для анализа величины расщепления авторами работ использовались только те, частоты которых не перекрывались с другими модами, имеющими близкие частоты. Авторы реферируемых работ при отборе мод стремились также к тому, чтобы распределение максимумов интенсивности мод вдоль по радиусу Земли (kernels) максимально возможно перекрывало все глубины, захватывая мантию, внешнее и внутреннее ядро. Исследовались моды с периодами от 200 до 2000 с (Giardini et al., 1988). Оценивались добротность моды Q и коэффициенты расщепления, связанные с эллиптичностью (A) и вращением Земли (B), вычисленные по модели стандартной Земли (PREM). Коэффициенты A и B определяются следующим образом:

$$A = [\alpha\varepsilon_k + \alpha' \Omega^2/\omega^2]/2\pi; \qquad B = \beta\Omega/2\pi,$$

где α, β - параметры расщепления. Моды охватывают интервал от 0.5 до 5 млГц и демонстрируют преобладание расщепления: за счет вращения (B выше, чем A) на низких частотах и за счет эллиптичности (A > B) на высоких.

Анализ длиннопериодных СКЗ требует использования очень долговременных записей событий зарегистрированных инструментами с высокой чувствительностью. Весьма редкая сеть цифровых сейсмостанций начала постоянную запись сейсмической информации примерно в 1976 году. Сейсмические события большой интенсивности, достаточной для анализа расщепления мод, случаются в среднем не чаще одного события в год. Таким образом, исходного материала, пригодного для анализа, не очень много.

Для записей СКЗ в основном использовались: вертикальные акселерометры сети International Deployment of Accelerometers (IDA), которые позволяют обнаруживать СКЗ на частотах ниже 1 млГц для достаточно сильных землетрясений. Кроме этого, использовались данные сетей Global Digital Seismograph Network (GDSN) и Geoscope. Авторы предпочитают использование данных IDA. Как правило, для анализа использовались землетрясения, свободные от мощных близких повторных ударов, которые значительно усложняют картину СКЗ. В конечном счете, из исходного материала были отобраны 20 пар событий (трасс) “источник-приемник” (Giardini et al., 1988), которых хватило для анализа splitting-функций всех интересующих мод. Каждое сейсмическое событие, используемое при анализе, прослеживается в течение 6 дней, как до него, так и 6 дней после события. При этом “вычищаются” форшоки и афтершоки. Каждая трасса представляется в виде цуга колебаний общей длительностью 192 часа и затем с ней проводится Фурье анализ. Для того, чтобы избежать любые возможные искажения, для каждой моды колебаний строятся синтезированные сейсмограммы и частные производные во временной области. К синтезированным функциям применяются те же фильтрация и Фурье анализ, что и для наблюдаемых сейсмограмм. Большое внимание в работе (Giardini et al., 1988) уделяется исследованию природы шумов (как естественных, так и вычислительных).

Результаты. Значение splitting-функции в географической точке с координатами (θ, φ) может быть записано как:

$$\eta(\theta, \varphi) = \boldsymbol{m}\, \boldsymbol{a}(\theta, \varphi), \qquad (9.41)$$

где $\boldsymbol{m}$ - вектор c_{st} коэффициентов, а вектор $\boldsymbol{a}(\theta, \varphi)$ содержит сферические гармоники для точки (θ, φ). Аналогично тому, как это делалось при построении карты анизотропии скоростей, splitting-функция демонстрирует неоднородность строения Земли, просуммированную по ее глубине и домноженную на соответствующий kernels-коэффициент. Авторы работ по анизотропии расщепления мод СКЗ используют относительную (нормализованную) шкалу, в которой максимальное возмущение составляет ± 0.2 % для любой из мод. Оценка максимальных значений ошибок показывает, что они не превышают 40 % от максимальных величин splitting-функции, их величины составляют доли мкГц. Следует заметить, что ошибка в 0.1 мкГц может дать фазовую разбалансировку в 10° после 10 часов накопления синтезированного сигнала. Учет ошибок позволяет более точно измерить центральную частоту и определить splitting-функцию.

Распределение splitting-функции по глубине (kernels) и земной поверхности достаточно точно отражает трехмерную структуру Земли. К настоящему времени построены картины таких распределений для широкого набора мультиплетов, каждый из которых имеет свое распределение интенсивности вдоль по глубине. На рис. 9-20-а, -б, -в, -г показаны несколько картин, каждая из которых дает вариации splitting-функции на глубинах мантии, внешнего и внутреннего ядра. Сама функция нормирована на 1 % возмущения плотности (ρ) и скоростей P и S - волн. Слева от картин изображено распределение возмущения $d\rho/dr$, dv_p/dr и dv_s/dr по глубине. На рисунке выделены: свободная (дневная) граница Земли, 670-км разрыв в мантии, граница ядро-мантия и граница внешнего и внутреннего ядра.

В результате проведенных исследований было выяснено, что моды ${}_4S_3$; ${}_5S_4$; ${}_5S_5$; ${}_5S_6$, которые имеют периоды СКЗ от 488 до 332 с, обладают повышенной чувствительностью к неоднородности скорости P-волн. В свою очередь, моды ${}_1S_5$; ${}_1S_6$; ${}_2S_4$; ${}_3S_8$ - ведут себя точно так же, хотя их kernels захватывает большие глубины мантии. Авторы делают вывод, что в расщеплении мод решающую роль играет сама мантия, а не какая-либо из ее границ. Это подкрепляется анализом мультиплетов ${}_0S_6$; ${}_0S_7$; ${}_1S_7$; ${}_1S_8$, периоды СКЗ которых составляют от 963 до 555 сек. Здесь, для их глубин преобладает высокая чувствительность к неоднородности в скорости S-волн по всей глубине мантии и неоднородности в распределении v_p и ρ на границе внешнего ядра. Сравнивая картины пространственного распределения splitting-функций, построенные по данным расщепления этих мультиплетов, явно заметна их схожесть (см. рис. 9-20-а и 9-20-б). Количественно это выражается в коэффициентах корреляции между модами ${}_0S_6$; ${}_1S_7$; ${}_1S_8$ близкими к 0.9 и выше. Это еще раз убеждает в том, что “работает” вся мантия.

Совершенно другая картина наблюдается для мультиплетов, глубины которых приходится на внешнее ядро. Анализ спектров мод ${}_6S_3$; ${}_{11}S_4$; ${}_{13}S_2$; ${}_{13}S_3$, которые являются модами PKIKP-типа со слабой чувствительностью в мантии и продолжающимися во внешнее ядро, показывает, что распределение splitting-функций этих мультиплетов заметно отличается от аналогичных изображений, характерных для мантии; периоды их СКЗ варьируют от 354 до 192 сек. Рисунок 9-20-в в явном виде демонстрирует, что во внешнем ядре можно выделить 6 “светлых” и 6 “темных” областей, симметрично расположенных друг относительно друга. Строгий порядок светлых и темных пятен, показывающий распределение плотности по объему внешнего ядра, может говорить о возникновении здесь 12-ячеистой конвективной структуры, типа тессеральной гармоники ${T^3}_4$.

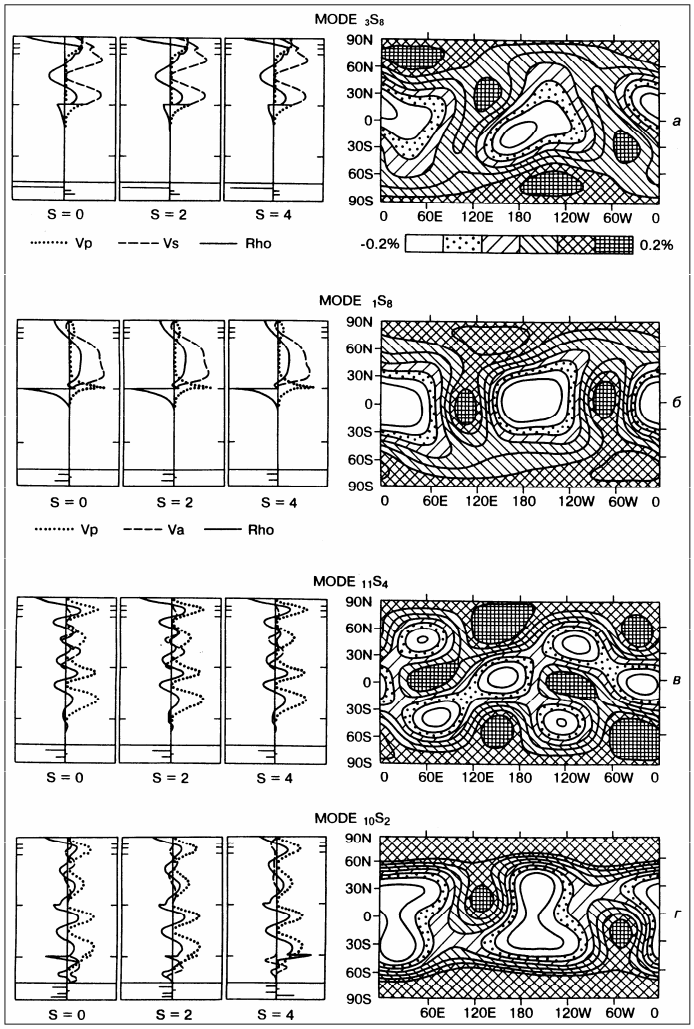


Рис. 9-20. Splitting-функции для различных мод собственных колебаний Земли - справа. Интенсивность функции меняется от -0.2% (белый цвет) до +0.2% (черный). Распределение интенсивности собственных колебаний по глубине (радиусу Земли) для трех различных S (0, 2, 4) (kernels) - слева. Kernels-функция представлена в виде изменения по глубине скоростей P и S волн и плотности (Rho). *а* и *б*: splitting- и kernels-функции мантии; *в* - внешнего ядра; *г* - внутреннего ядра (Giardini et al., 1988).

Splitting-функция и kernels моды $_{10}S_2$ показаны на рис. 9-20-г. Эта мода занимает особое положение в истории изучения структуры внутреннего ядра (Masters and Gilbert, 1981). Величина расщепления и характер распределения интенсивности моды по глубине для нее в большей степени, чем для других мультиплетов, зависит от того, какая используется модель Земли. (Мы уже упоминали об этой особенности ядерного колебания). Действительно, реально наблюдаемая центральная частота и добротность этой моды много больше, чем величины, полученные теоретически, например, наблюдаемая величина Q = 800, тогда как расчетное значение величины Q = 192. Имеется, по крайней мере, два различных объяснения обнаруженного несоответствия. Одного из них мы уже ранее касались, - хорошее совпадение эксперимента с теорией наблюдается в том случае, если допустить плотность вещества внутреннего ядра примерно в 1.5 раза выше, чем сейчас принято (как это следует из соответствующей модели “B” Земли Буллена). Либо, как это предлагается в (Giardini et al., 1988), в модели Земли несколько увеличить скорость P-волн во внутреннем ядре. Оказывается, что увеличение скорости P-волн всего на 2 % приводит к тому, что теоретическая добротность согласуется со спектральными

наблюдениями. Какое из этих решений адекватно реальной ситуации, - пока не совсем ясно. Ясно одно, что распределение скорости Р-волн и плотности внутреннего ядра заметно отличается от структуры внешнего и больше напоминает строение мантии (рис. 9-20-б и 9-20-г).

Одним из способов проверки, насколько метод построения splitting-функции верно характеризует пространственную картину распределения неоднородности в строении Земли, служит сравнение результатов, полученных здесь с аналогичной картиной, полученной при анализе топографии инверсий данных по времени распространения Р-волн. Для построения splitting-функции, так как свойства расщепления нормальных мод зависят от неоднородности в ρ, v_p и v_s в их сочетании, необходимо предположить закон пропорциональности между их асферическими возмущениями:

$$\delta v_s/v_{s0} = \alpha_{sp}\, \delta v_p/v_{p0} \qquad (9.42)$$
$$\delta\rho/\rho_0 = \alpha_{\rho p}\, \delta v_p/v_{p0}.$$

Величины коэффициентов пропорциональности, по данным лабораторных экспериментов (Giardini et al., 1988): α_{sp} = 1.25, $\alpha_{\rho p}$ = 0.5. В результате численного моделирования расщепления для нескольких мод достигается большее соответствие модельных и экспериментальных результатов, если эти коэффициенты примерно удваиваются. Надо заметить, что результатом исследований влияния асферических возмущений со стороны плотности и скоростей сейсмических волн было выяснено, что в целом изменение скорости S-волн "имеет преимущество" над возмущениями в ρ и v_p. Однако, это не выполняется для некоторых конкретных мод. Есть моды СКЗ, наиболее чувствительные к возмущениям плотности, другие, - к возмущениям Р-волн и т.п. Подбор соответствующих параметров позволяет получить для некоторых мод очень хорошее подобие splitting-функций измеренных и синтезированных. Коэффициенты корреляции приближаются к 0.9.

Обсуждение проблемы. J. Tromp (1993; 1995) считает, что особое значение в проблеме придается данным, полученным после двух очень сильных землетрясений 1994 года: в Боливии - 9 июня и на Курилах - 4 октября. Высококачественные данные по скоростям PKIKP-волн и splitting-функциям, полученным после этих землетрясений, послужили основой уточнения и подкрепления всего предшествующего материала. Аномальное расщепление мод СКЗ, чувствительных к структуре внутреннего ядра, подтверждено данными по скоростям прохождения PKIKP-волн и объяснено в рамках т.н. цилиндрической анизотропии внутреннего ядра. Объяснения обнаруженного явления базируются на представлении о химическом и минералогическом составе вещества внутреннего ядра. Согласно общепринятым представлениям, оно состоит из гексагонально плотно упакованного железа. Это железо, находясь при pT-условиях внутреннего ядра, якобы может проявлять свойства цилиндрической анизотропии, аналогичные тем, которые выявлены сейсмическими наблюдениями. Абсолютно ясно, что такие свойства железо может проявлять, если оно находится в виде монокристалла, или в состоянии, подобном ему. Ряд авторов полагают, что анизотропия свойств вещества внутреннего ядра обязана возникновению в нем конвекции. При этом вещество ядра должно двигаться в его центре вдоль оси вращения, "вытекая" из одного полюса и, затем, двигаться таким образом, чтобы "втечь" в другой. Авторы полагают, что вещество (монокристаллическое железо) должно находиться в ядре в частично расплавленном (?) состоянии. S. Karato (1993) предположил, что свойства цилиндрической анизотропии железо может приобрести, если на него окажет воздействие магнитное поле Земли. Естественно, автор этой работы предполагал, что такое воздействие возможно, если железо во внутреннем ядре обладает магнитной (парамагнитной) восприимчивостью. Наконец, рассматривалась и третья возможность объяснения. Суть ее состоит в преимущественной ориентации железных минералов из-за вращения и самогравитации во время кристаллизации и роста внутреннего ядра. Tromp полагает, что "пока не является

совсем невероятным то, что внутреннее ядро представляет собой один единственный большой кристалл".

Обратим внимание на то, что большинство попыток объяснения обнаруженного явления ориентированы исключительно на объяснение явления цилиндрической анизотропии. Авторы практически всех работ как будто "не замечают" латеральной анизотропии и, тем более, ее похожести у внутреннего ядра и у мантии. Отчасти, это утверждение не относится к работе, в которой Morelli и Dziewonski (1987) обсуждают проблему отсутствия латеральной неоднородности у внешнего ядра, естественно, на фоне отмеченной асферической структуры Земли во всем диапазоне глубин от центра до поверхности. Авторы (Morelli, Dziewonski; 1987) отмечают особую, ("драматическую", по их утверждению) роль границ ядро-мантия, внешнее - внутреннее ядро, как своеобразных разрывов в анизотропии. Значительно большее внимание авторы уделяют особенностям распространения волн на первой границе. По их мнению, именно на границе ядро-мантия наблюдается крупномасштабная латеральная неоднородность, и ее нет в самом внешнем ядре. Полученный результат подтверждает ранние предположения об отсутствии во внешнем ядре крупномасштабных неоднородностей плотности. Creager (1992) подчеркивает, что анизотропия свойств внутреннего ядра сосредоточена на его границе, более того, анизотропия, кроме свойств цилиндрической симметрии, имеет явную долготную, т.е. латеральную, неоднородность. Выводы Creager (1992) основаны на т.н. ручном отборе данных (hand-picked), который дает лучшее (чем машинный отбор) их качество. Его результаты были подтверждены в работах (Song, Helmberger, 1993; McSweeney, Creager, 1993; Vinnik et al., 1994). В более поздних работах, авторы (Shearer, 1994; Su, Dzievonski, 1996) несколько изменили представление об уровне анизотропии внутреннего ядра. Su и Dziewonski (1994) использовали данные по travel-time 313422 трасс PKIKP-волн, зарегистрированных 2335 сейсмостанциями от 26377 землетрясений. Здесь впервые представлено трехмерное изображение анизотропии внутреннего ядра, из которого следует, что она составляет несколько процентов и сосредоточена в слое 200-300 км на границе ядра. Латеральное распределение анизотропии, полученное в (Su, Dzievonski, 1994), в значительной степени совпадает с данными, приведенными в (Creager, 1992). В обоих случаях анизотропия наблюдается в области долгот, противоположных положению Тихого океана (аналогично рис. 3-18-г, где это можно наблюдать в распределении splitting-функции).

В последние годы наметилась тенденция по некоторому уточнению выявленных ранее особенностей анизотропии внутреннего ядра в области исследований его по расщеплению собственных колебаний. Так, например, авторы (Widmer et al., 1992) пришли к заключению, что наблюдаемое расщепление может быть локализовано во внешнем (а не во внутреннем, как было принято считать) ядре. Однако, чуть позже эти сомнения были отвергнуты, и в работе Gilbert (1994) показано, что гидродинамические течения, существующие во внешнем ядре, не могут быть причиной наблюдаемого расщепления.

В ряде работ (Bhattacharyya et al., 1993; Widmer et al., 1991) и др., обсуждалась очень интересная проблема величины добротности колебаний Q для P- и S-волн. В (Bhattacharyya et al., 1993) была оценена величина Q для P-волн верхних 320 км внутреннего ядра, как Q= 360. Добротность на S-волнах при этом оказывается порядка 50. Авторы (Widmer et al., 1991) оценивают эту величину как 110 ± 25. Еще ряд авторов оценивают величину добротности внутреннего ядра на P-волнах около 940, при этом добротность на S-волнах всегда значительно ниже. Обсуждаются различные причины таких расхождений, однако, общего мнения по этому поводу пока не находится.

В работе (Kaneshima et al., 1994) авторы отмечают латеральную неоднородность внутреннего ядра вблизи ее границы в интервале 300 км и высокую гомогенность внешнего ядра. Сравнение проводилось по изучению разностей travel-time трасс BC и DF (BC = 148°, DF = 152°), а также по сравнению амплитуд A_{BC}/A_{DF}. Большинство авторов

работ по анизотропии внутреннего ядра показывают на то, что это свойство присуще сравнительно тонкому слою вблизи его границы. Напомним, что результаты исследований пространственного распределения splitting-функций показывают главную роль не границ, а самих объемов мантии и ядра. Этот вопрос специально никем не исследовался и остался пока окончательно не выясненным.

Заключая обсуждение проблемы анизотропии, нельзя не отметить высокий вычислительный уровень серии реферируемых работ. Обратим внимание на то, что обнаружен эффект порядка одного и менее процента. Обсуждается различие свойств Земли во внутреннем ядре с точностью в доли процента (!). Выявлено, что различия, ответственные за анизотропию свойств внутреннего ядра, приурочены к его границе. Оценена толщина этого слоя. Аналогично этому показано, что анизотропия свойств мантии так же проявляется на границе ядро-мантия. Выполнена объемная работа по синтезу сейсмограмм, их спектральному анализу, коррекции скоростных и плотностных моделей Земли, корреляции синтезированных сигналов с, - получаемыми в результате наблюдений, которые, в свою очередь, прошли непростой путь чистки, фильтрации и т.п. В целом можно считать, что в физике Земли выполнена серия хороших работ, которые стремятся сделать эту науку точной из созерцательно-описательной, в состоянии которой она еще пребывает.

9. 8. Прогноз землетрясений.

На примере критической оценки метода VAN. Фрагменты из статьи: Geller R.J. VAN: a critical evaluation, in Critical review of VAN, ed. J.Lighthill, World Scientific, P. 155-238, 1996. Singapore.

Детальное изучение попыток прогнозов землетрясений, сделанных греческими сейсмологами: Varotsos, Alexopoulos, и Nomicos (VAN) и их сторонниками, - вызывает много сомнений и противоречий. Телеграммы и факсы, отправленные VAN, не следует признавать в качестве “предсказания землетрясений”, т.к. они недостаточно точны, т.е. весьма неточно предсказывают и координаты эпицентра, и дату, и магнитуду будущего землетрясения. VAN и их сторонники претендовали на успешный прогноз даже в тех случаях, когда землетрясения не соответствовали предсказанному ими времени, на сотню км. “промахивались” по пространству и терпели неудачу при оценке ключевого параметра - магнитуды. Можно привести примеры, в которых VAN претендовали на “успех” при предсказании, сделанном во время массы микроземлетрясений, или предсказании афтершоков больших землетрясений, но такой “успех” нельзя считать значительным. В целом, можно считать попытки VAN прогноза землетрясений неудачными и не имеющими достаточных оснований. В обсуждаемом обзоре, на основании анализа статей в газетах и журналах, показано, что VAN и их сторонники в Японии систематически использовали mass media, чтобы как можно шире распространять свои прогнозы. Р. Геллер в цитируемой статье детально исследовал все сделанные за последние 110 лет попытки предсказаний землетрясений. В течение этого времени авторами прогнозов делались оптимистические утверждения, но все они, в конечном счете, оказывались несостоятельными. Неудачи этих попыток согласуется с некоторыми теоретическими работами по нелинейной динамике, из которых следует, что землетрясения вообще непредсказуемы.

VAN-метод претендует на краткосрочный (short-term prediction) прогноз в отличие от долгосрочного прогноза (long term prediction) для временных интервалов в несколько лет. Многие сейсмологи думают, что long term probabilistic forecasting (долгосрочное вероятностное предсказание) - это более подходящий термин для названия таких исследований, т.к. общественность, видимо, считает, что prediction относится только к предупреждению о надвигающемся землетрясении. В этой статье prediction (прогноз) относится только к т.н. краткосрочному прогнозу.

Исследования по долгосрочному прогнозу так же являются дискуссионными. Например, Kagan и Jackson оценили некоторые долгосрочные прогнозы (forecasts), основанные на гипотезе сейсмического разрыва (seismic gap hypothesis), причем, их статистический анализ показал, что все эти долгосрочные прогнозы были неудачными. Специалисты Геологической Службы США установили, что было сделано предупреждение о возможности землетрясения Loma Prieta в Калифорнии в 1989 г., но эти претензии на прогноз были отвергнуты Savage. Геологическая Служба США провела эксперимент по прогнозу землетрясения в Parkfield, California, где, как было установлено на основе анализа периодической сейсмичности, должно произойти землетрясение с M = 6, в период между 1985 и 1993 г.г. Этого землетрясения не произошло. Savage показал, что если бы оно действительно произошло в прогнозируемое время, то его магнитуда, с точки зрения статистики, должна бы быть более умеренной.

Рекомендации IASPEI для отбора предвестников. В 1991 г. комиссия IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth Interior) сделала предложения по прогнозу: "Рекомендации для отбора возможных предвестников землетрясения". Основные идеи состоят в следующем:
Утвержденные критерии:
1) наблюдаемая аномалия должна иметь отношение к напряжению, деформации или какому-либо механизму, приводящему к возникновению землетрясения;
2) аномалия должна одновременно наблюдаться на более чем одном приборе, или в более чем одном месте;
3) амплитуда наблюдаемой аномалии должна зависеть от расстояния до места, на которое приходится главный удар (main shock). Если амплитуда наблюдаемого сигнала отрицательна и эти измерения существенно ближе к гипоцентру, то должно быть получено некоторое независимое доказательство соответственной зависимости чувствительности среды;
4) ценность метода оценивается по отношению размера опасной зоны к общей площади.

***Данные*:** Должно быть убедительно показано, что калибровка прибора хорошо известна и что прибор измеряет не случайный шум, а сигнал, связанный с тектоническими изменениями среды.

***Обнаружение аномалии*:** Определение аномалии должно быть точно установлено таким образом, чтобы она соответствовала и другим подходящим данным. Разность между аномальными и нормальными величинами должна быть выражена количественно. Должна быть выявлена природа помех и оценено отношение сигнал/шум. Должны обсуждаться все случаи не выявления аномалии вблизи гипоцентра произошедшего землетрясения.

***Связь аномалий с землетрясениями*:** Должны быть точно установлены правила и причины связи данной аномалии с данным землетрясением. Определение аномалии и правило связи должны устанавливаться на основании другой системы данных, чем та, из которой делается заявка на аномалию предвестника. Непременно должна оцениваться вероятность того, что произошло "предсказанное" землетрясение и устанавливаться соответствие с аномалией предвестника. Должны обсуждаться случаи (и частота их появления) ложных тревог (аномалия обнаружена, а землетрясения не произошло) и пропусков (произошло не предсказанное землетрясение).

Известно, что *никогда не наблюдалось* предвестников, удовлетворяющих этим рекомендациям. Утверждения VAN о наблюдаемых *сейсмических электрических сигналах* - SES (Seismis Electrical Signals) далеки от рекомендованных критериев.

Являются ли землетрясения предсказуемыми? Как обсуждалось выше, в последние более 110 лет, большое число ученых делало многочисленные попытки прогноза землетрясений без каких-либо положительных результатов. Нет другой области исследований в физике со сравнимой историей непрерывных неудач. Прежде чем делать дальнейшие попытки в этой области, видимо, разумно посмотреть, является ли, в принципе, прогноз землетрясений осуществимым.

Мы понимаем сейсмичность в общих чертах. Например, конвекция в мантии приводит к тому, что различные части литосферы Земли сталкиваются между собой с постоянной скоростью. Хрупкая часть литосферы не может свободно деформироваться, так что энергия деформации постоянно накапливается. Время от времени часть энергии деформации реализуется посредством землетрясений различных интенсивностей. Величина энергии выделяемой при землетрясении зависит от уровня "тектонического напряжения", который неизвестен. Однако, минимальные оценки величины энергии, реализуемой землетрясением, могут быть сделаны. Kanamori суммировал недавние работы по этой теме.

Обзор Kagan выделяет трудности, с которыми сталкивается исследователь при изучении механизма землетрясения:

1) нет исчерпывающей теории землетрясения, даже основные соотношения не могут быть логически получены из фундаментальных физических законов;
2) землетрясения происходят глубоко внутри Земли; т.е. в месте, недоступном для прямых наблюдений и измерений;
3) эксперименты с землетрясениями невозможны;
4) моделирование разлома либо в лаборатории, либо с помощью компьютера находится еще в рудиментарной стадии; неясно, применимы ли результаты такого моделирования к естественным землетрясениям;
5) появление землетрясения характеризуется чрезвычайной случайностью; случайная (стохастическая) природа землетрясений не уменьшается за счет более многочисленных и более точных измерений;
6) степень случайности сейсмичности много больше, чем атмосферной турбулентности; тогда как возможно предсказать погоду при увеличении точности наблюдений, землетрясение поражает без предупреждения.

Возникновение землетрясения на отдельном разломе особенно чувствительно не только к характеру распределения внутреннего напряжения, но и к свойствам среды в окрестности этого разлома, а так же к распределению напряжений и структуре Земли в отдельных областях. Начало землетрясения, и распространение разрывов среды, являются примерами, которые Bak и Tang называют самоорганизующейся критичностью. Хотя этот термин, видимо, не имеет строгого количественного определения, он означает критическое состояние, где нет характерного времени, пространства или масштаба энергии и все пространственные и временные функции корреляции являются степенными законами. Bak и Tang изучили динамическое развитие схематической модели повреждений, основанной на ячеистых автоматах (based on cellular automata) и сделали заключение, что:

"*Если механизм обсуждаемого здесь типа является действительно ответственным за землетрясения, нет надежды когда-либо сделать его прогноз*".

За исключением факта, что максимальная энергия землетрясения ограничена толщиной сейсмогенной зоны, метод самоорганизующейся критичности, видимо, является хорошей моделью для существующего состояния Земли. Эффектный пример был получен при землетрясении Landers, Калифорния, 1992. Это землетрясение оказалось триггером внезапного и широко распространившегося увеличения сейсмической активности в западных областях США, на расстоянии до 1250 км. Этот факт имеет отрицательный смысл для прогноза землетрясений, т.к. он наводит на мысль, что литосфера Земли действительно находится в состоянии самоорганизующейся критичности и что маленькое

и удаленное возмущение может оказаться “каплей”, переполнившей “чашу терпения”. Наивные надежды на прогноз основаны на вере, что существуют явления предвестников, пространственная и временная протяженность которых, или амплитуда регистрируемого сигнала, будут пропорциональны энергии предстоящего землетрясения. Время от времени такие предвестники еще будут предлагаться и обсуждаться, но для того, чтобы поддерживать их, практически нет никаких доказательств.

Недавно появившаяся работа по нелинейной динамике, а так же внимательное изучение ряда землетрясений внесли сомнение в возможность существования предвестников, которые позволят надежно предсказать время, местоположение и магнитуду сильного землетрясения. Небольшие землетрясения происходят непрерывно и любое из них может оказаться потенциальным триггером, запускающим лавину сильных событий всего за несколько секунд, или десятков секунд. При изучении поверхностных разрывов, возникающих при сильных землетрясениях, было обнаружено, что они образуются в результате воздействия множества толчков. Детальный анализ записей волн от многих землетрясений показал, что возникающие в момент толчка несколько разрывов появляются не одновременно, а “по очереди”, причем каждый “запускается” предыдущим. Сложность процессов формирования разрывов еще раз наводит на мысль, что прогноз землетрясения невозможен.

Подводя итог рассмотренной ситуации, можно констатировать, что эмпирические попытки прогноза землетрясений потерпели неудачу - *не удалось найти какие-либо явления, которые можно было бы надежно идентифицировать как предвестники будущего землетрясения, время, его местоположение и магнитуду.* Кроме этого, недавние результаты по нелинейной динамике наводят на мысль, что землетрясения действительно не прогнозируемы. Дальнейшие неудачи в попытках эмпирического прогнозирования полностью согласуются с гипотезой, что предвестники, которых так ищут, просто не существуют.

“Прогноз землетрясений”. Утверждение, называемое “прогнозом землетрясения”, должно быть таким же недвусмысленным, как пари на скачках. Если объявляется прогноз землетрясения, то время, место и его магнитуда должны быть обозначены однозначно и не двусмысленно. Прогноз может считаться успешным только в том случае, если положение эпицентра, время и магнитуда землетрясения точно попадают в заранее объявленное “окно” (announced windows).

На скачках неважно, отстала лошадь на голову, или на 10 корпусов. Аналогично, если хотя бы один из объявляемых параметров прогноза землетрясения (время, эпицентр или магнитуда) оказался чуть не в “окне”, прогноз считается неудачным (a failure). Такая строгая оценка весьма существенна. Дело в том, что в ряде случаев при оценке прогноза допускается небрежность. Если это так, то ширина “окна” будет расти до тех пор, пока требования “успеха” прогноза окажутся бессмысленными. Необходимо присмотреться ко всем “прогнозам” VAN, которые принято считать успешными. В этом случае можно увидеть, что было заявлено заранее, и какими оказались параметры произошедших землетрясений. Такая проверка выявила пять проблем. Во-первых, прогнозы VAN никогда не устанавливают точно диапазон для любого из параметров землетрясения. В своих прогнозах VAN иногда приводят области их неопределенности, иногда эти области совершенно неясны и, что важно, они часто изменяются с течением времени. Во-вторых, VAN претендуют на успешный прогноз, в то время как один или несколько параметров землетрясения не попадают в прогнозируемое “окно”. В-третьих, при обсуждении “успехов” или “провалов” их “прогнозов”, VAN используют данные из сборника “Ten Days Preliminary Seismogram Readings at Athens”, а не более точные данные из бюллетеня обсерватории Athen. Иногда VAN используют данные по параметрам землетрясений, опубликованные другими организациями, когда данные афинской обсерватории кажутся авторам прогноза “неблагоприятными”. В-четвертых, прогнозы VAN часто не могут быть

количественно установлены. В-пятых, некоторые “успешные” прогнозы VAN на поверку оказываются афтершоками, либо событиями, которые могли быть предсказаны на основе априорных данных о сейсмичности.

Во время обсуждения в Лондоне этой проблемы проф. Varotsos сказал: “Даже если у нас получается задержка землетрясения относительно прогноза на несколько дней, или даже неделю, то это не является его “провалом”. Эта позиция, когда нет особой разницы между “успехом” и “провалом”, делает прогнозы практически бессмысленными. Кроме этого, такой подход делает практически невозможным провести строгую статистическую проверку VAN-”прогнозов”. Если пространственная неопределенность прогнозируемого местоположения эпицентра составляет, скажем, окружность, радиусом 100 км, то практически все равно, будет ли находиться эпицентр в 101 км, или в 99 км от предсказанного эпицентра. Неопределенность оценки глубины гипоцентра составляет примерно 5-10 км, т.о. приведенные выше оценки, насколько “успешен” или “неудачен” был прогноз, представляются весьма произвольными.

Тем не менее, публичное обсуждение VAN-метода проводится в терминах, предлагаемых авторами и их сторонниками. Авторы VAN привлекли широкое внимание научной общественности, утверждая, что они делают большое количество “успешных прогнозов”. Так как именно этот термин используют авторы, мы тоже вынуждены пользоваться им. Однако мы вынуждены придерживаться “железного” правила, по которому прогноз землетрясения будет считаться неудачным, если хоть один его параметр окажется даже на иоту вне предсказанного диапазона, иначе термины “успех” или “неудача”, вообще не имеют какого-либо значения.

Точность прогноза землетрясений. В течение многих лет сейсмологи пытались определить, чем должен отличается прогноз от весьма неопределенного утверждения об увеличении сейсмичности. В 1935 г. H. Wood и B. Gutenberg писали: “... прогноз землетрясения должен точно, в очень узких пределах, указывать место и время когда оно произойдет. В прогнозе должна быть указана сила толчка, так как слабенькие толчки происходят очень часто во всех сейсмически активных областях (регионах)”. В своем Президентском Обращении 1976 г. к Американскому Сейсмологическому Обществу (SSA) C.R.Allen заявил, что прогноз землетрясений должен обладать шестью признаками:
1) он должен определить время события;
2) определить место;
3) магнитуду;
4) должен содержать оценку надежности;
5) должен давать указание на то, что землетрясение, это случайное событие;
6) должен быть представлен в доступной форме, таким образом, чтобы легко можно было бы оценить, удачен он, или нет.

Комиссия по Прогнозу Землетрясений Комитета по Сейсмологии (The Panel on Earthquake of the Committee on Seismology of the U.S.) предложила в 1976 г. следующее определение:
“Прогноз землетрясения должен обозначить ожидаемый диапазон амплитуды, географический регион, в котором может произойти землетрясение и время, когда оно случиться, с достаточной точностью, так, чтобы можно было реально судить об успехе либо провале прогноза”.

Руководство SSA в 1983 г. опубликовало:
“Прогноз землетрясений включает: обозначение точного времени, местоположения, магнитуды и вероятности появления ожидаемого события с достаточной точностью, таким образом, чтобы была возможность минимизировать потери жизней и уменьшить ущерб от разрушений имущества (Earthquake Prediction Evaluation Guidelines, California Office of Emergency Services, 1977. P. 1)”.

Международная рабочая группа, созванная UNESCO и IASPEI, рекомендовала в 1984 г., чтобы прогнозы выражались в вероятностных терминах:
"... рекомендуется, чтобы прогнозы были сформулированы в виде вероятностных значений параметров ожидаемого землетрясения: место-время-магнитуда. Роль прогноза увеличивается при возрастании его вероятности, по сравнению с ситуацией, когда прогноза не делалось".
"Прогнозы" VAN не удовлетворяют критерию, предъявляемому к прогнозу.

В настоящее время не существует ни одного надежного метода прогноза землетрясений. Более того, это вообще невозможно сделать, не достигнув ясного понимания физики землетрясения. Проблема физики землетрясения не нашла своего решения и это остается одной из важнейших задач физики Земли.

Литература.

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. М.: Мир. 1983

Альтерман З., Ярош Х., Пекерис Х.Л. Колебания Земли. В сб. Собственные колебания Земли, ред. В.Н. Жарков. М.: Мир. 1964. 315 с.

Вадковский В.Н., Веселовский Р.В. «Сейсмические гвозди» японской зоны субдукции». Вторые Горшковские чтения. М.: 2000.

Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686с.

Журков С.Н., Куксенко В. С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. науч. тр. М.: Наука, 1980. С. 78-85.

Кузнецов И.В., Кейлис-Борок В.И. Взаимосвязь землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса. ДАН. 1997. Т. 355. № 3. С. 389-293.

Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. 1992. Новосибирск: Наука. 96с.

Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин. ПМТФ. 2001-а. Т. 42. № 4. С. 184-189.

Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра. УФН. Т. 167. № 9. С. 1001-1012. 1997.

Пантелеев В.Л., Физика Земли и планет. МГУ, Физфак. 2001.
http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/lecture/geophiz/index.html

Пекерис Х.Л., Альтерман З., Ярош Х. Сравнение теоретических и наблюденных периодов собственных колебаний Земли. В сб. Собственные колебания Земли, ред. В.Н. Жарков. М.: Мир. 1964. 315 с.

Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Гос. тех.-теор. Издат. 1955, 543 с.

Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск. ОИГГМ. 1997. 302 с.

Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Рожкова В.В. Закономерности миграции очагов землетрясений вдоль островных дуг. ДАН. 1988. Т. 360. № 2. С. 263-266.

Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. М.: МГУ. 2005. 570 с.

Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование северной Евразии // Вестник ОГГГГН.- 1999. - № 1(7)'99.

Ahrens T.J. Equation of state. Chapter 4. High-Pressure Shock compression of solids Ed. Asay J.R., Shahinpoor M. Springer-Verlag. New York Inc. 1993. 399 p.

Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. P. 381-384.
Bak P., Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. J. Geophys. Res. 1989. V. 94. N. B11. P. 15.635-15.637.
Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. Science. 1966. V.153. P. 990-992.
Bhattacharyya J., Shearer P., Masters G. Inner core attenuation from short-period PKP (BC) versus PKP (DF) waveforms. Geophys. J. Int. 1993.V. 114. P. 1-11.
Brown S.R., Scholz C.H., Rundle J.B. A simplified spring-block model of earthquakes. Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. N.2. P. 215-218.
Burridge R., Knopoff L. Model and theoretical seismicity. Bull. Seism. Soc. Am. 1967. V. 57. N. 3. P. 341-372.
Carlson J.M., Langer J.S., Shaw B.E., Tang C. Intrinsic properties of a Burridge- Knopoff model of an earthquake fault. Phys. Rev. A. 1991. V. 44. N. 2. P. 884-897.
Carlson J.M., Langer J.S., Shaw B.E. Dynamics of earthquake fault. Rev. Mod. Phys. 1994. V. 66. N. 2. P. 657-670.
Chao B.F., Gross R.S. Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes. Geophys. J.R. astr. Soc. 1987. V. 91. P. 569-596.
Chao B.F., Gross R.S. Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes. Geophys. J. Int. 1995-a. V. 122. P. 776-783.
Chao B.F., Gross R.S. and Dong D-N. Changes in global gravitational energy induced by earthquakes. Geophys. J. Int. 1995-b. V. 122. P. 784-789.
Christensen K. Replies. Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. N. 8. P. 1289-1292.
Creager K.C. Anisotropy of the inner core from differential travel of the phases PKP and PKIKP. Nature. 1992. V. 356. P. 309-314.
Christensen K. Replies. Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. N. 8. P. 1289-1292.
Deuss A., Woodhouse J.H., Paulssen H., Trampert J. The observation of inner core shear waves. Geophys. J. Int. 2000. V. 142. P. 67-73.
Ding E.J., Lu Y.N. Analytical treatment for a spring-block model. Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. N. 23. P. 3627-3630.
Geller R.J. VAN: a critical evaluation, in Critical review of VAN, ed. J.Lighthill, World Scientific, P. 155-238, 1996. Singapore.
Giardini D., Li X.D., Woodhouse J.H. Splitting functions of long-period normal modes of the Earth. J. Geophys. Res. 1988. V.93. №. B11. P.13716.
Gilbert F. Splitting of the free-oscillation muliplets by steady flow. Geophys. J. Int. 1994. V. 116. P. 227-229.
Ishido T., Nishizawa O. Effect of zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression. J. Geophys. Res. 1984. V. 89. N. B6. P. 4153-4159.
Ito K., Matsuzaki M. Earthquakes as self-organized critical phenomena. J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N. B5. P. 6853-6860.
Julian B.R., Davies D., Sheppard R.M. PKJKP. Nature. 1972. V. 235. P. 317-318.
Kaneshima, S., K. Hirahara, T. Ohtaki, Y. Yoshida, Seismic structure near the inner core-outer core boundary, Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. P. 157-160.
Karato S. Inner core anisotropy due to the magnetic field-induced preferred orientation of iron. Science. 1993. V. 262. 1708-1711.
Klein W., Rundle J. Comment on "Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes". Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. N. 8. P. 1288.
Knopoff L., Landoni J.A., Abinante M.S. Dynamical model of an earthquake fault with localization. Phys. Rev. A. 1992. V. 46. P. 7445-7449.
Kusunose K., Lei X., Nishizawa O., Satoh T. Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenters distribution in granitic rock. Phys. Earth Planet. Inter. 1991. V. 67. P. 194-199.

Lehman I. P'. 1936. Bureau Centrale Seismologuique Internationale, Travaux Scientifiques, V. A14, P. 3-31.
Lei X., Nishizawa O., Kusunose K., Satoh T. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes. J. Phys. Earth. 1992. V. 40. P. 617-634.
Love A. E. H. A treatise on the mathematical theory of elasticity. 4th edn. Cambridge Univ. Press. 1927.
Masters G., Gilbert F. Structure of the inner core inferred from observations of its spheroidal shear modes. Geoph. Res. Lett. 1981. V. 8. N. 6. P. 569-571.
McSweeney T. J., Creager K.C. Depth extend of inner-core anisotropy from PKP phases recorded at the Alaska Seismic Network. 1993. EOS. V. 74. P. 407.
Morelli A., Dziewonski A.M., Woodhouse J.H. Anisotropy of the inner core inferred from PKIKP travel times. Geoph. Res. Lett. 1986. V. 13. N.13. P. 1545-1548.
Morelli A., Dziewonski A.M. Topography of the core-mantle boundary and lateral homogeneity of the liquid core. Nature. 1987. V.325. P. 678-683.
Nielsen S., Knopoff L., Tarantola A. Model of earthquake recurrence: role of elastic wave radiation, relaxation of friction, and inhomogeneity. J. Geophys. Res. 1995. V.100. N. B7. P. 12,423-12,430.
Okal E.A., Cansi Y. Detection of PKJKP at intermediate periods by progressive multi-channel correlation. Earth Planet. Sci. Lett. 1998. V. 164. P. 23-30.
Olami Z., Feder H.J.S., Christensen K. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. N. 8. P. 1244-1247.
Poupinet G., Pillet R. and Souiau A. Possible heterogeneity of the Earth's core deduced from PKIKP travel times. Nature. 1983. V. 305. P. 204-206.
Reid H.F. The elastic-rebound theory of earthquakes. University of California Publ. Geol. Sci. 1911. V. 6. P. 413-444.
Rundle J.B. A simplified spring-block model of earthquakes. Geophys. Res. Lett. 1991. V. 18. N.2. P. 215-218.
Sahimi M., Robertson M.C., Sammis C.G. Fractal distribution of earthquake hypocenters and its relation to fault patterns and percolation. Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. N. 14. P. 2186-2189.
Shearer P.M., Toy K.M. and Orcutt J.A. Axi-symmetric Earth models and inner-core anisotropy. Nature . 1988. V. 333. P. 228-232.
Shearer P.M. Constraints on inner-core anisotropy from ISC PKP(DF) data. J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 19647-19660.
Song X., Helmberger D.V. Anisotropy of Earth's inner core. Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. N. 23. P. 2591-2594.
Su W. J., Dziewonski A. M., Jeanloz R. Planet within a planet – Rotation of the inner core of Earth. Science. 1996. V. 274. P. 1883-1887.
Thio H.K., Kanamori H. Sourse complexity of the 1994 Nortridge earthquake and its relarion to aftershock mechanisms. BSSA 1996 V.86. No. 1B. P. S84-S92.
Tromp J. Support for anisotropy of the Earth's inner core from free oscillations. Nature. 1993. V. 366. P. 678-681.
Tromp J. Normal-mode splitting observations from the Great 1994 Bolivia and Kuril island earthquakes: constraints on the structure of the mantle and inner core. GSA TODAY, 1995. V. 5. N. 7.
Vinnik L., Takeshita T., Dreger L. Anisotropy in the inner core from the broadband records of the GEOSCOPE network. Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. P. 1671-1674.
Widmer R., Masters G., Gilbert F. Observably split multiplets data analysis and interpretation in terms of large-scale aspherical structure. Geophys. J. Int. 1992. V. 111. P. 559-576.
Woodhouse J. H., Giardini D., Li X. Evidence for inner core anisotropy from free oscillations. Geoph. Res. Lett. 1986. V. 13. N.13. P. 1549-1552.

Глава. 15. Гравитационное поле Земли.

В главе 15 приведена информация о гравитационном поле Земли. Рассмотрены такие вопросы как: гравитационный потенциал точки, тела и его свойства, гравитационное поле шара и планет, потенциал силы тяжести и фигуры равновесия небесных тел. В главе 7 обсуждаются проблемы гравитационных аномалий и строения Земли, изостазия, приливы и вариации силы тяжести, а также эффект Этвеша и устройство гравиметров. В главу включен раздел, в котором обсуждается проблема, как изменялось гравитационное поле Земли в прошлом.

15. 1. Гравитационный потенциал.

Потенциалом называется работа, которую нужно совершить, которую нужно совершить, чтобы переместить данную материальную точку с массой, равной единице, из заданной точки в бесконечность. Пусть F есть вектор-сила, приложенная к материальной точке, r- радиус-вектор этой точки. Тогда потенциалом будет величина

$$\varphi(r) = \int_r^\infty F^T dr \qquad (15.1)$$

Введем понятие силовой функции $V(r)$. По определению частная производная силовой функции вдоль любого направления равна компоненте силы вдоль этого направления. Отсюда следует, что

$$F^T dr = F_x dx + F_y dy + F_z dz = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz$$

Таким образом, подынтегральное выражение в формуле (15.1) есть не что иное, как полный дифференциал силовой функции, поэтому

$$\varphi(r) = \int_r^\infty dV(r) = V(\infty) - V(r)$$

Силовую функцию на бесконечности можно приравнять нулю, поэтому будем считать, что потенциал и силовая функция отличаются лишь знаком.
В *гравиметрии*, как разделе геофизики, традиционно не разделяют эти два понятия, и под термином гравитационный потенциал обычно понимают силовую функцию. В нашем курсе мы также будем придерживаться этих традиций.

Гравитационный потенциал материальной точки. Согласно закону Ньютона, две материальные точки притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Выберем систему координат так, чтобы одна из материальных точек оказалась в начале этой системы. Тогда другая материальная точка будет иметь радиус-вектор r. Вектор напряженности гравитационного поля в точке с радиус-вектором r равен силе, которая действует на материальную точку с массой, равной единице. Вектор этой силы можно изобразить следующим образом $F = -Gmr/r^3$, где G- гравитационная постоянная. Проекции этой силы на оси декартовой системы координат будут равны

$$F\text{x} = -Gmx/r^3 \quad F\text{y} = -Gmy/r^3 \quad F\text{z} = -Gmz/r^3.$$

Абсолютная величина этого вектора, равна

$$|F| = Gm/r^2. \qquad (15.2)$$

Заметим, что размерность напряженности поля тяготения совпадает с размерностью ускорения, поэтому часто вместо силы притяжения единицы массы, или *удельной силы притяжения* говорят об *ускорении силы притяжения*.

Формулу (15.2) еще называют как закон обратных квадратов. Весь опыт небесной механики говорит о том, что в масштабах Солнечной системы он работает очень хорошо:

не найдено каких либо подозрений, что его нужно подправлять. Лабораторные эксперименты по определению гравитационной постоянной G дали повод подозревать, что этот закон не абсолютно строг. Хотя причиной несоответствия теории и практики вполне могли быть и неизвестные систематические погрешности. В конце минувшего века наблюдался повышенный интерес к закону обратных квадратов. В разных странах проводились эксперименты и применялись современные самые высокоточные инструменты для обнаружения каких-либо невязок между теорией и практикой. Однако никаких значимых расхождений не обнаружено.
Нетрудно убедиться, что гравитационный потенциал точки (силовая функция) равен, $V(r) = Gm/r$, где r- расстояние между притягивающимися точками (скалярная величина).

Гравитационный потенциал тела. Строго говоря, закон обратных квадратов работает только для материальных точек. Однако физики-теоретики и экспериментаторы доказывают, что для гравитационного поля выполняется *принцип суперпозиции*: гравитационное поле двух материальных точек (или тел) равно сумме гравитационных полей каждой из этих точек (или тел) по отдельности. Иначе говоря, силы тяготения не экранируются.

Согласно принципа суперпозиции, гравитационный потенциал n точек равен сумме гравитационных потенциалов всех точек

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r}\left(\left(1-\frac{x}{r}\right)^2 + \frac{y^2+z^2}{r^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$V = G\left(\frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} + ... + \frac{m_n}{r_n}\right) = G\sum_{i=1}^{n}\frac{m_i}{r_i}$$

Если точек бесконечное число, а массы их бесконечно малы, то имеем дело с интегральной суммой, и нашу формулу следует записать так

$$V = G\int_T \frac{dm}{\rho} \qquad (15.3)$$

где ρ - расстояние между фиксированной точкой P элементом притягивающей массы dm. Пусть x, y, z - координаты точки P, а $\xi,\ \eta,\ \zeta$ - координаты текущей точки с массой dm тогда формулу (15.3) можно переписать следующим образом:

$$V(x,y,z) = G\int_T \frac{dm(\xi\eta\zeta)}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+(z-\zeta)^2}} \qquad (15.4)$$

Приведенный интеграл берется по всему объему тела, это трехкратный интеграл. Его величина зависит от распределения плотностей внутри тела.

15. 2. Свойства гравитационного потенциала.

Отметим некоторые свойства потенциала притяжения. Гравитационный потенциал тела регулярен на бесконечности:

$$\lim_{r\to\infty} V = Gm$$

это можно понять, рассуждая следующим образом. Гравитационный потенциал тела, удаленного на большое расстояние от точки, в которой нас интересует значение потенциала, то же, что и потенциал материальной точки, так как все детали строения тела и его форма на больших расстояниях становятся не существенными. Остается лишь масса тела.

Гравитационный потенциал $V(x, y, z)$ непрерывен вместе со своими *первыми* производными всюду как вне тела, так и внутри его. Несколько позже, на примере шара, мы это продемонстрируем.

Вторые производные потенциала при переходе через поверхность шара терпят разрыв. Это свойство также покажем на примере шара.

Гравитационный потенциал вне притягивающего тела подчиняется уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=0.$$

Покажем это. Поскольку

$$\rho^2=(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+(z-\zeta)^2,$$

то $$\frac{\partial}{\partial x}(1/\rho)=-1/\rho^2\frac{\partial\rho}{\partial x}=-\frac{(x-\zeta)}{\rho^3},$$

далее $$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(1/\rho)=-\frac{\partial}{\partial x}(\frac{(x-\zeta)}{\rho^3})=3\frac{(x-\zeta)}{\rho^4}\frac{\partial\rho}{\partial x}-(1/\rho^3)=3\frac{(x-\zeta)^2}{\rho^5}-(1/\rho^3),$$

Аналогично

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2}(1/\rho)=3\frac{(z-\eta)^2}{\rho^5}-(1/\rho^3):\ \frac{\partial^2}{\partial z^2}(1/\rho)=3\frac{(z-\xi)^2}{\rho^5}-(1/\rho^3).$$

Отсюда следует, что

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(1/\rho)+\frac{\partial^2}{\partial y^2}(1/\rho)+\frac{\partial^2}{\partial z^2}(1/\rho)=3\frac{(x-\zeta)^2+(y-\eta)^2+(z-\xi)^2}{\rho^5}-(3/\rho^3)=0.$$

Для записи уравнения Лапласа используют линейный оператор вида

$$\Delta=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Из только что сделанных выкладок следует, что $\Delta(\frac{1}{\rho})=0$. Теперь обратимся к формуле (15.3). Используя операторную форму записи, получим:

$$\Delta V(x,y,z)=G\int_T\Delta(1/\rho)dm=0.$$

Гравитационный потенциал тела в точке, расположенной внутри тела подчиняется уравнению Пуассона:

$$\Delta V(x,y,z)=\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=-4\pi G\sigma.$$

Легко видеть, что уравнение Пуассона является обобщением уравнения Лапласа, ибо в частном случае, в точке, где плотность σ равна нулю, то есть, где нет гравитирующих масс, потенциал подчиняется уравнению Лапласа.

15. 3. Гравитационный потенциал шара.

Все планеты Солнечной системы имеют сферическую форму. Поэтому имеет смысл определить гравитационный потенциал шара. Для упрощения задачи, мы будем предполагать, что плотность шара зависит только от расстояния до его центра Нетрудно убедиться, что такой шар притягивает точно так же, как и материальная точка с массой равной массе шара и помещенная в его центр. Чтобы в этом убедиться, необходимо для формулы (15.4) выбрать такую систему координат, с помощью которой было бы удобно выполнять интегрирование.

Для начала, представим себе, что точка *P* находится вне шара. Соединим эту точку с центром шара (точка *O*), полученный радиус-вектор обозначим через *r*. Радиус-вектор элемента массы *dm* будем обозначать буквой *r*'. Следовательно, расстояние между элементом массы и точкой *P*, которое мы обозначили греческой буквой ρ, будет иметь вид $\rho=\sqrt{r'^2+r^2+2rr'\cos\varphi}$, где φ- угол с вершиной в центре шара, образованный радиус-векторами *r* и *r*'. Наконец, элемент массы *dm* определяется произведением плотности на

объем элементарно малого параллелепипеда со сторонами dr', $r'd\varphi$, и $r'\sin\varphi\, dA$. Здесь мы ввели еще одну степень свободы - поворот вокруг оси OP на угол dA. Таким образом,
$dm = \sigma(r'\sin\varphi dA)(r'd\varphi)dr' = \sigma(r'^2)\sin\varphi dr'd\varphi dA$
Теперь вместо формулы (15.4) записать

$$V(r) = G\int_0^R\int_0^\pi\int_0^{2\pi}\sigma(r')\frac{(r'\sin\varphi)}{\rho}dr'd\varphi dA \qquad (15.5)$$

Заменим переменную интегрирования φ на ρ. Определим пределы интегрирования. Очевидно, что вместо 0 и π нужно взять $r- r'$ и $r+ r'$, а $\rho d\rho = rr'\sin\varphi d\varphi$. Переменную A подынтегральное выражение не содержит, поэтому внутренний интеграл легко берется.

Вместо (15.5) теперь будем иметь

$$V(r) = 2\pi G\int_0^R\int_{r-r'}^{r+r'}\sigma(r')\frac{r'^2\rho d\rho}{\rho rr'}d\rho dr' = \frac{4\pi G}{r}\int_0^R\sigma(r')r'^2dr' \qquad (15.6)$$

Нетрудно догадаться, что $4\pi\sigma(r')r'^2dr'$ есть масса бесконечно тонкой сферы dM, поэтому

$$V(r) = \frac{G}{r}\int_0^R dM = \frac{MG}{r} \qquad (15.7)$$

Таким образом, мы пришли к очень важному выводу: шар со сферически симметрично распределенной массой притягивает так же, как и материальная точка с массой равной массе шара и помещенной в его центре.

Потенциал шара во внутренней точке. Рассмотрим сначала бесконечно тонкий шаровой слой с внутренней полостью, не содержащей массы. Тогда можно доказать, что внутри этой полости потенциал (силовая функция) есть постоянная величина, то есть этот шаровой слой внутреннюю точку не притягивает. Обратимся к рисунку. Через точку P проведем коническую поверхность с вершиной в этой точке. Тогда эта поверхность вырежет на сферической поверхности элементарную площадку dS_1, а на другой стороне сферы - элементарную площадку dS_2. Точка P лежит под площадкой dS_1 на расстоянии r_1 и испытывает со стороны этой площадки притяжение, равное $\mu\, dS_1 r_1^{-2}$, где μ - коэффициент пропорциональности, зависящий от поверхностной плотности этого шара и от направления внешней нормали к площадке по отношению к радиусу-вектору точки P. Элементарная площадка dS_2 расположена на расстоянии r_2 от точки P. Поскольку обе площадки видны из точки P под одним и тем же телесным углом, то $\mu\, dS_1 r_1^{-2} = \mu\, dS_2 r_2^{-2}$.

Итак, обе силы равны и направлены в противоположные стороны. Теперь будем рассуждать следующим образом. Через точку P проведем плоскость перпендикулярную радиус-вектору этой точки. Она разделит сферический "пузырь" на две части, назовем их условно верхнюю и нижнюю. Поскольку каждую из частей можно представить как бесконечную сумму элементарных площадок, то для каждой элементарной площадки верхней полусферы найдется симметричная ей площадка в нижней полусфере. Силы притяжения материальной точки, помещенной в точку P, со стороны верхней и нижней полусфер равны и противоположны по направлению. Отсюда вывод: материальная точка, помещенная внутри полой сферы, этой сферой не притягивается

Рассуждения, приведенные здесь, нельзя считать строго математически обоснованными. Мы рассчитываем больше на интуицию, чем на строгую математическую логику. Однако, в теории потенциала притяжения математически строго доказано, что оболочка не притягивает материальную точку и в случае, когда эта оболочка имеет эллипсоидальную форму.

Мы показали, что гравитационный потенциал в полости, окруженной сферической поверхностью, является постоянной величиной. Однако это имеет место лишь в том случае, когда эта полость притягивающих масс не содержит. Теперь откажемся от этого условия, и будем считать, что шар не полый, но плотность зависит только от расстояния

до центра шара. Проведем через точку P сферу так, что она разделит шар на внутренний шар с массой m и шаровой слой с массой M - m. Материальная точка будет притягиваться только внутренним шаром, так как шаровой слой, как мы видели, внутреннюю точку не притягивает. Поэтому гравитационная сила в точке P направлена в центр шара и равна $F = - Gm(r)/r^2$.

Знак "минус" мы поставили, чтобы подчеркнуть, что сила направлена в сторону, противоположную радиус-вектору. Массу внутреннего шара можно получить, интегрируя массу бесконечно тонкой сферы в пределах от 0 до r:

$$V(0) = 4\pi G\sigma \frac{R^2}{2} = \frac{4}{3}\pi R^3 \sigma G \frac{3}{2R} = \frac{3}{2}\frac{MG}{R} = \frac{3}{2}V(R)$$

$$m(r) = 4\pi \int_0^r \sigma(r')r'^2\, dr' \qquad (15.8)$$

Поскольку $F(r) = dV(r)/dr$, то для гравитационного потенциала во внутренней точке шара получим:

$$dV(r)/dr = \frac{4\pi G}{r}\int_0^r \sigma(r')r'^2\, dr'$$

Интегрируя, будем иметь

$$V(r) = -G\int_0^r \frac{m(r)}{r^2}dr + C,$$

где C - постоянная интегрирования. Полученное выражение можно проинтегрировать по частям.

$$V(r) = Gm(r)\frac{1}{r} - G\int_0^r \frac{1}{r}\frac{dm(r)}{dr}dr\Big|_0^r + C$$

Согласно формуле (7.8): $dm(r)/dr = 4\pi\sigma r^2$, поэтому

$$V(r) = Gm(r)\frac{1}{r} - G\int_0^r 4\pi\sigma r dr + C.$$

Определим теперь постоянную C. Мы знаем, что $V(R) = GM/R$, поэтому

$$V(r) = \frac{GM}{R} - G\int_0^R 4\pi\sigma r dr + C = \frac{GM}{R}.$$

Следовательно

$$C = G\int_0^R 4\pi\sigma r dr$$

Окончательно, формула для гравитационного потенциала во внутренней точке шара со сферически симметричной распределенной массой принимает вид

$$V_2(x,y,z) = \frac{G}{2r^3}(A + B + C + 3I)$$

$$V(r) = \frac{Gm(r)}{r} + 4\pi G\int_r^R \sigma(r')r'\,dr', r \le R \qquad (15.9)$$

При переходе через поверхность потенциал сохраняет непрерывность. Очевидно, что при $r = R$, будем иметь $V(R) = GM/R$ - потенциал точки с массой, равной M, расположенной в центре шара. В случае, когда точка Pнаходится в центре шара, то есть при $r \to 0$, $m(r)/r \to 0$, а

$$V(0) = 4\pi G\int_0^R \sigma(r')r'\,dr',$$

то эта величина зависит от закона изменения плотности с глубиной. В частности, если шар - однородный, то его потенциал в центре шара равен

$$V(0) = 4\pi G\sigma \frac{R^2}{2} = \frac{4}{3}\pi R^3 \sigma G \frac{3}{2R} = \frac{3}{2}\frac{MG}{R} = \frac{3}{2}V(R)\,. \qquad (15.10)$$

Отсюда следует вывод, что гравитационный потенциал в центре однородного шара в полтора раза больше, чем на его поверхности.

Гравитационный потенциал однородного шара. Гравитационный потенциал однородного шара во внешней точке ничем не отличается от потенциала шара, со сферически симметричным распределением массы, поэтому мы этот случай рассматривать не будем. Гравитационный потенциал однородного шара во внутренней точке может быть вычислен по формуле (15.9), в которой нужно положить плотность постоянной величине. Имеем:

$$m(r) = 4\pi\sigma\frac{r^3}{3}\ ,$$

$$\int_r^R \sigma r'\,dr' = \frac{\sigma}{2}(R^2 - r^2)\,,$$

следовательно:

$$V(r) = \frac{Gm(r)}{r} + 4\pi G\sigma\frac{1}{2}(R^2 - r^2) = \frac{2}{3}\pi G\sigma(3R^2 - r^2)\,. \qquad (15.11)$$

В центре шара ($r = 0$) $V(0) = 2\pi G\sigma R^2$ - значение, совпадающее с приведенным значением в формуле (15.10). На его поверхности $V(R) = GM/R$.

Определим силу притяжения во внутренней точке:

$$F = -\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{4}{3}\pi G r \qquad (15.12)$$

Таким образом: сила притяжения внутренней материальной точки со стороны масс сферического тела линейно растет по абсолютной величине с расстоянием от центра шара и направлена к его центру. Другими словами, закон Ньютона, или, как еще его называют, закон обратных квадратов, превращается в закон Гука - закон прямой пропорциональности "упругой" силы от величины отклонения тела от положения равновесия.

Нужно отметить, что если равномерно распределенная притягивающая масса занимает объем, ограниченный эллипсоидальной поверхностью, то и в этом случае вместо закона Ньютона следует брать закон Гука.

Покажем теперь, что во внутренней точке гравитационный потенциал подчиняется закону Пуассона:

$$\Delta V(P) = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -4\pi G\sigma\ ,$$

где σ - плотность вещества в точке P.

Будем считать, что мы имеем дело с произвольным телом, ограниченным замкнутой поверхностью S. Выделим внутри него фиксированную точку P и окружим ее сферой Σ с очень маленьким радиусом, с тем, чтобы плотность малой сферы считать постоянной величиной. Пусть V' - потенциал всех масс тела в точке P за исключением малой сферы, V_Σ - потенциал малой сферы, тогда:

$$V(P) = V'(P) + V_\Sigma(P).$$

Потенциал $V'(P)$ удовлетворяет уравнению Лапласа, так как точка Р является внешней по отношению к рассматриваемой области, а для потенциала во внутренней точке однородного малого шара мы получили:

$$V_\Sigma(P) = \frac{2\pi}{3}G\sigma(3\rho^2 - r^2)$$

где ρ - радиус малой сферы. Определим оператор Лапласа для гравитационного потенциала в точке P. Учитывая сказанное выше, будем иметь

$$\Delta V(P) = \Delta V_{\Sigma}(P) = -\frac{2}{3}\pi\sigma G\Delta r^2 .$$

Поскольку $r^2 = x^2+y^2+z^2$, то $\Delta r^2 = 6$, следовательно, $\Delta V(P) = - 4\pi G\sigma$, а это и есть уравнение Пуассона.

При переходе точки P через поверхность, где плотность изменяется скачком, изменится скачкообразно и правая часть уравнения Пуассона, левая часть которого представляет собой сумму вторых производных. Отсюда следует и разрыв непрерывности вторых производных гравитационного потенциала.

15. 4. Гравитационное поле планеты.

Все планеты Солнечной системы имеют форму, близкую к сферической. Поэтому, гравитационное поле шара можно рассматривать, как первое приближение к гравитационному полю планеты. Во втором приближении можно учесть тот факт, что некоторые планеты, в том числе и Земля, гораздо лучше могут быть представлены эллипсоидом вращения, чем шаром. В третьем приближении мы можем учесть и некоторые особенности в распределении масс внутри планеты и т.д. Короче говоря, гравитационное поле планеты обычно представляют рядом по шаровым функциям. В зависимости от решаемой задачи, предъявляются разные требования к детальности исходных данных, к числу членов разложения и к числу исходных параметров.

Итак, будем считать, что наша фиксированная точка P, в которой нам необходимо получить гравитационный потенциал планеты, - внешняя. Снова, как и в приведенных выше формулах, будем считать, что вектор r определяет координаты фиксированной точки P, а абсолютная величина этого вектора - расстояние точки P от начала координат. Радиус-вектор элемента массы dm мы снова будем обозначать буквой r'. Расстояние между фиксированной точкой P и элементом массы dm – буквой ρ. Интегрирование по объему тела планеты мы будем помечать нижним пределом T. Запишем гравитационный потенциал планеты в виде интеграла:

$$V(P) = G\int_T \frac{dm}{\rho} = G\int_T \frac{dm}{\sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr'\cos\varphi}}. \qquad (15.13)$$

Поскольку точка P лежит вне планеты и, как правило, достаточно далеко от нее удалена, то подынтегральное выражение можно разложить в ряд по степеням отношения r'/r. Мы тут же столкнемся с так называемыми полиномами Лежандра, на некоторых сведениях о их свойствах необходимо остановиться.

Функцией, производящей полиномы Лежандра, называется функция

$$\frac{1}{\sqrt{1-2\alpha x + x^2}} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n P_n(\alpha),$$

где $P_n(\alpha)$ - полиномы Лежандра степени n. Вот несколько первых полиномов Лежандра:

$$P_0(\alpha) = 1$$

$$P_1(\alpha) = \alpha$$

$$P_2(\alpha) = \frac{1}{2}(3\alpha^2 - 1)$$

$$P_3(\alpha) = \frac{1}{2}(5\alpha^3 - 3\alpha)$$

.....

Каждый следующий полином можно вычислить, пользуясь рекуррентной формулой

$$(n+1)P_{n+1}(\alpha) = (2n+1)\alpha P_n(\alpha) + nP_{n-1}(\alpha)$$

Существует и общая формула для полиномов Лежандра. Это так называемая формула Родрига:

$$P_n(\alpha) = \frac{1}{2^n n!}\frac{d^n(\alpha^2-1)^n}{d\alpha^n}$$

Вернемся снова к нашему интегралу (3.13). Вынесем из под корня величину r, получим:

$$V(P) = \frac{G}{r}\int_T \left(1 + \frac{r'^2}{r^2} - 2\frac{r'}{r}\cos\phi\right)^{-1/2} dm$$

Под знак интеграла теперь входит производящая функция полиномов Лежандра. Разлагая подынтегральное выражение в степенной ряд относительно отношения r'/r, будем иметь:

$$V(P) = \frac{G}{r}\int_T \sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{r'}{r}\right)^n P_n(\cos\phi)dm\,. \qquad (15.14)$$

Представим полученное разложение в виде:

$$V(P) = \sum_{n=0}^{\infty} V_n(P)\,,$$

где

$$V_n(P) = \frac{G}{r^{n+1}}\int_T (r')^n P_n(\cos\phi)dm\,. \qquad (15.15)$$

Полученный ряд называют рядом Лапласа, а соответствующие функции $V_n(P)$ - *функциями Лапласа.* Используется и другая терминология. Функции Лапласа могут быть определены через гармонические (удовлетворяющие уравнению Лапласа) однородные полиномы, которые носят название *шаровых функций*. Поэтому ряд (15.14) после выполнения указанного интегрирования, называют *разложением гравитационного потенциала в ряд по шаровым функциям.*

Определим первые три функции Лапласа. Чтобы выполнить интегрирование, нам нужно выбрать системы координат. Допустим, что точка O - начало декартовой системы координат. Направления осей, в принципе, не имеют значения. Координаты фиксированной точки P мы будем обозначать через x, y, z, а для элемента массы dm – координаты ζ, η, ξ. Таким образом, вектор $r = (x, y, z)^T$, а радиус-вектор элемента массы есть $r' = (\zeta, \eta, \xi)^T$.

Первый член разложения.
Согласно формуле (15.15), имеем:

$$V_0(x,y,z) = \frac{G}{r}\int_T dm = \frac{CM}{r}\,. \qquad (15.16)$$

Полученная шаровая функция дает лишь массу планеты. Если ограничиваться только первым членом разложения, то это равносильно тому, что планета отождествляется с шаром со сферически симметрично распределенными массами или с материальной точкой.

Второй член разложения
Следующая шаровая функция имеет вид:

$$V_1(x,y,z) = \frac{G}{r^2}\int_T r' P_1(\cos\phi)dm$$

Поскольку $P_1(\cos\varphi) = \cos\varphi$, будем иметь:

$$V_1(x,y,z) = \frac{G}{r^3}\int_T rr'\cos\phi dm\,.$$

Подынтегральное выражение есть не что иное, как скалярное произведение двух векторов r' и r: $r'r\cos\varphi = r^{\mathrm{T}}r'$, поэтому:

$$V_1(x,y,z) = \frac{G}{r^3}(x,y,z)\int_T r'\,dm$$

Из теоретической механики известно, что последний интеграл определяет радиус-вектор центра масс:

$$\int_T r'\,dm = Mr_0' = M\begin{pmatrix}\zeta_0\\ \eta_0\\ \xi_0\end{pmatrix}.$$

Следовательно, линейная шаровая функция выглядит следующим образом:

$$V_1(x,y,z) = \frac{GM}{r^3}(x\zeta_0, y\eta_0, z\xi_0) \qquad (15.17)$$

В астрономических приложениях этот член разложения часто не принимают во внимание: предполагают, что начало системы координат выбрано точно в центре масс. Однако более детальный анализ гравитационных полей планет иногда приводит к выводу о смещении центра масс по отношении к геометрическому центру объема планеты.

Третий член разложения
Для $n = 2$ получим:

$$V_2(x,y,z) = \frac{G}{r^3}\int_T r'^2\,P_2(\cos\phi)dm = \frac{G}{2r^3}\int_T r'^2\,P_2(3\cos^2\phi - 1)dm$$

Заметим, что $r'^2 = \zeta^2 + \eta^2 + \xi^2$, $r'^2\cos^2\varphi = 1/r^2(x\zeta + y\eta + z\xi)^2$
Поэтому:

$$V_2(x,y,z) = \frac{G}{2r^5}\int_T [3(x\zeta + y\eta + z\xi)^2 - (\zeta^2 + \eta^2 + \xi^2)(x^2 + y^2 + z^2)]dm\,.$$

После необходимых преобразований, полученную формулу можно привести к виду:

$$V_2(x,y,z) = \frac{G}{2r^3}(A + B + C + 3I)\,, \qquad (15.18)$$

где использованы следующие обозначения:

моменты инерции	*произведения инерции*
$A = \int_T (\eta^2 + \zeta^2)dm$	$D = \int_T \eta\zeta\,dm$
$B = \int_T (\zeta^2 + \xi^2)dm$	$E = \int_T \zeta\xi dm$
$C = \int_T (\eta^2 + \xi^2)dm$	$F = \int_T \eta\xi dm$

(15.19)

A - момент инерции планеты относительно оси, проведенной через начало координат и точку *P*. Определим направляющие косинусы точки *P*: $l = \cos x\hat{}\, r$, $m = \cos y\hat{}r$, $n = \cos z\hat{}r$. Как следует из теоретической механики,

$$I = Al^2 + Bm^2 + Cn^2 - 2(Dmn + Enl + Flm). \qquad (15.20)$$

Таким образом, шаровая функция нулевой степени есть масса планеты (момент инерции нулевого порядка), первой степени определяется через координаты центра масс (момент инерции первого порядка) шаровая функция второй степени определяется через моменты инерции второго порядка. Продолжая рассуждения, мы убедимся в том, с увеличением степени шаровой функции, увеличивается и порядок моментов инерции планеты, через которые эти шаровые функции определяются. Поэтому говорят, что члены разложения гравитационного потенциала высокого порядка определяются через *мультипольные моменты ее массы*.

В задачах небесной механики часто используются следующие упрощения представления гравитационного потенциала, в предположении, что
- начало координат совпадает с центром масс,
- направления осей параллельны главным осям инерции,
- фигура планеты - тело вращения.

При этих предположениях координаты центра масс и произведения инерции равны нулю, а $A = B$. Выберем декартову систему координат следующим образом: ось Oz совпадает с осью вращения фигуры, а оси Ox и Oy лежат в экваториальной плоскости. Тогда

$$I = A(l^2 + m^2) + Cn^2.$$

Однако, $l^2 + m^2 + n^2 = 1$, поэтому $I = A + (C - A)n^2$. Подставляя это выражение в формулу для шаровой функции второй степени, получим:

$$V_2 = \frac{G}{2r^3}(C - A)(1 - 3n^2).$$

Как мы видели, величина n равна косинусу угла между осью вращения планеты и направлением на точку P. Обозначим этот угол греческой буквой θ, таким образом, $n = \cos\theta$,

$$V_2 = \frac{G}{2r^3}(C - A)(1 - 3\cos^2\theta).$$

По определению полиномов Лежандра, имеем:

$$1/2(1 - 3\cos^2\theta) = P_2(\cos\theta),$$

поэтому

$$V(\cos\theta) \approx \frac{GM}{r}(1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{a}{r}\right)^n P_n(\cos\theta))$$

$$V_2 = \frac{G}{r^3}(C - A)P_2(\cos\theta).$$

Если ограничиться только этими членами разложения, то гравитационный потенциал планеты можно записать в виде:

$$V(\cos\theta) \approx \frac{GM}{r}(1 - \frac{C - A}{r^2 M} P_2(\cos\theta)). \qquad (15.21)$$

Формула (15.21) показывает, что напряженность гравитационного поля в точке P зависит не только от сферических координат этой точки: расстояния r и полярного расстояния (или широты) θ, но и от отличия моментов инерции около полярной и экваториальных осей. В качестве фундаментальной постоянной поля планеты берут не разность C - A, которая зависит от массы и размеров планеты, а безразмерную величину $J_2 = (C - A)/Ma^2$.

Теперь вместо формулы (15.21) можно записать:

$$V(\cos\theta) \approx \frac{GM}{r}(1 - J_2(\frac{a}{r})^2 P_2(\cos\theta)). \qquad (15.22)$$

Принимая во внимание другие члены разложения потенциала, но сохраняя главное условие - внутреннее строение планеты соответствует телу вращения - мы можем получить формулу для гравитационного потенциала, содержащую полиномы Лежандра более высоких степеней:

$$V(\cos\theta) \approx \frac{GM}{r}(1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n(\frac{a}{r})^n P_n(\cos\theta)). \qquad (15.23)$$

Коэффициенты разложения GM и J_2 относятся к *фундаментальным постоянным астрономии.*

В качестве характеристики планеты используют также *безразмерный момент инерции*, который определяется следующим образом: $I^* = C/Ma^2$. Эта величина малая, если почти вся масса планеты сосредоточена в ее центре, она равна 0.4, если планета -

однородный шар. Реально $0.0 < I^* < 0.4$. Любопытно, что американский ученый Экхард для Луны определил $I^* > 0.4$, что означает Луна внутри пустая! Более поздние определения безразмерного момента инерции Луны установили, что он равен 0.391, что указывает на ее однородность, но никаких противоречий с установившимися взглядами на строение планет нет. Еще одна фундаментальная постоянная, также связанная с моментами инерции, - постоянная прецессии $H = (C - A)/C$ играет важную роль в теории вращения планеты.

В заключении раздела приведем численные значения фундаментальных постоянных для некоторых планет и Луны.

Фундаментальные постоянные планет

Планеты	GM, $км^3$ $с^{-2}$	I^*	J_2
Земля	398600,5±0,3	0,332	0.001082645
Меркурий	22032±0,324		
Венера	324859,6±0,5	0,332	0,00000597
Марс	42828,3±0,1	0,377	0,0008746
Юпитер	126687000±500	0,200	0,022060
Сатурн	37938000±200	0,220	0,025010
Уран	5786700±1500	0,230	
Нептун	6859000±8000	0,290	
Плутон	900±300		
Луна	4902,63±0,07	0,391	0,00009152

Реально гравитационное поле во внешнем пространстве зависит не только от полярного расстояния или широты точки P, но и от ее долготы - от угла между плоскостью меридиана, в которой лежит точка P, и плоскостью нулевого меридиана. Для Земли - это гринвичский меридиан. Пусть φ - широта, а λ - долгота точки P. Учитывая, что $\varphi = \pi/2-\theta$, в приведенных формулах функцию $\cos\theta$, которая входит в качестве аргумента для полиномов Лежандра, мы должны заменить на $\sin\varphi$. Не останавливаясь подробно на выводе формулы разложения гравитационного потенциала в ряд по шаровым функциям, приведем готовый результат:

$$V(x,y,z) = \frac{GM}{r}\left(1 - \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}\left(\frac{a}{r}\right)^{2k} P_{2k}(\sin\varphi)\right)$$

$$V(\varphi,\lambda,r) = \frac{GM}{r}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{a}{r}\right)^{n}(C_{mn}\cos m\lambda + S\sin m\lambda)P_n^m(\sin\varphi)\,. \qquad (15.24)$$

Функции $R_{mn}(\varphi,\lambda) = \cos m\lambda P_n^m(\sin\varphi)$ и $S_{mn}(\varphi,\lambda) = \sin m\lambda P_n^m(\sin\varphi)$ называются *сферическими*, так как значения их зависят только от положения точки на сфере (заданы широта и долгота). Параметры n и m соответственно называются степенью и порядком отдельной *сферической гармоники*. Функция $P_n^m(\sin\varphi)$ называется *присоединенной (ассоциативной) функцией Лежандра*. Она определяется через полиномы Лежандра следующим образом:

$$P_n^m(x) = (1-x^2)^{\frac{m}{2}}\frac{d^m P_n(x)}{dx^m}\,. \qquad (15.25)$$

Обратим внимание на внутреннюю сумму в формуле (15.24). Ее верхний предел равен n, так как при $m > n$ порядок производной m в формуле (15.25) будет больше *степени* полинома n и все соответствующие члены будут равны нулю.

Гармоники называются *зональными*, если их значения изменяются только с широтой. Это будет иметь место при $m = 0$. Внутри одной зоны, отделенной от других с севера и с юга параллелями, зональная гармоника сохраняет свой знак.

Гармоники называются *секториальными,* если их знак может изменяться только с долготой. Это имеет место при $n = m$. Присоединенная функция Лежандра, при этом, равна:

$$P_n^n(\sin\varphi) = \cos^n\varphi \frac{d^n P_n(\sin\varphi)}{(d\sin\varphi)^n} = \cos^n\varphi Const$$

Поскольку косинус широты не меняет знака, то внутри одного сектора не изменяет знака и сферическая гармоника. Шар оказывается расчлененным на сектора - полосы, которые соединяют северный и южный полюса.

Гармоники, для которых $0 < m < n$ на поверхности шара образуют мозаичную картину, подобно шахматной доске и называются *тессеральными* от латинского tessera-мозаичный кубик. Секториальные и тессеральные гармоники при вращении планеты создают во внешнем пространстве переменное во времени гравитационное поле, что значительно осложняют теорию движения искусственных и естественных спутников планеты.

Определение массы планеты. Первый член разложения гравитационного потенциала имеет вид GM/r. Если бы другие члены разложения не оказывали никакого действия на движение спутников, или, хотя бы возмущения от них были за пределами точности наблюдения, движение спутника подчинялось бы закону Кеплера.

Пусть M - масса планеты, которую нужно определить, m - масса спутника. Под действием сил притяжения, подчиняющихся закону обратных квадратов, оба небесных тела движутся по эллиптическим орбитам, в фокусе каждой из них расположен центр масс системы (барицентр). В частном случае - это могут быть и круговые орбиты. Для упрощения вопроса именно этот случай мы и будем рассматривать. Пусть l - расстояние спутника от планеты, a - расстояние спутника от барицентра, тогда $l + a(1 + m/M)$. Двигаясь по круговой орбите, спутник имеет ускорение, равное $F/m = \omega^2 a = GM/l^2$, где $\omega = 2\pi/T$, а T - период обращения спутника. Отсюда:

$$GM = (2\pi/T)^2 al^2 = \frac{4\pi^2}{T^2} a^3 (1+\frac{m}{M})^2$$

При $m << M$ выражение в скобках можно не отличать от единицы и формулу для определения массы планеты переписать в следующем виде:

$$GM = \frac{4\pi^2 a^3}{T^2} \quad . \qquad (15.26)$$

Полученная формула есть не что иное, как третий закон Кеплера: квадраты периодов обращения планет, относятся так же, как кубы их расстояний до центрального тела (Солнца).

Формула (15.26) получена для частного случая кругового движения, хотя в небесной механике доказано, что она справедлива и для эллиптического движения. В этом случае под a нужно понимать большую полуось эллиптической орбиты.

Формула (15.26) дает возможность определить массу планеты только в том случае, когда гравитационная постоянная нам известна. Ее определяют с помощью физического эксперимента. К сожалению, точность этих экспериментов пока еще не достаточно высока, хотя со времени Кавендиша - английского ученого, который одним из первых определил гравитационную постоянную, точность ее определения выросла на два порядка за 150 лет. Сейчас принято $G = (6{,}6726 \pm 0{,}0005)\cdot 10^{-11}$ СИ. Произведения гравитационной

постоянной на массу определяются значительно точнее. Например, для Земли эта величина равна 398600,5±0,3, то есть относительная погрешность равна 10^{-6}, тогда как относительная погрешность гравитационной постоянной составляет приблизительно 10^{-4}. В качестве фундаментальных постоянных часто рассматривают именно произведения масс на гравитационную постоянную, которые называют *планетоцентрическими* гравитационными постоянными (*геоцентрическая, селеноцентрическая, ареоцентрическая и т.д.*)

Определение характеристик гравитационного поля Земли. Чем детальнее нам нужно знать гравитационное поле, тем большее число параметров определяют аналитическое выражение для силовой функции поля тяготения планеты. В эпоху, когда спутники еще были недоступны, основным методом исследования гравитационного поля был гравиметрический. Гравиметрия - область геофизики, изучающая способы наиболее высокоточного определения удельной силы тяжести и ее геологической интерпретации. Этой наукой занимаются как физики, механики так и геологи.

До 20-х годов XX столетия наука не располагала средствами для измерения удельной силы тяжести на морях и океанах с точностью достаточной, для ее геологического истолкования. В 1922-1929 гг. голландский ученый-геодезист Венинг-Мейнес разработал способ наблюдения колебаний маятников на слабо качающемся основании. Используя подводную лодку в качестве лаборатории, он совершил ряд плаваний в Юго-Восточную Азию, исследовал регион, содержащий островные дуги и глубоководные впадины. Идеи Венинг-Мейнеса были реализованы в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга профессором Л.В.Сорокиным. До Великой Отечественной войны Л.В.Сорокин с учениками совершил ряд плаваний на подводных лодках на Черном море, в Баренцовом, Охотском и Беринговом морях. Только война остановила эти исследования. Однако, после войны они вновь активизировались. Были разработаны и другие методы для измерения силы тяжести на обычных исследовательских судах, были изобретены морские гравиметры, способные измерять приращение силы тяжести с относительной точностью не хуже 10^{-4}. В морских гравиметрических исследованиях после войны принимали активное участие и другие страны, в частности США, Англия, Германия, Франция, Италия и Япония. Они и сейчас продолжают активное исследование гравитационных полей акваторий, в особенности нефтегазоносных акваторий.

Накопился достаточно большой материал для определения модели гравитационного поля Земли как планеты. По мере накопления новых данных производилась ревизия этих моделей.

Одна из последних моделей гравитационного поля по геофизическим данным была построена в ГАИШ профессором Н.П. Грушинским.

Настоящую революцию в определении гравитационного поля планеты произвели первые запуски искусственных спутников Земли. Был отмечен резкий скачек в точности определения постоянной J_2 - постоянной, ответственной за сжатие планеты - одним из основных параметров, необходимых для развертывания карт на Земной поверхности. Сейчас разработаны новые методы наблюдения ИСЗ, которые позволяют определить положение спутника с точностью $\pm$ 2 см. Возникло новое направление небесной механики, позволяющее по видимым неравенствам в движении спутника определять возмущающие силы - гравитационное поле планеты. Как известно обратные задачи динамики относятся к типу некорректных, теорию которых разработали ученые МГУ и успешно используются для решения задач - как геофизики, так и астрофизики.

Сейчас построено достаточно много моделей гравитационного поля Земли разной детальности и точности. Отмечено, что с увеличением степени и порядка разложения падает точность определения коэффициентов. Для описания регионального поля часто

прибегают к модели степени и порядка 36 (36x36). Наиболее детальная из известных моделей, по-видимому, модель, получившая шифр EGM-96 (360x360).

15. 5. Потенциал тяжести.

Термин тяжесть (по-английски gravity) указывает на то, что пробное тело и опора взаимодействуют. Первое давит на опору, второе дает отклик в виде реакции опоры. Эти две силы разной физической природы. Первая имеет гравитационное происхождение, а вторая - электромагнитное (упругая сила). Если бы тело находилось в покое, то обе силы были бы равны и противоположны по направлению. Однако, любое тело неподвижное относительно поверхности Земли, движется с ускорением, так как совершает вместе с Землей суточное вращение. По этой причине сумма сил, действующих на тело, не равна нулю. Результирующая направлена в сторону оси вращения и равна $F = R\omega^2 \cos\varphi$, где R - радиус Земли в сферическом приближении, ω - угловая скорость вращения, φ - геоцентрическая широта пробного тела.

В теоретической механике широко используется принцип Даламбера: задачи динамики можно заменить задачами статики, если ввести в рассмотрения силы инерции - силы равные и противоположно направленные тем силам, которые создают ускорение системе отсчета. В частности, если пробное тело неподвижно на поверхности Земли, то к силе притяжения нужно добавить с обратным знаком ту силу, которая сообщает пробному телу центростремительное ускорение. Эта сила обычно называется центробежной. Подчеркнем, что никакой физической природы центробежная сила не имеет. Она вводится лишь для того, чтобы все задачи механики во вращающейся системе координат решать, не принимая во внимание неинерциальность системы отсчета, связанной с вращающейся поверхностью Земли.

Результирующая сил тяготения и центробежной силы получила название силы тяжести. Этот термин в физике и геофизике имеет разное толкование. В физике под силой тяжести понимается та сила, с которой тело, обладающее массой m притягивается к Земле. Если тело освободить от всех связей, то оно будет падать свободно с ускорением g. Тогда сила тяжести, сообщающая телу ускорение свободного падения, равна $P = mg$. Эта сила не может служить характеристикой гравитационного поля, так как зависит от массы пробного тела. Для того чтобы силу тяжести превратить в характеристику поля, необходимо пробное тело сделать стандартным, в геофизике обычно берут массу пробного тела равную единице. Другими словами, вместо силы тяжести для характеристики поля используют удельную силу тяжести, то есть силу, отнесенную к единице массы.

В качестве единицы измерения удельной силы тяжести берут не Ньютоны на килограмм, а миллигалы, единица, введенная Вихертом, и широко применяющаяся в геофизике. По размерности, удельная сила тяжести совпадает с ускорением. Единица измерения 1 Гал равна ускорению 1 см/с^2, 1 мГал соответствует ускорению 10 мкм/с^2. С повышением точности, уменьшаются и единицы измерения. В настоящее время существуют приборы, в которых изменение удельной силы тяжести измеряют в микрогалах (мкГал) и даже в наногалах.

Нужно сказать, что в русской литературе вместо длинного термина удельная сила тяжести чаще употребляется просто сила тяжести, по умолчанию предполагается, что масса пробного тела равна единице. Хотя в некоторых статьях, посвященных гравиметрическим вопросам, вместо термина сила тяжести применяют и ускорение свободного падения, и ускорение силы тяжести. В англоязычной литературе силу тяжести в нашем понимании называют просто gravity (тяжесть) или на немецком языке - schwehre, что тоже обозначает тяжесть. Мы будем придерживаться, в основном наших русских традиций, хотя иногда вместо силы тяжести будем говорить просто тяжесть (см. заголовок настоящего раздела).

Потенциал или силовая функция для силы тяжести состоит из двух частей:

$$W(x, y, z) = V(x, y, z) + \Omega(x, y) \qquad (15.27)$$

Здесь, снова, декартова система координат выбрана традиционно: ось *Oz* совпадает с осью вращения планеты, две другие оси лежат в экваториальной плоскости.

Гравитационный потенциал (силовую функцию для сил притяжения) $V(x, y, z)$ мы рассмотрели в предыдущих разделах. Остается определить силовую функцию для центробежной силы ("центробежный потенциал") $\Omega(x, y)$. Поскольку вектор центробежной силы равен:

$$F_{\text{ЦБ}} = (\omega^2 x, \omega^2 y, 0)^{\text{T}},$$

нетрудно догадаться, что

$$\Omega(x, y) = 1/2\ \omega^2 (x^2 + y^2).$$

Поверхность $W(x, y, z)$ = Const является поверхностью равного потенциала или эквипотенциальной поверхностью. Сила тяжести равна производной этого потенциала по вдоль внутренней нормали. Равенство нулю компоненты силы, касательной к поверхности, говорит о том, что эта поверхность является поверхностью уровня. Меняя значение постоянной для потенциала, мы получим семейство поверхностей, обладающих следующими свойствами:

- чем больше значение силы тяжести, тем ближе две соседние уровенные поверхности,
- две уровенные поверхности не пересекаются. Если бы они могли пересекаться, то в точке пересечения существовали бы две нормали, а следовательно и две силы тяжести, что невозможно.

15. 6. Фигуры равновесия небесных тел.

Все планеты Солнечной системы находятся в состоянии, близком к гидростатическому равновесию. Принято считать, что планеты с массой больше 10^7 т имеют шарообразную форму, потому что массы, слагающие тело планет, обладают свойством пластичности. Планеты приобретают форму, как если бы они были жидкими. В этом случае уровенная поверхность будет поверхностью планеты. В действительности поверхность планеты не совпадает с уровенной поверхностью. Эти отличия свидетельствуют об отклонениях от состояния гидростатического равновесия и являются предметом изучения геофизиков и геодезистов. Введены специальные термины тля обозначения поверхностей уровня для планет. Эквипотенциальная поверхность Земли, по предложению Листинга, называется геоидом. По аналогии, уровенную поверхность для Луны называют селеноидом, уровенную поверхность Марса - ареоидом, и т.п

Основные теоремы:

Теорема Ляпунова. Единственно устойчивой фигурой равновесия покоящейся жидкости является сфера. Следствием этой теоремы можно усмотреть шарообразность всех планет Солнечной системы.

Теорема Пуанкаре. Единственно возможным движением жидкости, находящейся в состоянии относительного равновесия, является равномерное вращение вокруг одной из главных осей инерции. Понятно, что в случае, когда планета близка к состоянию гидростатического равновесия, ее ось вращения почти совпадает с главной осью инерции.

Теорема Лихтенштейна. Фигура равновесия однородной жидкости всегда симметрична относительно плоскости, проходящей через центр инерции и перпендикулярной к оси вращения. Эту теорему называют еще теоремой о существовании экватора.

Исследования показали, что потенциал притяжения гидростатически равновесной планеты содержит лишь четные зональные гармоники:

$$V(x, y, z) = \frac{GM}{r}\left(1 - \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k} \left(\frac{a}{r}\right)^{2k} P_{2k}(\sin\varphi)\right), \qquad (15.28)$$

причем мультипольные моменты $J_{2\text{k}}$ убывают как J_2^{k}.

Эллипсоид как фигура равновесия. Как мы уже говорили, внутри однородного эллипсоида, как и для шара, сила притяжения подчиняется закону Гука: она прямо пропорциональна отклонению материальной точки от положения равновесия. В теории потенциала доказано, что силовая функция для внутренней точки имеет вид $V(x, y, z) = V_0 - Px^2 - Qy^2 - Rz^2$. Тогда компоненты силы притяжения пропорциональны координатам притягиваемой точки $F = -2(P_x, Q_y, R_z)^T$. Здесь P, Q, R и V_0 - постоянные, зависящие от плотности и параметров эллипсоида и не зависящие от координат точки. Приведем эти формулы без вывода:

$$V_0 = abc\pi G\sigma\int_0^\infty \frac{ds}{\Delta(s)},$$

$$P = abc\pi G\sigma\int_0^\infty \frac{ds}{(a^2+s)\Delta(s)},$$

$$Q = abc\pi G\sigma\int_0^\infty \frac{ds}{(b^2+s)\Delta(s)}, \qquad (15.29)$$

$$R = abc\pi G\sigma\int_0^\infty \frac{ds}{(c^2+s)\Delta(s)},$$

где $\Delta(s) = \sqrt{(a^2+s)(b^2+s)(c^2+s)}$.

Если притягиваемая материальная точка - внешняя, то для нее силовая функция сохраняет тот же вид, но V_0, P, Q, R перестают быть постоянными, а зависят от координат точки. Для их вычисления справедливы те же интегралы, что и для внутренней точки, но нижний предел не нуль, а величина v, которая выбирается таким образом, чтобы эллипсоид

$$\frac{x^2}{a^2+v}+\frac{x^2}{b^2+v}+\frac{x^2}{c^2+v}=1$$

проходил через заданную внешнюю точку.

Потенциал тяжести от потенциала притяжения отличается тем, что аддитивно содержит потенциал центробежной силы $W(x, y, z) = V(x, y, z) + 1/2(x^2 + y^2)\omega^2$. Подставляя сюда выражение для потенциала притяжения эллипсоида, получим

$$W(x,y,z) = V_0 + (\frac{1}{2}\omega^2 - P)x^2 + (\frac{1}{2}\omega^2 - Q)y^2 - Rz^2. \qquad (15.30)$$

Если поверхность эллипсоида является поверхностью уровня, то такой эллипсоид будет гидростатически равновесным. Уравнением уровенной поверхности будет $W(x, y, z) = W_0$, где W_0 - постоянная величина. Возникает вопрос, можно ли подобрать такую угловую скорость вращения для трехосного эллипсоида с заданными полуосями, чтобы его поверхность оказалась поверхностью уровня? Нетрудно убедиться, что нельзя.
Уравнением трехосного эллипсоида в данном случае будет выражение:

$$(P-\frac{1}{2}\omega^2)x^2 + (Q-\frac{1}{2}\omega^2)y^2 + z^2 = V_0 - W_0. \qquad (15.31)$$

Определим большие полуоси:

$$a^2 = (V_0 - W_0)/(P-\frac{1}{2}\omega^2),$$

$$b^2 = (V_0 - W_0)/(Q-\frac{1}{2}\omega^2), \qquad (15.32)$$

$$c^2 = (V_0 - W_0)/R.$$

Очевидно, что если из первого уравнения мы определим угловую скорость, то совсем не обязательно, чтобы эта угловая скорость удовлетворяла второму уравнению. Тем не менее

специалистами в области теории фигур равновесия небесных тел доказано существование равновесных трехосных эллипсоидов, которые пол учили название эллипсоидов Якоби.

Эллипсоид Маклорена. В частном случае $a = b$, поэтому $P = Q$. Из уравнения (15.32) получим:

$$V_0 - W_0 = c^2 R, \quad \omega^2 = 2(\frac{a^2}{c^2 R} - P)\,. D = \sqrt[3]{GM / \omega^2} \tag{15.33}$$

Полученные уравнения определяют постоянные W_0 и ω^2. По-видимому, для любых заданных полуосей эллипсоида вращения можно найти угловую скорость вращения, такую, что данный эллипсоид становится фигурой равновесия.

Модель "планеты Роша". Под "планетой Роша" мы будем понимать такую фигуру равновесия, в которой вся притягивающая масса сосредоточена в и одной точке - центре масс, а вектор силы тяжести образуют векторная сумма силы притяжения и центробежной силы. Тогда уравнением "поверхности" такой планеты будет:

$$\frac{GM}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{1}{2}\omega^2 (x^2 + y^2) = W_0\,. \tag{15.34}$$

Рассмотрим, сначала, как выглядит поверхность уровня вблизи начала координат. В этом случае величину $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ можно считать малой, а W_0, наоборот, большой. Пренебрегая в (15.34) вторым слагаемым в левой части формулы, получим: $r \approx W_0/GM$. Это уравнение замкнутой поверхности, которая по мере приближения к началу координат становится все более похожей на сферу. Назовем ее псевдосферой.

По мере отдаления от начала координат в плоскости $z = 0$ мы достигнем таких точек, в которых сила притяжения и центробежная сила становятся равными и противоположно направленными, то есть $-GM/r^2 + \omega^2 r = 0$, Отсюда $r^3 = GM/\omega^2$. Мы получили уравнение окружности с радиусом, равным $D = \sqrt[3]{GM / \omega^2}$. Понятно, что во всех точках этой окружности сила тяжести равна нулю.

Если двигаться дальше от начала координат, мы придем к варианту, когда $x^2 + y^2$ будет большой величиной, а GM/r, наоборот, малой. Тогда пренебрегая первым членом в формуле (15.34), получим уравнение поверхности, близкой к круговому цилиндру $x^2 + y^2 \approx 2W_0/\omega^2$. Это уже разомкнутая поверхность уровня. Планеты с такой поверхностью существовать не могут.

Таким образом, гидростатически равновесная планета может существовать только внутри "полости Роша", где сила тяжести всюду отлична от нуля, и направлена по нормали внутрь этой поверхности. Поверхность такой планеты имеет овальную форму, сплюснутую с полюсов.

Сфероид Клеро. *Сфероидом* в геодезии называют поверхность вращения, близкую к сфере. В первом приближении в качестве уравнения сфероида можно принять:

$$r = a(1 - \alpha \sin^2 \varphi). \tag{15.35}$$

Очевидно, что на экваторе $r = a$, а на полюсах $\varphi = \pm\pi/2$, $r = b = a(1 - \alpha)$. Фигура, уравнение которой удовлетворяет формуле (15 35) обладает *сжатием*: полярный радиус ее меньше экваториального. Из определения следует, что $\alpha = (a - b)/a$.

Установим связь между коэффициентом J_2 и сжатием планеты. Потенциал притяжения равен:

$$V(r, \varphi) = \frac{GM}{r}\left(1 - J_2 \frac{a^2}{r^2} P_2(\sin\varphi)\right),$$

а потенциал тяжести –

$$W(r,\varphi)=\frac{GM}{r}\left(1-J_2\frac{a^2}{r^2}P_2(\sin\varphi)\right)+\frac{1}{2}\omega^2 r^2\cos^2\varphi\,. \qquad (15.36)$$

В приведенной формуле мы ограничились лишь коэффициентом J_2, отбросив все остальные мультипольные моменты, так как в случае гидростатически равновесной фигуры, они будут иметь более высокий порядок малости, чем постоянная J_2.

Введем обозначение $\overline{q}=\omega^2 a/\frac{GM}{a^2}=\frac{\omega^2 a^3}{GM}$. Новая малая величина есть, грубо говоря, отношение центробежной силы на экваторе к силе притяжения. Следовательно $\omega^2 r=\frac{GM}{a^3}\overline{q}r$. Подставим полученное выражение в (15.36) и вынесем за общие скобки отношение *GM/r*:

$$W(r,\varphi)=\frac{GM}{r}\left(1-J_2\frac{a^2}{r^2}P_2(\sin\varphi)+\frac{1}{2}\overline{q}\frac{r^3}{a^3}\cos^2\varphi\right). \qquad (15.37)$$

Приравнивая полученное выражение постоянной W_0, получим уравнение сфероида.

Теорема Клеро устанавливает связь между параметрами сфероида, силой тяжести на его поверхности и коэффициентами разложения гравитационного потенциала.

Сжатие сфероида Клеро. Сравним формулу (15.37) с (15. 35). Учитывая, что a, J_2, q - малые величины, запишем приближенное равенство:

$$\frac{GM}{r}\left(1-J_2P_2(\sin\varphi)+\frac{1}{2}\overline{q}\cos^2\varphi\right)=W_0\,.$$

Решим полученное выражение относительно r:

$$r=\frac{GM}{W_0}\left(1-J_2P_2(\sin\varphi)+\frac{1}{2}\overline{q}\cos^2\varphi\right) \qquad (15.38)$$

Чтобы отождествить полученную формулу с уравнением сфероида (15.35), примем во внимание, что:

$$P_2(\sin\varphi)=\frac{3}{2}\sin^2\varphi-\frac{1}{2},\qquad \cos^2\varphi=1-\sin^2\varphi\,.$$

Поставляя эти равенства в (15.38), получим:

$$r=\frac{GM}{W_0}\left(1-\frac{J_2}{2}(3\sin^2\varphi-1)+\frac{\overline{q}}{2}(1-\sin^2\varphi\right)=$$

$$=\frac{GM}{W_0}\left((1+\frac{J_2}{2}+\frac{\overline{q}}{2})-(\frac{3}{2}J_2+\frac{\overline{q}}{2})\sin^2\varphi\right)$$

Сравнивая полученное выражение с (15.38) и учитывая, что J_2 и q - малые величины, получим:

$$a=\frac{GM}{W_0}(1+\frac{J_2}{2}+\frac{\overline{q}}{2}),\qquad \alpha=\frac{3}{2}J_2+\frac{\overline{q}}{2}. \qquad (15.39)$$

Отсюда определяем постоянную W_0:

$$W_0=\frac{GM}{a}(1+\frac{1}{2}J_2+\frac{\overline{q}}{2}). \qquad (15.40)$$

Итак, первая часть теоремы Клеро устанавливает связь между сжатием равновесной планеты с первым коэффициентом зональной гармоники разложения гравитационного потенциала и угловой скоростью вращения планеты.

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(3J_2 + \overline{q}\right), \text{ или подробнее: } \alpha = \frac{1}{2}\left(3\frac{C-A}{Ma^2} + \frac{\omega^2 a^3}{GM}\right). \qquad (15.41)$$

Вторая часть теоремы Клеро определяет зависимость силы тяжести на поверхности равновесной планеты от широты.

Сила тяжести на поверхности сфероида Клеро. Вернемся снова к формуле потенциала тяжести для сфероида (15.37). Для того чтобы получить силу тяжести, нам нужно потенциал продифференцировать по нормали к поверхности уровня. Однако, поскольку наш сфероид мало отличается от сферы, дифференцирование по нормали мы заменим дифференцированием по радиус-вектору, что значительно проще.

Обозначив производную по радиус-вектору буквой γ, получим:

$$\gamma = \frac{\partial W(r,\varphi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{GM}{r}\left[1 - J_2\frac{a^2}{r^2}P_2(\sin\varphi) + \frac{\overline{q}}{2}\frac{r^3}{a^3}\cos^2\varphi\right]\right) =$$

$$= -\frac{GM}{r^2}\left(1 - \frac{3a^2}{r^2}J_2P_2(\sin\varphi) - \overline{q}\frac{r^3}{a^3}\cos^2\varphi\right) \approx$$

$$\approx -\frac{GM}{a^2}\left(1-\alpha\sin^2\varphi\right)^{-2}\left(1 - 3J_2P_2(\sin\varphi) - \overline{q}\cos^2\varphi\right).$$

С точностью до малых величин первого порядка будем иметь:

$$\gamma = \frac{GM}{a^2}\left(1 + 2\alpha\sin^2\varphi - \frac{3}{2}J_2(3\sin^2\varphi - 1) - \overline{q}(1-\sin^2\varphi)\right) =$$

$$= \frac{GM}{a^2}\left((1 + \frac{3}{2}J_2 - \overline{q}) + (2\alpha - \frac{9}{2}J_2 + \overline{q})\sin^2\varphi\right) \approx$$

$$\approx \frac{GM}{a^2}\left((1 + \frac{3}{2}J_2 - \overline{q})(1 + (2\alpha - \frac{9}{2}J_2 + \overline{q})\sin^2\varphi)\right).$$

Сила тяжести на экваторе, согласно полученной формуле, равна:

$$\gamma_e = \frac{GM}{a^2}(1 + \frac{3}{2}J_2 - \overline{q}), \qquad (15.42)$$

а для любой широты:

$$\gamma = \gamma_e(1 + \beta\sin^2\varphi), \qquad (15.43)$$

где $\beta = 2\alpha - \frac{9}{2}J_2 + \overline{q}$. С помощью (15.41) исключим J_2: $3J_2 = 2\alpha - \overline{q}$, то есть

$$\beta = \frac{5}{2}\overline{q} - \alpha. \qquad (15.44)$$

Здесь $\gamma_e = \frac{GM}{a^2}(1 + \alpha - \frac{3}{2}\overline{q})$.

Формулами (15.43) и (15.44) мы и завершим изложение теоремы Клеро.

Два предела сжатия для фигур равновесия. Коснемся сначала истории нашего вопроса. И.Ньютон (1643-1727) для объяснения явления, которое заметили многое астрономы, отъезжающие в экспедиции для наблюдений солнечного затмения в экваториальную зону, астрономические часы маятникового типа отстают по сравнению с Парижской обсерваторией, где они строго выверялись, на 2,5 минуты в сутки. Ньютон предположил, что виной тому служит эллипсоидальная форма Земли и, естественно, ее суточное вращение. Предполагая, что Земля - однородный эллипсоид вращения, он получил, что сжатие земного эллипсоида должно быть равным 1,25 q =1:230.

Современник Ньютона Гюйгенс (1629-1695) решает ту же задачу, но другим путем. Он предположил, что силы *притяжения* направлены к центру, а эллипсоидальность

поверхности уровня возникает только за счет центробежной силы. Таким образом, если Ньютон в качестве фигуры равновесия брал эллипсоид Маклорена, то Гюйгенс - фигуру, которую мы назвали "планетой Роша". Он получил, что сжатие равно $0.5q$ = 1:576. Результат, который значительно отличается от Ньютоновской оценки сжатия.

$$\frac{1}{2}\overline{q} < \alpha < \frac{5}{4}\overline{q}.$$

Вернемся к теории Клеро. Согласно его теории сжатие равновесной планеты должно быть равно $\alpha = \frac{1}{2}\left(3\frac{C-A}{Ma^2} + \overline{q}\right)$. Первый предел сжатия получим, если примем Землю однородным двухосным эллипсоидом, для которого $C = \frac{2}{5}Ma^2$, $A = \frac{1}{5}M(a^2 + b^2)$.

Отсюда: $\frac{C-A}{Ma^2} = \frac{1}{5}\frac{a^2-b^2}{a^2}$.

Но $\alpha = \frac{a-b}{a}, b = a(1-\alpha), \frac{C-A}{Ma^2} \approx \frac{2}{5}\overline{q}$. Следовательно, $(1-\frac{3}{2}\frac{2}{5})\alpha = \frac{1}{2}\overline{q}$ и, наконец,

$$\alpha = \frac{5}{4}\overline{q}. \qquad (15.45)$$

Мы получили то же значение, что и Ньютон, правда с точностью до первой степени сжатия.

Второй предел сжатия, мы получим, если будем считать все притягивающие массы шаром, тогда $C = A$ и

$$\alpha = \frac{1}{2}\overline{q}. \qquad (15.46)$$

Таким образом, реальное сжатие лежит между этими двумя пределами:

$$\frac{1}{2}\overline{q} < \alpha < \frac{5}{4}\overline{q}.$$

Для иллюстрации сказанного приведем сжатия некоторых планет Солнечной системы, а также их возможные предельные значения.

Сравнивая значения сжатия, мы видим, что фигура планеты в значительной степени зависит от ее внутреннего строения. Планеты Земля и Марс весьма далеки от того строения, которое принял Гюйгенс: планета имеет компактное твердое притягивающее тело, окруженное рыхлой оболочкой. По величине сжатия можно судить о том, что к такой модели более подходят планеты гиганты.

Сжатия планет

Название планеты	сжатие		
	по Ньютону	по Гюйгенсу	реальное
Земля	1:230	1:576	1:297
Марс	1:174	1:434	1:192
Юпитер	1:9,4	1:23,5	1:15
Сатурн	1:5,1	1:12,8	1:10
Уран	1:10,6	1:26,6	1:14

Приведенные данные взяты из книги акад. А.А. Михайлова "Курс гравиметрии и теории фигуры Земли", опубликованной в 1939 году. Современные данные могут несколько отличаться от приведенных выше, хотя общая картина не изменится.

15. 7. Гравитационные аномалии и строение Земли.

Гравитационные аномалии. Термин аномалии означает отклонения от некоторой "нормы" - то есть значения, которое можно предсказать, вычислив его по формуле. Вычисленное значение силы тяжести называют "нормальным", а наблюденное - аномальным. Если принять Землю равновесным эллипсоидом вращения, то значение силы тяжести можно вычислить по формуле (15.45), в которой постоянные нужно считать известными. Эти данные определяются из наблюдений и зависят от методики их вычислений, от объема и качества наблюдательных данных. Построение "нормальной" формулы для вычисления силы тяжести требует привлечения экспериментальных данных, полученных в разных странах, в разных экспедициях. В последние 3-4 десятилетия широко используются и спутниковые наблюдения, которые резко увеличили надежность результатов.

Для того чтобы карты гравитационных аномалий, полученных разными авторами, можно было сравнивать и анализировать, необходимо, чтобы гравитационные аномалии вычисляли по одинаковым методикам. По этой причине Международный Геофизический и Геодезический союз на своей Генеральной Ассамблее в августе 1971 года утвердил следующую формулу для нормальной силы тяжести:

$$\gamma = 978031{,}85(1 + 0{,}0053024\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2\varphi \qquad (15.47)$$

В качестве "нормальной Земли" принят *общий земной эллипсоид* с параметрами:

$$a = 6378137 \pm 2\ м,$$
$$\omega = 7292115\cdot10^{-11}\ с^{-1},$$
$$J_2 = (1082{,}63 \pm 0.005)\cdot10^{-8},$$
$$GM = (398600{,}5 \pm 0{,}3)\ км^3с^{-2}.$$

Сжатие этого эллипсоида, определенное по спутниковым данным, равно $\alpha = 1: 298.256$. Известно, что сила тяжести зависит от высоты точки наблюдения. Наблюдения производятся, в крайнем случае, на уровне моря, то есть на высоте, равной нулю. Все сухопутные определения силы тяжести выполняются на разных высотах. Так как поверхность эллипсоида не совпадает с поверхностью уровня, поэтому развита теория приведения гравитационной аномалии (редукции) к одной и той же поверхности. Кроме того, сила тяжести зависит и от масс, лежащих между эллипсоидом и геоидом. Чтобы учесть и эти факторы, развита теория геологических редукций. В таком случае вместе с гравитационными аномалиями обязательно должен указываться и вид редукций, с которыми данная аномалия вычислена. Существуют аномалии *в свободном воздухе*, аномалии *Фая*, аномалии *Буге*, изостатические аномалии и т. п.

Изостазия. Расчеты фигуры Земли, начиная с Ньютона, производились при условии, что Земля находится в состоянии гидростатического равновесия, что достаточно близко характеризует реальное состояние Земли. Отклонение поверхности геоида от поверхности сфероида как раз связано с некоторым отклонением реального состояния Земли от гидростатического равновесия. Спутниковые данные показали, что это отклонение имеет величину порядка квадрата сжатия (α^2). Отклонение фигуры Земли от равновесной составляет $\alpha^2 \approx 70$ м.

В связи с тем гравитационное поле (и соответственно геопотенциал) состоит из слагаемых, существенно различающихся по величине, оно разделяется на нормальное

поле с потенциалом Wq и возмущенное (аномальное) с добавочным потенциалом T. Потенциал сфероида (1.14) определяет нормальное поле сил тяжести и, соответственно, нормальную фигуру Земли. Отклонения геоида от сфероида не превышают 70 м, с помощью спутниковых данных построены карты высот геоида (отклонений от сфероида).

Высоты геоида пропорциональны амплитудам гравитационных аномалий. Интересно то, что аномалии не связаны с топографическими особенностями поверхности (горы, впадины и т.п.), кстати, последние и не описываются поверхностью геоида. Из этого следует важнейший вывод: континентальные области изостатически скомпенсированы, т.е. материки как бы плавают в подкоровом субстрате, словно гигантские айсберги в полярных морях. Аномалии силы тяжести вызваны различными флуктуациями плотности в коре и мантии Земли.

Рис. 15-1. Изостатическое равновесие между корой и мантией.

Идея изостазии, высказанная в середине XIX века, объяснила тот удивительный факт, что наличие гор почти не сказывается на гравиметрических измерениях. Согласно принципу изостазии, легкая земная кора, состоящая из гранита и базальта, изостатически уравновешена на более тяжелой мантии, как показано на рис. 15-1.

Получается так, что масса вещества на единицу площади, измеренная вплоть до некоторой глубины в коре или мантии, приблизительно одинакова для всей поверхности Земли.

Гравитационные аномалии на Земле, как правило, меньше 100 *мГал*, их среднеквадратическая вариация по Земле составляет величину около 20 *мГал*. Следовательно, гравитационное поле Земли достаточно гладкое. Для экстремальных условий (островные дуги, глубоководные впадины) гравитационные аномалии достигают величины 400 *мГал*, что в 12,5 раз меньше разницы в значениях силы тяжести на полюсе и экваторе и составляют всего 0,04% от величины силы тяжести. Потому для получения данных, по которым можно судить о внутреннем строении нашей планеты, необходимо изучать аномалии на уровне не только миллигал но и микрогал, чего и добиваются геофизики.

Вторая характеристика гравитационного поля - это отклонение отвесной линии (вертикали) от нормали к эллипсоиду. Это отклонение также невелико и составляет секунды дуги. Геодезические работы в Индии близ горного массива Гималаев показали, что координаты астрономических пунктов из-за отклонений отвесной линии отличаются от геодезических на 5,2", тогда как вычисленное отклонение, связанное с притяжением гор, составляет 27,9". Для объяснения этого явления английский геодезист Пратт высказал мысль, что под горами плотность пород гораздо меньше, чем коренные породы под

равнинами. Иными словами, если все породы разбить на блоки, то плотность этих блоков должна зависеть от их толщины: чем толще блок, тем меньше плотность. При этом вес всех блоков на некоторой поверхности, называемой *поверхностью компенсации*, один и тот же. Вся земная кора, таким образом, находится в равновесии. Эта гипотеза Пратта получила название *изостатической*.

Конечно, с геологической точки зрения эта гипотеза никуда не годится. Французский геодезист Эри предложил более правдоподобную схему: земные блоки по Эри подобно айсбергами на море плавают на более плотной, но и более пластичной среде - верхней мантии. В этом случае, так же как и у айсбергов, должна образоваться под горными массивами "подводная часть" с плотностью, меньшей, чем плотность вмещающих пород. Таким образом эффект гравитационной компенсации должны создавать *корни гор*, существование которых сейсмологи подтверждают.

Строение земной коры невозможно изучить, пользуясь только одним методом. Геофизики применяют все доступные им методы, прежде всего сейсмологический и гравиметрический. По современным представлениям земная кора имеет разную толщину в разных регионах. В горах толщина ее достигает 60 и более километров. Состоит она из разных слоев. Большой объем занимает кислые (гранитные) породы с плотностью 2,67. Равнины покрыты осадочными породами толщиной несколько километров и с плотностью 2,2. Ниже этих слоев лежат основные породы - базальты с плотностью 2,8. Толщина коры для равнинных регионов полагают равной 30 *км*. Горные районы и равнины образуют основные морфологические особенности континентов. При переходе к океану, гранитный слой постепенно выклинивается, а осадочные породы покрывают на абиссальных котловинах, в основном, базальтовые породы. При этом толщина коры становится меньше и в среднем составляет 10-15 *км*. Особенно тонкой кора становится в глубоководных впадинах (4-5 *км*).

15. 8. Приливы.

Приливообразующий потенциал. Всем хорошо известен морской прилив, когда два раза в сутки вода поднимается у морских берегов, затем вновь откатывается от берега. Но прилив существует не только на море, но и на суше. Два раза в сутки поверхность земли, на которой выстроены все дома, улицы, дороги, поднимаются и опускаются. В Москве амплитуда этих колебаний составляет приблизительно 0,5 м. Но мы этого не замечаем. Отчего это происходит?

Как известно, результатом действия силы на тело является либо его ускорение, если оно свободно и не взаимодействует с другими телами, либо его деформация, если такое взаимодействие существует. Притяжения Луны и Солнца нашей планеты сообщают ей ускорение, которое она имеет, совершая движение по орбите. Однако не все части планеты испытывают одинаковое притяжение. В качестве притягивающего тела возьмем пока только Луну. Максимальное притяжение Луной испытывают те части Земли, для которых она находится строго в зените, а минимальное - в надире. Центр масс Земли находится в промежуточном положении. Результирующая сила притяжения планеты приложена к центру масс. Она сообщает Земле поступательное ускорение. Для описания процессов в системе отсчета, связанной с Землей, то есть в неинерциальной системе координат, кроме упомянутых сил притяжения необходимо ввести силу инерции, равную массе какого-либо пробного тела умноженную на ускорение системы отсчета и направленную в сторону, противоположную ускорению системы отсчета.

Пренебрегая размером, строением и формой Луны, запишем удельную силу притяжения пробного тела, находящегося на Земле. Пусть r' - радиус-вектор, направленный от пробного тела в сторону Луны, r'- длина этого радиус-вектора, тогда сила притяжения этого тела Луной будет равна:

$$F = \frac{GM_L}{r'^3} r'. \qquad (15.48)$$

Здесь GM_L - селеноцентрическая гравитационная постоянная. Пробное тело поместим в точку P. Сила притяжения пробного тела помещенного в центр масс Земли будет равна:

$$F_0 = \frac{GM_L}{r^3} r, \tag{15.49}$$

где r соответственно радиус-вектор, соединяющий центры масс Земли и Луны, и его абсолютная величина. Тогда приливной силой называется разность этих двух сил притяжения:

$$F\text{пр} = F - F_0. \tag{15.50}$$

В формулах (15.48) и (15.49) притягивающее тело (Луна) рассматривается как материальная точка или шар со сферически симметричным распределением масс.

Силовая функция притяжения пробного тела Луной ничем не отличается от силовой функции притяжения шара (материальной точки), то есть она равна GM_L/r'. Что касается второй силы, приложенной к центру масс и являющейся силой инерции для всех материальных точек Земли, то она строго постоянная. Для получения силовой функции для этой силы нам необходимо ввести временную систему координат. Ось Ox проведем из центра Земли и направим в сторону Луны. Направления двух других осей - произвольные. Тогда силовая функция для силы F_0, очевидно, равна $(GM_L/r^2)x + Const$.

Приливообразующий потенциал равен разности этих двух силовых функций. Обозначив его через δW, будем иметь:

$$\delta W = GM_L/r' - (GM_L/r^2)x - Const.$$

Постоянную $Const$ определим при условии, что приливообразующий потенциал в центра Земли равен нулю. При этом $x = 0$, $r' = r$. Поэтому $Const = GM_L/r$. Следовательно, для приливообразующего потенциала можно записать:

$$\delta W = GM_L\left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} - \frac{x}{r^2}\right). \tag{15.51}$$

Поскольку $r' = \sqrt{(r-x)^2 + y^2 + z^2}$, то $\frac{1}{r'} = \frac{1}{r}\left(\left(1 - \frac{x}{r}\right)^2 + \frac{y^2+z^2}{r^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$.

Полагая отношения x/r, y/r, z/r малыми, последнее выражение можно представить следующим образом:

$$\frac{1}{r'} \approx \frac{1}{r}\left(1 + \frac{x}{r} - \frac{x^2+y^2+z^2}{2r^2} + \frac{3}{2}\frac{x^2}{r^2}\right) = \frac{1}{r}\left(1 + \frac{x}{r} + \frac{2x^2 - y^2 - z^2}{2r^2}\right). \tag{15.52}$$

Подставим полученное выражение в (7.51), получим:

$$\delta W = GM_L \frac{2x^2 - y^2 - z^2}{2r^2}. \tag{15.53}$$

Выражение для приливообразующего потенциала можно уточнить, если в (15.51) отношение $1/r'$заменить разложением в ряд по полиномам Лежандра, подобно тому, как мы делали при выводе гравитационного потенциала планеты. Пусть ρ - расстояние точки P от центра планеты (от начала сферической системы координат), а θ - геоцентрическое зенитное расстояние притягивающего тела (Луны), тогда:

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{\rho}{r}\right)^n P_n(\cos\theta) = \frac{1}{r}\left(1 + \frac{\rho}{r}\cos\theta + \sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{\rho}{r}\right)^n P_n(\cos\theta)\right).$$

Поскольку $x = \rho \cos\theta$, получим:

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} + \frac{x}{r^2} + \frac{1}{r}\sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{\rho}{r}\right)^n P_n(\cos\theta).$$

Поставляя полученное выражение в формулу для приливообразующего потенциала (15.51), окончательно получим:

$$\delta W = \frac{GM_L}{r}\sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{\rho}{r}\right)^n P_n(\cos\theta). \qquad (15.53)$$

Остается определить приливообразующий потенциал на поверхности планеты. Поскольку на поверхности сферической планеты $\rho = R$, то:

$$\delta W = \frac{GM_L}{r}\sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{R}{r}\right)^n P_n(\cos\theta). \qquad (15.54)$$

Приливная деформация уровенной поверхности планеты. Приливное возмущение потенциала неизбежно деформирует уровенную поверхность планеты. Выполним приближенную оценку этих искажений. Для простоты будем считать, что Земля шар со сферически симметрично распределенной массой. Тогда ее невозмущенный гравитационный потенциал на поверхности планеты имеет простой вид GM/R. Для точки *P*, находящейся на расстоянии ρ от центра сферы гравитационный потенциал Земли равен *GM/ρ*. Добавляя сюда приливной потенциал, получим возмущенную поверхность уровня:

$$W = \frac{GM}{\rho} + \frac{GM_L}{r}\frac{2x^2 + y^2 + z^2}{2r^2} = W_0.$$

В качестве константы мы возьмем невозмущенный гравитационный потенциал на поверхности. Тогда, после деления на гравитационную постоянную, получим:

$$\frac{1}{\rho} + \frac{M_L}{M}\frac{2x^2 + y^2 + z^2}{2r^2} = \frac{1}{R}.$$

Здесь переменными величинами являются *x, y, z* и *ρ*. Обозначим отношение масс гравитирующего тела к массе планеты греческой буквой μ и решим полученное выражение относительно ρ:

$$\rho = R\left(1 - \mu\frac{R}{r}\frac{2x^2 - y^2 - z^2}{2r^2}\right)^{-1} \approx R\left(1 + \mu\frac{R}{r}\frac{2x^2 - y^2 - z^2}{2r^2}\right).$$

Так как $\rho^2 = x^2 + y^2 + z^2$, с той же степенью точности получим:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2\left(1 + 2\mu\frac{R}{r}\frac{2x^2 - y^2 - z^2}{2r^2}\right).$$

Преобразуем полученное выражение:

$$\left(1 - 2\mu\frac{R^3}{r^3}\right)x^2 + \left(1 + \mu\frac{R^3}{r^3}\right)\left(y^2 + z^2\right) = R^2.$$

Учитывая, что отношения *R/r*

$$\cos z = \frac{1}{r'}(r\cos\theta - R),$$

$$r' = \sqrt{r^2 + R^2 - 2Rr\cos\theta}.$$

- малые величины последнее выражение можно переписать так:

$$\frac{x^2}{R^2\left(1 + 2\mu\frac{R^3}{r^3}\right)} + \frac{y^2 + z^2}{\left(1 - \mu\frac{R^3}{r^3}\right)} = 1.$$

Мы получили уравнение двухосного эллипсоида, у которого ось вращения совпадает с осью *x*, то есть с прямой, соединяющей притягивающее тело с центром Земли. Полуоси этого эллипсоида, очевидно, равны:

$$a = (1 + \mu R^3/r^3)R,$$
$$b = c = (1 - 1/2(\mu R^3)/r^3)R. \qquad (15.55)$$

Итак, уровенная поверхность, заданная в виде шара, вследствие приливного действия другого небесного тела вытягивается в сторону этого тела и превращается в эллипсоид вращения. Большая полуось будет превышать радиус планеты на величину $\Delta a = R\mu\left(\frac{R}{r}\right)^3$, а малые полуоси будут меньше радиуса на величину $\Delta b = \Delta c = \mu\frac{R}{2}\left(\frac{R}{r}\right)^3$. Заметим, кстати, что с той же степенью точности произведение всех трех полуосей остаются постоянными, что говорит о неизменности объема, ограниченного поверхностью уровня.

Для иллюстрации сказанного приведем численный пример. Вычислим приливной "горб" на Земле, вызванный притяжением Луны. Радиус Земли равен R = 6378 *км*, расстояние между центрами Земли и Луны равно $384.4\cdot10^3$ *км*, отношение масс Луна/Земля равно 1:81. Подставляя эти данные в формулу для увеличения большой полуоси, получим 0,36 *м* Нетрудно подсчитать, что на Луне аналогичный приливной горб, направленный в сторону Земли будет равен 13 *м*.

Необходимо подчеркнуть, что в приведенных рассуждениях не учитывается приливные деформации самой Земли, что также изменит поверхность уровня. Для строгих выкладок необходимо задать модель Земли, ее строение, упругие постоянные и т.п., что, конечно, выходит далеко за рамки нашего курса.

Преобразование формулы для приливообразующего потенциала. Аргументом полиномов Лежандра является геоцентрическое зенитное расстояние притягивающего небесного тела θ. Рассмотрим треугольник OPL. Сторона OP, как мы знаем, равна радиусу Земного шара R (если точка P находится на поверхности земного шара), сторона OL равна расстоянию между центрами масс притягивающего и притягиваемого тела r, угол между этими сторонами равен геоцентрическому зенитному расстоянию θ, угол между сторонами PL и продолжением стороны OP равен зенитному расстоянию z. Проекция стороны OL на продолжение стороны OP равна $r\cos\theta = r'\cos z + R$. Отсюда:

$$\cos z = \frac{1}{r'}(r\cos\theta - R),$$
$$r' = \sqrt{r^2 + R^2 - 2Rr\cos\theta}.$$

Можно ли заменить геоцентрическое зенитное расстояние топоцентрическим, которое используется в астрономии? Какую ошибку мы сделаем, если заменим в формуле (15.55) угол θ зенитным расстоянием z Очевидно, что мы должны оценить величину $|\cos z - \cos\theta| = \max$.

Пусть отношение $u = R/r$ является малой величиной, тогда:

$$\cos z = \frac{r}{r'}\left(\cos\theta - \frac{R}{r}\right) = \frac{\cos\theta - u}{\sqrt{1 - 2u\cos\theta + u^2}} \approx$$
$$\approx (\cos\theta - u)(1 + u\cos\theta) \approx \cos\theta - u(1 - \cos^2\theta),$$

Следовательно, $|\cos z - \cos\theta| \approx u\sin\theta$. Эта величина максимальна при $\theta = \pi/2$. Так если гравитирующее тело - Луна, то u = 6.371/384.4=0.0166. Следовательно, максимальное искажение зенитного расстояния в системе Земля-Луна не превосходит 1,7%. Для большинства задач этим отличием можно пренебречь и в качестве приливообразующего потенциала брать

$$\delta W = \frac{GM_L}{r}\sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{R}{r}\right)^n P_n(\cos z). \qquad (15.56)$$

Понятно, что наибольший вклад в приливные явления создает первый член формулы (15.56). Очень часто им и ограничиваются, хотя при строгом анализе приливных явлений приходится учитывать и остальные члены разложения (15.56).

Итак, приливообразующий потенциал с точностью до R^2/r^2 имеет вид:

$$\delta W_2 = \frac{GM_L}{r}\frac{R^2}{2r^2}(3\cos^2 z - 1). \qquad (15.57)$$

Выполним некоторые преобразования полученной формулы и приведем к общепринятому виду. Поскольку $\cos^2 z = \frac{1}{2}(1+\cos 2z)$, то, подставляя это выражение в формулу (6.11) после несложных преобразований, получим:

$$\ddot{x} + 2\varepsilon\dot{x} + n^2 x = n^2 \cos\omega t.$$

$$\delta W_2 = \frac{3GM_L}{4r}\left(\frac{R}{r}\right)^2(\cos 2z + \frac{1}{3}). \qquad (15.58)$$

Величина $D = \frac{3GM_L R^2}{4r^3}$ называется *постоянной Дудсона*. Теперь вместо (6.12) можно записать:

$$\delta W_2 = D(\cos 2z + \frac{1}{3}). \qquad (15.59)$$

Заметим, что так называемая *постоянная Дудсона* вовсе не является, постоянной величиной, так как расстояние между притягивающим и притягиваемым телами изменяются из-за того, что они движутся по орбитам, строго говоря, не эллиптическим, подчиняясь законам небесной механики. В книге бельгийского ученого П. Мельхиора известного специалиста по приливам приводятся численные значения постоянных Дудсона:

для Луны $D = 3D\left(\sin^2\varphi\sin^2\delta - \frac{1}{3}(\sin^2\varphi + \sin^2\delta) + \frac{1}{9}\right) =$

$= 2{,}6206\ м^2/с_2,$

для Солнца $D = 1{,}2035\ м^2/с_2.$

Типы приливных волн. Все наблюдаемые приливные явления делятся на полусуточные, суточные и долгопериодические. Вернемся к формуле (15.59), в которой переменной величиной будем считать только зенитное расстояние. Известно, что

$$\cos z = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos H,$$

$$\cos 2z = 2\cos^2 z - 1,$$

$$\cos^2 H = \frac{1}{2}(\cos 2H + 1),$$

где φ - широта места наблюдения, δ - склонение светила, H - часовой угол, поэтому

$\cos 2z = 2\sin^2\varphi\ \sin^2\delta + 4\sin\varphi\ \cos\varphi\ \sin\delta\ \cos\delta\ \cos H + 2\cos^2\varphi\ \cos^2\delta\ \cos H - 1.$

Подставляя полученное выражение в (15.59), будем иметь:

$$\delta W_2 = D\left(\cos 2z + \frac{1}{3}\right) = D\left(2\sin^2\varphi\sin^2\delta + \cos^2\varphi\cos^2\delta - \frac{2}{3}\right) +$$

$$+ D\sin 2\varphi\sin 2\delta\cos H + D\cos^2\varphi\cos^2\delta\cos 2H.$$

Первая группа членов не зависит от часового угла. Здесь переменная величина только склонение, которое меняется медленно. Это долгопериодная часть приливообразующего потенциала. Второй член приведенной суммы имеет аргументом H - часовой угол, который меняется от 0 до 2π за одни сутки. Следовательно, он формирует суточный прилив. Третий член с аргументом $2H$, как нетрудно догадаться - полусуточный.

Долгопериодические приливы. Будем помечать долгопериодическую компоненту приливного потенциала штрихом. Тогда

$$\delta W' = D\left(2\sin^2\varphi\sin^2\delta + \cos^2\varphi\cos^2\delta - \frac{2}{3}\right) =$$

$$= D\left(2\sin^2\varphi\sin^2\delta + (1-\sin^2\varphi)(1-\sin^2\delta) - \frac{2}{3}\right) =$$

$$= D\left(3\sin^2\varphi\sin^2\delta - (\sin^2\varphi + \sin^2\delta) + \frac{1}{3}\right) =$$

$$= 3D\left(\sin^2\varphi\sin^2\delta - \frac{1}{3}(\sin^2\varphi + \sin^2\delta) + \frac{1}{9}\right).$$

Окончательно

$$\delta W' = 3D\left(\sin^2\varphi - \frac{1}{3}\right)\left(\sin^2\delta - \frac{1}{3}\right). \qquad (15.60)$$

Этот прилив имеет период, равный половину периода обращения притягивающего светила за счет изменение склонения. Если это - лунный прилив, то период его две недели, если солнечный - полгода. Линия узлов (приливообразующий потенциал равен нулю) проходит по параллелям, для которых $\sin^2\varphi = 1/3$, то есть $\varphi = \pm 35°16'$.

Долгопериодический прилив имеет зональную конфигурацию, он изменяет момент инерции Земли относительно оси вращения и, следовательно, изменяет и ее скорость вращения. Этот прилив можно наблюдать с помощью радиотелескопов со сверхдлинной базой, позволяющих обнаруживать ничтожно малые изменения в продолжительности суток.

Суточные приливы. Они определяются вторым членом в приливообразующем потенциале

$$\delta W'' = D\sin 2\varphi\sin 2\delta\cos H. \qquad (15.61)$$

За одни сутки часовой угол H изменяется на 2π, что и определяет периодичность этого члена потенциала. Небольшие отличия от суток вносит изменение склонения светила. У этого прилива линии узлов проходят по меридиану (H = ± 12 часов) и по экватору. Поверхность шара оказывается поделенной на четыре части, причем южное полушарие повторяет северное, но с другим знаком. Такую конфигурацию прилива мы относим к тессеральным. Этот прилив не изменяет момента инерции, и, следовательно, не меняет угловую скорость вращения Земли.

Полусуточные приливы. Третий тип приливов определяется членом

$$\delta W''' = D\cos^2\varphi\cos\delta\cos H. \qquad (15.62)$$

Изменение аргумента на 2π достигается за 12 часов, что и сообщает этой части приливообразующего потенциала полусуточную периодичность. Линии узлов - два меридиана с часовыми углами H = 3 часа и H = 9 часов. Поверхность Земли оказывается снова рассеченной на четыре части, на четыре сектора. Отсюда и секториальная конфигурация полусуточного прилива.

Подъем уровенной поверхности будет наблюдаться в секторе, обращенном в сторону притягивающего тела. В противоположном секторе - также подъем. В секторах, ориентированных под углом $\pi/2$ - минимум.

Периоды приливообразующего потенциала, подсчитанные только по часовому углу, слишком упрощенный подход. Во-первых, мы рассматривали только одно притягивающее тело - Луну, хотя значительный вклад и земные приливы вносит и

Солнце. Приливы от Луны и Солнца, строго говоря, нельзя рассматривать как сумму приливов отдельно от Луны и от Солнца, так как сами формулы для вычисления потенциала нелинейные. Линейным образом этот потенциал зависит лишь от масс этих небесных тел, что же касается геометрии - то нелинейная зависимость очевидная. Приливную силу, действующую на планету, можно представить в виде суммы гармоник с аргументами, выражающиеся линейной комбинацией углов, которые можно представить в виде $a\tau + bs + ch + dp + eN' + fps$, где

τ - среднее лунное время,

s - средняя долгота Луны,

h - средняя долгота Солнца,

p - долгота перигея Луны,

ps - долгота перигея Солнца.

Аргументным числом называется шестизначное число (a, $b + 5$, $c + 5$, $d + 5$, $e + 5$, $f + 5$).

Приведем здесь перечень основных приливных волн (по П.Мельхиору "Земные приливы"):

волна	период	аргументное число	периодическая функция
M_2	12.25	(255.555)	$A \cos 2\tau$
N_2	12.39	(245.655)	$A \cos (2\tau - s + p)$
O_1	25.49	(145.555)	$A \cos (\tau - s)$
K_1	23.56	(165.555)	$A \cos (\tau + s)$
M_f	две недели	(075.555)	$A \cos 2s$
M_m	тропический месяц	(065.455)	$A \cos (s + p)$
S_2	12.00	(273.555)	$A \cos (2\tau + 2s - 2h)$
P_1	24.04	(163.555)	$A \cos (\tau + s - 2h)$

В приведенной таблице период указан в часах и минутах. Полусуточные приливы- это M_2, N_2 и S_2. Первые два связаны с Луной, третий -- с Солнцем. Суточные приливы это O_1 (*Луна*), P_1 и K_1 (*Солнце*). Поскольку периоды приливных волн известны точно, так как движения небесных тел подчинятся законам небесной механики, то для исследования приливных волн применяют методы гармонического анализа. Представление приливных явлений гармониками введено еще известным геофизиком Дарвиным (1883). Изложенная выше классификация гармоник предложена Дудсоном. Им же, а затем и Леколазе предложены методы гармонического анализа. Среди российских ученых известен метод Перцева, который позволяет не только выделять отдельные гармоники, но и исключать дрейф в записи приливных волн.

Наблюдения приливных явлений на Земле. Наблюдаемые приливные явления на Земле:
- морские приливы,
- вариации высот земной поверхности,
- вариации силы тяжести,

- вариации отклонений отвесной линии,
- вариации угловой скорости вращения Земли,
- деформации земной коры,
- колебания уровня подземных вод.

Наблюдения за морскими приливами осложнены тем, что на высоту морского прилива влияют конфигурация берегов, температура и соленость воды, климатически условия. Учесть все эти факторы с необходимой точностью - очень сложная задача. Дж.Дарвин наблюдал долгопериодическую составляющую морского прилива и получил, что амплитуда приливной волны составляет всего 2/3 от расчетной.

Наблюдения вариаций высот земной поверхности также технически очень сложная задача.

Пусть точка P лежит на земной поверхности. Через эту точку проходит поверхность уровня $W = C$. Невозмущенная приливами поверхность уровня $W_0 = C$ проходит через другую точку, назовем ее точкой Q. Вектор силы тяжести есть отношение приращения потенциала к расстоянию между точками P и Q. Для определенности будем считать, что точка P расположена выше точки Q, а расстояние между ними равно ς_o. Тогда $g = -(W_0(P) - W_0(Q))/\varsigma_o$.

Но $W(P) = W_0(P) + \delta W(P)$, поэтому $g\,\varsigma_o = W_0(Q) - (W_0(P) - \delta W_0(P)) = \delta W(P) + (W_0(Q) - W(P))$.

Выражение в скобках равно нулю, так как по условию и возмущенный потенциал в точке P и невозмущенный потенциал в точке Q равны одной и той же постоянной C.

Итак, приливная вариация высоты поверхности уровня для абсолютно твердой Земли определяется через приливообразующий потенциал следующим образом

$$\varsigma_o = \delta W/g. \qquad (15.63)$$

Согласно (15.59) приливные колебания поверхности уровня можно вычислить по формуле:

$$\varsigma_0 = \frac{D}{g}\left(\cos 2z + \frac{1}{3}\right). \qquad (15.64)$$

Поверхность Земли, естественно, не повторяет движений поверхности уровня, хотя и "тянется" за ней. В первом приближении можно считать, что колебания поверхности Земли пропорциональны колебаниям поверхности уровня:

$$\varsigma = h\varsigma_0. \qquad (15.65)$$

Таким образом, число h есть упругая постоянная, которая называется *первым числом Лява*.

При деформации Земли происходят перераспределение масс. При этом изменяется и собственный гравитационный потенциал планеты. Предполагая, что изменение потенциала пропорционально приливообразующему потенциалу, можно записать:

$$\delta W^* = k\delta W. \qquad (15.66)$$

Постоянная k есть *второе число Лява.*

Если бы Земля была абсолютно твердой, то никаких деформаций бы не было и обе упругие постоянные Лява равнялись бы нулю. В действительности первое число приблизительно равно 0,5, а второе 0,2.

Вариации силы тяжести. Обратимся снова к формуле (15.58). Чтобы получить приливную вариацию силы тяжести нужно продифференцировать приливообразующий потенциал по радиусу Земли, а знак производной изменить на обратный, так как при увеличении силы тяжести растет компонента силы, направленная внутрь Земли.

$$\Delta g_0 = -\frac{\partial(\delta W)}{\partial R} = -\frac{\partial D}{\partial R}\left(\cos 2z + \frac{1}{3}\right) = -\frac{2D}{R}\left(\cos 2z + \frac{1}{3}\right). \qquad (15.67)$$

В частности, лунный прилив создает вариацию силы тяжести

Δg_o = - 82(cos2z + 1/3) мкГал, а солнечный

Δg_o = - 38(cos2z + 1/3) мкГал.

Формула (15.67) дает возможность вычислить изменение силы тяжести только за счет приливообразующего потенциала, но не учитывает того факта, что высота прибора (гравиметра), с помощью которого измеряются вариации, также изменятся под действием тех же приливов. Известно. Что с увеличением высоты сила тяжести уменьшается, таким образом происходит усиление вариаций силы тяжести (приблизительно на 20%). Так, если приливная вариация силы тяжести для твердой Земли есть Δg_o, то истинной приливной вариацией будет:

$$\Delta g = \delta \Delta g_o, \qquad (15.68)$$

где множитель δ называется дельта фактором.

Дельта фактор постоянные Лява связаны между собой, в первом приближении, линейной зависимостью:

$$\delta = 1 + h - 3/2\ k. \qquad (15.69)$$

Как мы уже говорили, вариации силы тяжести измеряют специальным гравиметром, обладающим очень высокой чувствительностью. Такой гравиметр обычно не переносят из одной точки в другую. Он устанавливается стационарно на специальных станциях, где ведутся непрерывные наблюдения за приливами. В Московском университете такая станция имеется в ГАИШе в отделе гравитационных измерений. Гравиметр связан с компьютером, на котором выполняется графическое представление изменения силы тяжести.

Формула (15.69) выведена при условии, что приливная волна имеет очень большое период, то есть практически - это статический вариант, которого в действительности не бывает. Экспериментальные исследования показали, что упругие постоянные нельзя считать постоянными величинами: они зависят от периода волны. Зависимость дельта-фактора от периода приливной волны является очень сильным средством для тестирования принятой модели планеты.

Отклонения отвесной линии. Приливные силы изменяют не только величину силы тяжести, но ее направление, что отклоняет отвесную линию. Формулу для оценки отклонений отвесной линии получим, если продифференцируем изменение высоты уровенной поверхности по горизонтальной координате. Из формулы (15.54) следует, что угол отклонения отвесной линии в плоскости меридиана для абсолютно твердой Земли равен

$$\xi_0 = -\frac{\partial \xi_0}{\partial(Rz)} = -\frac{D}{Rg}\frac{\partial}{\partial z}\left(\cos 2z + \frac{1}{3}\right) = \frac{2D}{Rg}\sin 2z. \qquad (15.70)$$

Согласно Мельхиору: для Луны ξ_0 = 0,0173” sin2z, для Солнца ξ_0 = 0,0078” sin2z.

Наблюдения за отвесной линией производят высокочувствительными горизонтальными маятниками на специальном подвесе, который позволяет усилить влияние ничтожно малых отклонений вертикали относительно жесткого основания. Применяют также и вертикальные маятники, которые помещают в скважины. Высокую чувствительность в этом случае обеспечивается специальными датчиками перемещений. Приборы, предназначенные для регистрации вариаций в направлении отвесной линии, носят название *наклономеров*. В любом случае непрерывно регистрируется вариации вертикали относительно опоры. Та, в свою очередь, также подвержена влиянию приливных сил, которые наклоняют опорную площадку. Если бы Земля была абсолютно жидкой, наклон ее поверхности совпал бы с поверхностью уровня, никакой прибор не сумел бы отметить отклонение отвесной линии. Для абсолютно твердой Земли отклонение отвесной линии

можно вычислить по формуле (15.70). Очевидно, что для реальной Земли это отклонение нужно вычислять с учетом упругости, то есть нужно снова ввести фактор

$$\xi = \gamma\xi_0. \qquad (15.71)$$

Между гамма-фактором и числами Лява также имеется связь:

$$\gamma = 1 + k - h. \qquad (15.72)$$

Однако гамма-фактор не является глобальной характеристикой планеты, а скорее отражает местные геологические особенности. В частности, в Японии делаются попытки использовать наблюдения за вариациями отклонений отвеса для предсказания землетрясений.

Космогоническое значение исследования приливов. Вклад приливных взаимодействий между спутником и планетой особенно отчетливо виден на примере системы Земля-Луна. Наш спутник обращен к нам всегда одной стороной, то есть его вращение вокруг оси строго синхронизировано с периодом обращения вокруг Земли. Почему?

Существует гипотеза о приливном торможении вращения Земли. Ее идея заключается в следующем. Земля является упругим телом и подобно линейному осциллятору на периодическое внешнее воздействие дает реакцию в виде перемещений масс и фазового запаздывания. Уравнение линейного осциллятора, как известно, имеет вид:

$$\ddot{x} + 2\varepsilon\dot{x} + n^2 x = n^2 \cos\omega t.$$

Периодическое решение этого уравнения имеет вид: $x = \lambda\cos\omega(t - t_{зап})$,

где $\lambda = \left(\left(1 - \frac{\omega^2}{n^2}\right)^2 + \frac{4\varepsilon^2\omega^2}{n^4}\right)^{-\frac{1}{2}}$, $\quad t_{зап} = \frac{1}{\omega}\arctan\frac{2\varepsilon\omega}{n^2 - \omega^2}$.

При $n = \omega$ имеем резонансное решение $x_{рез} = Q\cos(nt - \pi/2)$, где Q называется добротностью осциллятора. Для Земли добротность равна около 100 и с глубиной растет. Фазовые задержки (запаздывание) для полусуточного прилива составляет 3-4, что соответствует добротности $Q = 15$. Это противоречит сейсмическим данным, которые указывают на более высокую добротность. Возможно, дополнительная диссипация энергии происходит за счет морских приливов.

Фазовая задержка приводит к тому, что ближайший к Луне приливной горб Земли оказывается смещенным. Луна, притягивая этот приливной горб, сообщает Земле вращательный момент, тормозящий вращение. Однако, противоположный приливной горб, наоборот ускоряет вращение. Поскольку работает закон обратных квадратов, то второй горб дает меньший момент и сумма их, в целом. замедляет вращение Земли. Расчеты показывают, что замедление должно увеличивать продолжительность суток на 3,5 *мс* за столетие. В действительности сутки увеличиваются только на 2 *мс* за 100 лет. Следовательно, имеется и другой механизм потери энергии, скорее всего - это водная оболочка Земли.

Поскольку масса Земли существенно превосходит массу Луны, то приливное торможение Луны давно завершилось, и поэтому Луна всегда обращена на Землю одной стороной. Гравитационное влияние двух приливных горбов на Земле приводит к тому, что имеется составляющая приливной силы, направленная вдоль траектории движения Луны, которая сообщает ей дополнительную механическую энергию. Подчиняясь законам механики, Луна отдаляется от Земли со скоростью 3 *см* в год, двигаясь по спирали. Если предположить, что скорость "убегания" Луны от Земли за последние миллиарды лет сохранилась, то 1,5 *млрд. лет* Луна была в 10 раз ближе, а приливной эффект от нее в 1000 раз сильнее! Конечно, такие оценки слишком грубые, необходимо применять более строгую теорию эволюции системы Земля-Луна.

Эффект Этвеша (ЭЭ) **-** явление, заключающееся в том, что в одном и том же месте у предмета, находящегося в покое, и предмета, движущегося относительно Земли, ускорение силы тяжести имеет различные значения. ЭЭ обусловлен изменением центробежной составляющей силы тяжести, зависящей от скорости движения предмета. При движении в направлении вращения Земли, т. е. с запада. на восток, скорость предмета складывается со скоростью вращения и центробежная сила увеличивается, а следовательно, уменьшается действующая сила тяжести; и, наоборот, — сила тяжести увеличивается при движении против вращения Земли. Величина ЭЭ (в Галах) равна

$$\Delta g = 0{,}00405V \cos\varphi \sin A + 0{,}00000121V^2,$$

где (φ - широта, A- азимут движения, отсчитываемый по часовой стрелке от направления на север, V — скорость предмета относительно Земли (в км/ч). ЭЭ учитывается при измерениях силы тяжести *маятниковыми приборами и гравиметрами,* установленными на движущихся кораблях и самолетах. Член с V^2 является практически пренебрежимо малым только при скоростях движения V<15 *км/ч.* Эффект назван по имени Л. Этвеша, впервые указавшего на его существование и создавшего прибор для демонстрации ЭЭ в лабораторных условиях.

Этвеш - внесистемная единица градиента силы тяжести, равная изменению ускорения свободного падения на 10^{-9} см/с^2 на расстоянии в 1 см, обозначается E. $1E = 10^{-9}$с$^{-2}$, что соответствует изменению силы тяжести в 0,1 мГал на 1 км. Единица названа по имени Лоранда Этвеша.

15. 9. Гравиметры.

Гравиметры - приборы для измерения ускорения силы тяжести. Первые варианты конструкции гравиметров предложены Ломоносовым (1756) и английским астрономом Хершелем (Hershel, 1833). Прибор, годный для полевых измерений, впервые создал шведский геофизик Исинг (1918). Большинство современных гравиметров. построено по схеме вертикального сейсмографа Голицина. Гравиметр - весьма чувствительный прибор. Его главной частью является грузик (масса), подвешенный на пружине. Изменения ускорения силы тяжести вызывают изменения веса грузика, соответственно пружина удлиняется либо поворачивается на некоторый угол. С помощью дополнительной пружины грузик выводится в исходное положение. Мерой изменения ускорения силы тяжести g служит изменение натяжения измерительной пружины. Чувствительная система современного гравиметра изготовляется из кварца или специального металлического сплава. Корпус гравиметра служит для предохранения чувствительной системы от механического, теплового и др. воздействия. Оптическая система и микрометр с высокой точностью фиксируют положение грузика и натяжение пружины. Наблюдения на одной точке занимают 4—5 мин. Сопоставляя показания гравиметра в смежных точках, определяют относительные приращения Δg вертикальной компоненты ускорения силы тяжести. Точность гравиметра позволяет определять Δg величиной до 0,01 мгл, т. е. 10^{-8} полной величины g. Гравиметры используются в гравиразведке для изучения земной коры, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Специальные геодезические гравиметры обладают широким диапазоном измерения g, для них характерно линейное изменение нуль-пункта в течение больших интервалов времени. Сильно демпфированные гравиметры применяются для измерений в движении на подводных и надводных кораблях. При съемке континентальных шельфов используются донные гравиметры, дистанционно управляемые с борта судна. Съемка в движении на самолете находится в стадии успешной разработки.

Типы гравиметров. В практике гравиразведки применяются в основном статические гравиметры. Они основаны на компенсации силы тяжести силой упругости пружины или

силой кручения нити (рис. 15-2 *а* и *б*). Эти гравиметры служат лишь для относительных измерений ускорения силы тяжести. Абсолютное значение gi в i-той точке получают, суммируя известное $g_{исх}$ на исходной точке и измеренное приращение ускорения силы тяжести Δgi между i-той и исходной точками.

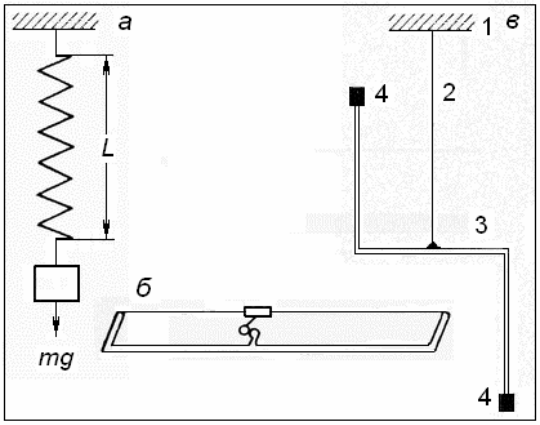


Рис. 15-2. Системы гравиметров: *а* – пружинная, *б* - крутильная, *в* - вариометр: 1 - корпус прибора, 2 - упругая нить, 3 - коромысло, 4 – грузики.

В гравиметрах 1-го рода мерой изменения ускорения силы тяжести служит изменение длины пружины, один конец которой закреплен, а к другому подвешен груз массой m (рис. 15-2-*а*). Равновесие в этом случае достигается при $mg = \tau L$, где L - длина пружины, τ - коэффициент упругости пружины. Проведя измерения на опорной точке g_0, получим $mg_0 = \tau L_0$. Аналогично, в i-той точке будем иметь $mg_i = \tau L$i. Тогда приращение силы тяжести между этими точками можно рассчитать по формуле $\Delta g \approx \tau \Delta L/m$.
Схема чувствительной системы гравиметра 2-го рода представлена на рис. 15-2-*б*. Здесь рычаг с грузиком крепится к горизонтальной упругой нити и под воздействием силы тяжести наклоняется, закручивая нить. С помощью измерительных пружин с микрометрическим винтом грузик выводится в горизонтальное положение. Переходя на другую точку, под воздействием приращения силы тяжести грузик отклоняется. Для вывода его в горизонтальное положение вновь необходимо использовать измерительную пружину, а на микрометрическом винте по специальной шкале взять отсчет Δn. Отсюда $\Delta g = C\Delta n$, где C- цена деления прибора, зависящая от его конструктивных особенностей.

Точность измерений с разными типами гравиметров на суше составляет 0,01 - 0,5 мГал, при измерениях на море и в воздухе точность достигает 1 мГал.

Для измерения вторых производных потенциала силы тяжести применяют вариометры и градиентометры. Гравитационные вариометры 1-го рода измеряют ($W_{yy} - W_{xx}$), W_{xy} и 2-го рода - W_{xx}, W_{yz}, ($W_{yy} - W_{xx}$), W_{xy}. Для измерения вертикального градиента силы тяжести используются наблюдения гравиметрами на двух высотах. Гравитационные горизонтальные градиентометры измеряют W_{xx}, и W_{yz}. Чувствительным элементом данных приборов являются крутильные весы, представляющие собой коромысло с двумя грузиками равной массы на концах, закрепленные на вертикальной нити. Один грузик располагают выше другого, вследствие чего крутильные весы имеют вид, показанный на рис. 15-2-*в*.

Неоднородности поля силы тяжести вызывают поворот коромысла на определенный угол, позволяющий судить об их величине. Для определения различных вторых производных гравитационного потенциала чувствительную систему устанавливают по нескольким (трем - пяти) азимутам. В градиентометрах отсчеты берутся визуально, а в вариометрах фиксируются на фотопластинках. Ограниченное применение данных приборов обусловлено громоздкостью установки и низкой производительностью.

В разных странах изготовлялись разные вариометры и градиентометры, в том числе цифровые.

Рис. 15-3. Общий вид гравиметров: ГАБЛ (слева) и CG-3 AutoGrav (справа).

Гравиметр абсолютный баллистический лазерный типа ГАБЛ-Э (разработка ИАЭ СО РАН) предназначен для измерения абсолютного значения и вариаций ускорения силы тяжести *g* при решении фундаментальных геофизических, геодезических и метрологических задач.

Принцип действия гравиметра ГАБЛ-Э основан на баллистическом методе измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести *g*. Она определяется по результатам измерения пути и времени свободного падения оптического уголкового отражателя. Измерение пути, пройденного падающим телом, осуществляется лазерным интерферометром (мерой пути служит длина волны излучения лазера, стабилизированного по атомному реперу в спектре его излучения), а мерой интервалов времени являются сигналы прецизионного (например, рубидиевого) стандарта частоты. В серии лазерных гравиметров типа ГАБЛ используется несимметричный метод измерения ускорения свободного падения. Технические характеристики: Среднеквадратическая погрешность измерения - не более ±2 мкГал. Систематическая погрешность - не более ±5 мкГал.

Гравиметр CG-3 (разработчик и изготовитель: фирма Scintrex, Канада) - микропроцессорный, автоматический гравиметр со множеством принципиально новых характеристик. CG-3 AutoGrav работает в диапазоне 8000 мГал, благодаря чему он может использоваться в любой точке мира без предустановок. Базовый CG-3 имеет выходную точность 5мкГал при стандартной девиации <10мкГал. Измеряющий микрогалы CG-3M имеет стандартную точность 1 мкГал при стандартной девиации <5 мкГал.

Чувствительная система CG-3 Autograv базируется на упругой конструкции из плавленого кварца. Гравитационная сила, приложенная к пробной массе,

уравновешивается пружиной и относительно маленькой электростатической силой. Присущая плавленому кварцу прочность и отличная упругость вместе с ограничителями движения пробной массы позволяют работать без арретира.

15. 10. Сила тяжести в прошлом.

Изменение силы тяжести во времени. Все, что окружает нас на поверхности Земли, испытывает действие силы тяжести, она направлена вертикально вниз и воспринимается нами как вес. Сила тяжести пропорциональна массе тела. Коэффициент пропорциональности обозначается обычно через g и называется ускорением свободного падения. На поверхности Земли ускорение свободного падения приблизительно равно 980 см/с^2 или 980 Гал (в честь Галилея). Сила притяжения уменьшается примерно на 0,3 мГал при подъеме тела на высоту в 1 метр относительно земной поверхности. Земля, как известно, вращается, поэтому на тело, находящееся на ее поверхности, кроме силы тяжести действует еще одна сила - центробежная. Эта сила максимальна на экваторе, где величина g уменьшается под ее влиянием на 3,4 Гала. На полюсах центробежная сила отсутствует.

Из закона всемирного тяготения вытекает, что:

$$g = GM/R^2 ,$$

где M - масса Земли, R - ее радиус, G - гравитационная постоянная. Коэффициент пропорциональности G необходим для согласования размерностей обеих частей равенства. Ньютон показал, что G величина постоянная и открытый им закон тяготения универсален. Общая теория относительности (ОТО) Эйнштейна так же содержит G в качестве фундаментальной константы.

Гравитационный потенциал Земли можно выразить следующим образом:

$$\varphi = GM/R + G/R^3 \times [(A + B)/2 - C] (3/2cos2\theta - S) + \Omega^2 R^2/2 \sin\theta. \qquad (15.73)$$

Здесь: A, B и C - моменты инерции Земли относительно ее основных осей, угол θ - дополнение к широте, Ω - частота вращения Земли.

Как следует из формулы (15.73), сила тяжести (гравитационный потенциал) на поверхности Земли может измениться со временем, если будут меняться: гравитационная постоянная, масса Земли или ее радиус, а так же скорость вращения. Рассмотрим возможные модели, в которых эти параметры могут изменять свои значения в течение времени эволюции Земли.

С точки зрения физики, наибольший интерес представляет идея об изменении величины гравитационной постоянной G высказанная Дираком (Dirac, 1938). Он обратил внимание на безразмерную постоянную $e^2/4\pi G m_e m_p$, которая по порядку величины равна 10^{40}. Эта постоянная может быть получена следующим образом. Сила взаимодействия протона и электрона в атоме водорода обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними: $F_e = e^2/4\pi r^2$. То же самое относится и к гравитационному взаимодействию: $F_g = G m_e m_p/r^2$. Если составить отношение сил электростатической и гравитационной, то получится постоянная Дирака. Он высказал предположение (гипотеза больших чисел), что такое большое число в природе не может быть случайным, и связал это число с возрастом Вселенной. По последним оценкам ее возраст (T) составляет примерно 18 млрд. лет. Год - это искусственная единица времени. Дирак воспользовался атомной единицей времени, в которой за отсчет берется интервал времени, в течение которого свет проходит "сквозь" классический электрон $e^2/4\pi m_e c^3$. Возраст Вселенной в этих единицах оказывается равным $\approx 10^{40}$. Дирак предположил, что эти очень большие числа действительно равны, т.е.:

$$e^2/4\pi G m_e m_p \approx T. \qquad (15.74)$$

В атомной системе единиц заряд электрона e, массы протона и электрона m_p и m_e постоянны, если возраст Вселенной T растет, значит должна изменяться гравитационная

постоянная ($G \sim 1/T$). В соответствии с возрастом Вселенной за год это изменение должно составлять 5×10^{-11}.

П. Дирак обратил внимание еще на одну очень большую безразмерную величину - полную массу Вселенной, выраженную в массах протона (примерно 10^{80}). Согласно гипотезе больших чисел следует ожидать, что это число пропорционально возрасту Вселенной в квадрате ($\sim T^2$). Это означает, что во Вселенной должно рождаться вещество, причем рождаться непрерывно. Дирак предположил два различных механизма этого явления. В первом из них новое вещество непрерывно рождается во всем пространстве Вселенной. Это, так называемое, - аддитивное рождение. Либо оно рождается рядом с уже существующим веществом, – это мультипликативное рождение. В предположении аддитивного рождения вещества масса Солнца $M_\odot$ остается приблизительно постоянной величиной, следовательно ($G \times M_\odot$) ~ $1/T$. Если имеет место мультипликативное рождение, $M_\odot \sim T^2$, т. е. ($G \times M_\odot$) ~ T.

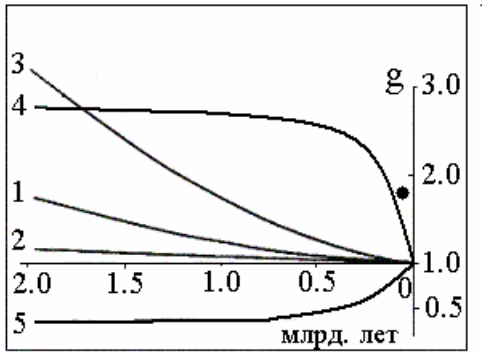


Рис. 15-4. Изменение силы тяжести во времени по различным моделям: 1 – Дике, 2 – термического расширения. 3 – Каппа, 4 – наша, 5 – Веселова и др. Точка – оценка Стюарта.

Идеи П.Дирака были развиты и обобщены В. Кануто, П. Джорданом, Р. Дике и др. Проводимые ими исследования в значительной степени касались изменения во времени величины земного радиуса и величины ускорения силы тяжести в зависимости от вариации гравитационной постоянной (см. рис. 15-4). Кануто (Canuto, 1981) предполагал возможность вариации величины G, при этом, он считал, что при вариациях земного радиуса происходит превращение части потенциальной гравитационной энергии в энергию электромагнитного поля (?). Дике (Dicke, 1962) показал, что нет принципиальной разницы между предположениями об изменении массы и изменении гравитационной постоянной. Можно предположить, что в постоянной Дирака изменяется со временем электрический заряд, однако, как было показано (Sabbata, 1980), это противоречит современным экспериментальным данным.

Общая теория относительности не удовлетворяет тезису Дирака, но может быть соответствующим образом обобщена, что было сделано сперва Джорданом (Jordan, 1979), а затем Брансом и Дике (Brans, Dicke, 1961). Из теории Джордана вытекает факт творения материи. Бранс и Дике, введя дополнительное к гравитационному скалярное поле, собственно связанное с изменением величины G, “обошли” эту трудность.

Идея “творения” материи, т.е. постоянный рост массы Земли в процессе ее эволюции, по всей видимости, принадлежит русскому, И.О. Ярковскому (1889) (Carey, 1976). Эта идея развивалась О. Хильгенбергом (Hilgenberg, 1933), поддерживалась С. Кэри (Carey, 1976) и, в большей степени, русскими: И.В.Кириловым, В.Ф.Блиновым (1984) и др. Отметим серию работ К.Е. Веселова и др. (1976, 1981, 1984, 1993), в которых авторы, для объяснения концепции глобального рифтогенеза, пытаются создать корпускулярную модель гравитационного поля. В ее основе лежит необоснованное предположение о наличии гипотетического “гравитационного вакуума”, в котором с огромной скоростью

носятся частицы (по всей видимости, гипотетические гравитоны). График поведения во времени величины *g*, следующий из "корпускулярной модели гравитации и инерции" Веселова, так же как и для других моделей, приведен на рис. 15-4.

Альтернативная всем предыдущим и поэтому стоящая несколько в стороне, гипотеза была высказана Каппом (Kapp, 1960), предложившим идею, согласно которой масса Земли 2 млрд. лет тому назад была примерно в 30 раз больше современной, а ее радиус - в три раза больше. Капп считал, что в процессе эволюции Земли ее недра подвергались гравитационному коллапсу, в результате действия которого терялась ее масса (?). Этот процесс он называл buckling, что можно перевести как затягивание ремня пряжкой (другой, шуточный вариант, - жениться) (рис. 15-4). Эта идея перекликается с подходом развиваемым Холмсом (Holmes, 1965), согласно которому в процессе эволюции Земля подвергалась деструкции и уплотнению. Ее изначально "пустые" внутренние объемы сжимались, выбрасывая на поверхность Земли атмосферные газы и воду.

Изменение гравитационного поля в прошлом. Менялось ли гравитационное поле Земли в процессе её эволюции? Ответить однозначно на этот вопрос нельзя и в наше время. Прошло четверть века с момента написания профессором университета в Рединге (Англия) А.Д. Стюартом (Stewart, 1970) обзора "Palaeogravity" на эту тему. Некоторые вопросы, затронутые им, были уточнены за прошедшие с той поры 25 - 30 лет, получены новые экспериментальные данные. Однако нельзя сказать, что в выяснении этого вопроса достигнут большой прогресс. Надо заметить, что тематика исследований, связанных с поведением гравитационного поля Земли в прошлом, не была эти годы особенно популярной. Новых работ появилось довольно мало. Тем не менее, несмотря на определенные успехи в области изучения стабильности во времени гравитационной постоянной и массы Земли, появляются статьи и книги, в которых авторами игнорируются экспериментально полученные данные по стабильности этих параметров. Стюартом были рассмотрены основные идеи, касающиеся физических моделей, в которых оказывается возможным изменение со временем величины силы тяжести на поверхности Земли. Здесь добавлены известные автору немногочисленные работы, в которых предпринималась попытка оценки величины *g* в прошлом (Stewart, 1972; Смирнов, Любина, 1969; Шмидт-Нильсон, 1976; Кренделев, 1977; Кузнецов, 1996). Основные результаты экспериментов по оценке степени стабильности массы и гравитационной постоянной заимствованы из статей (Flandren, 1975; Милюков, 1986; Shapiro et al., 1976).

Системы чувствительные к изменению силы тяжести. Стюарт рассматривает несколько таких систем, которые можно разбить на три подгруппы: К первым отнесем системы, в которых изменение силы тяжести оказывает влияние на геодинамические процессы и явления. Стюарт рассматривает влияние релей-тейлоровской неустойчивости, возникающей при образовании осадочных пород в водной среде; подъем диапиров в мантии и мантийные конвективные системы. Ко второй подгруппе систем можно причислить: гравитационное сжатие глин, палеобарометрический метод и сжатие, и преобразование горных пород движущимися палеоледниками. Третья группа систем базируется на использовании чувствительности к величине силы тяжести биологических объектов, обитавших на Земле в прошлом: оценка размеров летающих животных, оценка относительного веса скелетов земных животных и глубины оставленных ими окаменевших следов.

Прежде чем подробнее рассмотреть эти и близкие к ним системы, обратим внимание на один существенный на наш взгляд момент. Стюарт рассматривал эти геологические данные с основной целью: использования их для оценки изменения величины *G* и выяснения степени правдоподобия теории Дирака. Стюарт полагал, что изменение *g* однозначно определяется уменьшением гравитационной постоянной. Как будет показано нами ниже, астрономические методы оценки стабильности *G* и *M* намного

точнее геологических, хотя и более дорогие, и сложные. Нас будут интересовать эти системы в основном с точки зрения возможности оценки не столько величины g, существовавшей на поверхности Земли в геологическом прошлом, сколько характера ее изменения. С помощью геологических методов достоверно оценить величину g в прошлом, по-видимому, невозможно, поэтому на первом этапе исследований было бы достаточным четко определить, была ли величина g в прошлом больше или меньше современной. Как будет ясно из последующего текста, мнения геологов на этот счет расходятся на диаметрально противоположные.

Геодинамические системы. Релей-тейлоровская неустойчивость возникает обычно в гидродинамической среде, если среда состоит из слоев вещества разной плотности, причем в силу каких-то обстоятельств в системе оказалось так, что плотность верхнего слоя выше, чем нижележащего. Такая ситуация может возникнуть в осадконакоплении в водной среде, когда например, слой тяжелого песка окажется на более легкой глине. Более тяжелый слой, находящийся на слое с меньшей плотностью деформирует пограничный слой в виде синусоидальной волны с длиной волны λ от долей сантиметра до нескольких метров. Слой осадков можно представить в виде ньютоновской жидкости с вязкостью η, которая подвергается растяжению. В нашей модели можно записать: волновое число $k \sim (g/\eta^3)^{1/3}$, и ускорение силы тяжести $g \sim \lambda^{-3}$. Предположим, что в древних осадочных породах наблюдается эффект образования синусоидальных волн, обязанный развитию релей-тейлоровской неустойчивости. Причем, «длина волн» неустойчивости была в древних породах меньше, чем в молодых. Это свидетельствовало бы в пользу уменьшения величины g в течение эволюции Земли.

Стюарт рассматривает механизм подъема соляных диапиров, как способ оценки величины g. Плотность соли обычно меньше чем плотность покрывающих ее пород. Если по каким-либо причинам образовался соляной купол высотой L, а толщина слоя покрывающих пород над вершиной купола T, то возникает выталкивающее давление: $\Delta p = gL(\rho_2 - \rho_1)$. Здесь ρ_2 - плотность покрывающих пород, ρ_1 - плотность соли ($\rho_2 > \rho_1$). Если вещество диапира обладает свойствами жидкости (т.е. вязкостью), то диапир будет подниматься под воздействием выталкивающего давления. Время подъема диапира (время "протыкания" t) определяется такими параметрами как, вязкость его вещества: μ ($\mu = \nu \times \rho$), разность в плотностях $\Delta\rho$, величина L и ускорение силы тяжести g:

$$t = \mu / g\, L\, \rho.$$

Допустим, к примеру, что два диапира "протыкали" покрывающие их породы в геологически разные времена. Причем, такие их параметры как вязкость, плотность и начальная глубина T были одинаковы, а время "протыкания" более древнего диапира было меньше, чем у более молодого. Этот факт говорил бы в пользу того, что величина g со временем уменьшалась и наоборот.

В подтверждение "работоспособности" этой модели Стюарт приводит результат лабораторного эксперимента, в котором соляной "диапир" протыкал покрывающий его слой из асфальта толщиной в полтора сантиметра в течение 0,5 - 3 суток.

В конвективной модели мантии, предложенной Ранкорном в 1962 г., скорость конвекции вещества мантии V определялась плотностью вещества - ρ, коэффициентом объемного расширения - β, разностью температур на верхней и нижней плоскостях конвективной ячейки - ΔT, толщиной ячейки - R, величиной вязкости вещества - μ и ускорением силы тяжести - g:

$$g\, \rho\, \beta\, \Delta T = \mu\, V / R^2$$

Стюарт особо оговаривает такой немаловажный момент, касающийся вязкости. Он считает, что предположение о постоянстве вязкости может ввести в заблуждение. Тем не менее, опуская из рассмотрения ряд параметров, Стюарт обсуждает упрощенную формулу:

$$g = (k \times V)/ \Delta T,$$

согласно которой сила тяжести связана со скоростью конвекции и разностью температур на конвективной ячейке. По ходу обсуждения проблемы, Стюарт делает глобальное обобщение: не является ли континентальный дрейф следствием изменения гравитационного поля Земли.

Сжатие глин. Сжатие глин давлением гравитации (весом вышележащих слоев) Стюарт считал идеальной системой для измерения величины силы тяжести в прошлом. Он разработал метод, хотя и не позволяющий определить точную величину палеогравитационного поля, но дающий возможность найти скорость уменьшения ускорения силы тяжести g со временем (Stewart, 1972). Стюарт полагал, что если величина g в прошлом была больше современной, то, вполне возможно, что некоторые тонкозернистые осадочные породы могли оказаться уплотненными в большей степени, чем это должно было бы произойти, если бы они уплотнялись под весом осадочного слоя существующего в настоящее время. Процесс уплотнения происходит относительно быстро и является практически необратимым, поэтому такие "свидетели" переуплотнения могли бы сохраниться.

Стюарт произвел измерения степени консолидации осадков в Лондонском бассейне. Он нашел, что глины в обнажениях этого бассейна консолидировались при более высоких давлениях, чем давления, соответствующие современной максимальной толщине перекрывающих осадков в Лондонском бассейне. Стюарт допускал, что здесь могли быть еще слои осадков, которые затем были размыты. Однако если консолидация глин произошла все же за счет большей величины силы тяжести в прошлом (у Стюарта - 26 млн. лет назад), то величина g не могла быть больше современной в два раза. Это означает, что максимальное уменьшение g за 26 млн. лет составляет 4×10^{-8} в год. Скорость уменьшения g, по нашей модели, примерно в 10 раз меньше (рис.15-4).

Суть палеобарометрического метода предложенного Стюартом для оценки величины g в прошлом состоит в определении градиента палеолитостатического давления:

$$g \sim (p_2 - p_1)/ L(\rho /e) ,$$

где p_2 и p_1 - литостатические давления двух уровней, L - расстояние между уровнями ρ - их средняя плотность. Разность литостатических давлений можно определить, как считает Стюарт, минералогическими методами. Оценка g может быть сделана в том случае, если известна e. Точное определение величины e представляет очевидную трудность, что ставит применение предлагаемого метода непригодным в ряде случаев, например, в сейсмически активных районах, где величина e может изменяться со временем.

Способ оценки g, как результат сжатия горных пород древними ледниками и определение степени сжатия по глубине оставленных ледниками борозд, как мы отмечали, предлагал еще Холмс. Стюарт считал этот метод наиболее перспективным из всех трех обсуждаемых Холмсом. Аналогичный метод обосновал он сам. Стюарт считал возможным оценивать степень округлости валунов находящихся в осадочных слоях. Валуны изначально были раздроблены весом двигающихся ледников, а затем, при движении их под давлением ледника в воде со скоростью v, они постепенно приобретали округлую форму. Сила "плавучести" валунов определяется формулой:

$$D = 4/3\times\pi\, r^3\, (\rho_1 - \rho_2)\, g,$$

где ρ_1 и ρ_2 - плотности валунов и воды соответственно, r - их радиус. С другой стороны, эта сила уравновешивается сопротивлением среды, которую можно выразить через скорость v:

$$D' = 1/2 \times C\, \pi\, r^2\, \rho_2\, v^2 .$$

В результате, Стюарт получил зависимость скорости движения валунов от величины ускорения силы тяжести: $v^2 = (8\, r\, \Delta\rho\, g)/C\, \rho_2$ (C - константа). Для количественной оценки

необходимо получение природной информации о зависимости скорости v от g для различных типов глин, пород и размеров валунов.

Как выше отмечалось, Холмс считал метод оценки величины g по углам осадочных слоев совершенно непригодным. Подобные исследования были выполнены Смирновым и Любиной (1969), где авторы проанализировали информацию по углам наклонов косых серий в дюнах водной и эоловой природы и углам наклонов фронтальных откосов этих образований из отложений различного возраста (от раннего протерозоя по кайнозой). На довольно малой и непредставительной выборке авторы приходят к выводу, что с течением времени углы наклона косых серий изменяются и, по их мнению, скорее уменьшаются, чем возрастают и, что этот эффект связан с увеличением ускорения силы тяжести с течением времени. Правомерность этого вывода вызывает сомнение. С другим выводом авторов нельзя не согласиться, что "реконструкция g является важнейшей задачей науки о Земле" (Смирнов, Любина, 1969, стр. 877).

Палеонтологические данные. Размер крыльев летающих животных и скорость движения крыльев, согласно Стюарту, находятся в соответствии с их весом и величиной силы тяжести:

$$m\,g = 1/2 \times (C\,S\,\rho\,v^2),$$

где C - безразмерный коэффициент, S - площадь поверхности крыльев, ρ - плотность воздуха, v - скорость движения крыла. Первое, что следует из этой формулы, это связь между ускорением силы тяжести и величинами S и m. Большая сила тяжести в прошлом у животных с одинаковой массой тела требовала больших размеров крыльев (при равной скорости их движения).

Для оценки энергетики (мощности) организма животного биологи вводит понятие интенсивность метаболизма (M). Под этим имеется в виду превращение определенных веществ (белков, глюкозы и т.п.) внутри клеток с момента поступления веществ до образования конечного продукта. Интенсивность метаболизма измеряется в ккал/сутки и имеет смысл и размерность мощности. Эта характеристика для животных самых разных размеров (от крысы до быка) удивительно постоянно зависит от их веса, но заметно отклоняется от прямой зависимости от площади поверхности. Многочисленные исследования подтвердили, что наклон прямой в зависимости интенсивности метаболизма от веса составляет 0,734: $M \sim (mg)^{0.734}$, или: $\approx (mg)^{3/4}$ (Шмидт-Нильсон, 1976). Зависимость: $M \sim (mg)^{3/4}$ хорошо известна для животных, однако недавно аналогичная зависимость была получена и для растений (Гиляров, 1999). Под M здесь понимается величина, характеризующая интенсивность использования растениями ресурсов и их продуктивность.

Как показал Стюарт, $M \sim L$ (L - линейный размер летающего животного, в частности, птицы). Поэтому, полагая очевидными пропорции:

$$M \sim L \sim (mg)^{3/4};\ (mg)^{3/4} \sim (L\,g)^{3/4}$$

(если считать правомерной пропорцию: $m \sim L$, а не $m \sim L^3$, как в неживой природе);

$L \sim (L\,g)^{3/4}$; величина L оказывается зависимой от g: $L \sim g^3$.

Как это может показаться ни парадоксально, но с увеличением силы тяжести, должен возрастать размер животных. Ведь, казалось бы, что мелкому животному легче преодолеть большую величину силы тяжести, чем более крупному. Оказывается, что это ошибочное представление. Большие размеры животных (и растений) в прошлом, в этом случае, доказывают большую величину силы тяжести, чем ее современное значение.

Стюарт делает оценку величины g по относительному весу скелета животных. При этом он использует формулу Эйлера для оценки величины нагрузки на кость скелета (F):

$$F = \pi^2 E \times I / L^2\ ,$$

E - модуль Юнга, I - момент инерции [$I = (k\ \pi\ r^4)/4$], L - длина кости, r - ее радиус, k - константа. Подставляя, получаем:

$$F = \pi^3 k E / 4 \times (r^4 / L^2).$$

Полагая, что F должна быть: примерно равной mg, где m масса животного, зависимость ускорения силы тяжести имеет следующий вид:

$$mg \sim r^4 / L^2.$$

Масса скелета (m_c), по всей видимости, пропорциональна: $m_c \sim r^2 L$, тогда величина g:

$$g \sim m^2_c / m L^4,$$

оказывается пропорциональной отношению массы скелета животного m_c к массе его тела (в квадрате) и обратно пропорциональной размеру животного (в кубе):

$$g \sim \alpha^2 / L^3, \quad \alpha = m_c / m, \; L \sim m.$$

Рассмотрим в качестве примера, два животных с одинаковыми линейными размерами: современного слона и его предка – мастодонта. Они имели одинаковую массу, но отличались друг от друга массой скелета, причем, как следует из книги Шмидта-Нильсона (1976), скелет мастодонта более громоздкий, чем у слона. Это свидетельствует в пользу того, что сила тяжести раньше была больше чем теперь.

Сравним полученный нами результат ($g \sim \alpha^2 / L^3$, откуда следует, $L \sim \alpha^{2/3} / g^{1/3}$), с прежней оценкой L ($L \sim g^3$, и $H \sim 1/g$), тогда оказывается, что $\alpha \sim g^5$, т.е. должна наблюдаться очень сильная зависимость относительного веса скелета от величины силы тяжести. Трудно допустить, что такая зависимость реально имеет место в живой природе.

Ф.П. Кренделев (1977), анализируя изменение силы тяжести в геологическом прошлом Земли, приходит к аналогичному выводу: "Уменьшение сил гравитации (ослабление гравитационного поля) приводит к уменьшению веса скелета и наоборот" (стр. 156). Он приводит таблицу, в которой относительный вес скелета человека составляет 12%, а у рептилий 14%, что, казалось бы, должно подтверждать сказанное нами выше. Однако Кренделев делает совершенно противоположный вывод, "что гравитационное поле в истории Земли медленно возрастало с момента зарождения позвоночных до современной эпохи" (Кренделев, 1977, стр. 154).

Таблица

#	Метод	Параметр	Зависимость от g
1	Релей-тейлоровская неустойчивость	длина волны λ	$\sim \lambda^{-1}$
2	Подъем диапира	время t	$\sim t^{-1}$
3	Конвекция в мантии	скорость v	$\sim v$
4	Сжатие глин	время t	$\sim t^{-1}$
5	Палеобарометрический. метод	расст. между сл. L	$\sim L^{-1}$
6	Движение ледника	скорость v	$\sim v^{-2}$
7	Углы наклона	углы α	$\sim \alpha$
8	Размер летающих животных	площадь крыльев S	$\sim S$
9	Метаболизм	размер L	$\sim L^{1/3}$
10	Относительная масса скелета	размер L	$\sim L^{1/3}$

Исследование глубины следов оставленных древними животными динозаврами так же дает некоторую информацию о величине силы тяжести в прошлом. Если удалось бы показать, что глубина окаменевших следов древних животных была больше чем таких же животных, обитавших на Земле в более поздние времена, то это свидетельствовало бы о том, что величина силы тяжести со временем убывает.

Стюарт считал, что Холмс первым (1947) предложил проводить целенаправленное изучение палеогравитационного поля. Холмс пытался в природе изменения величины g найти объяснение факту увеличения скорости седиментации и активизации земной коры начавшейся в кембрии. Он связывал изменение g с уменьшением величины G и вытекающие из этого превращения минералов при понижении давления в менее плотную форму. Наиболее вероятный механизм расширения, по мнению Холмса, это

конвективная циркуляция вещества в мантии. Холмс предложил три метода оценки величины *g*.

В первом, оценивалась глубина штрихов (борозд) под ледником, образующихся при его движении. Второй метод основывался на анализе количества фрагментов, выброшенных в геологическом прошлом из вулканов при их извержении. Третий метод оценки *g* основан на использовании информации об углах падения косой слоистости в осадках. Стюарт отдает предпочтение первому методу, считает весьма сомнительным второй и совершенно непригодным - третий.

Литература

Блинов В.Ф. Основные направления исследований расширяющейся Земли. В сб. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.

Веселов К.Е. Гравитационное поле и геологическое развитие Земли. Советская геология. 1976. N. 5. С. 70-80.

Веселов К.Е. Случайные совпадения или явления природы. Геофизический журнал. 1981. № 3. С. 50-61.

Веселов К.Е., Долицкая Т.В. Формирование земной коры континентов с позиций гипотезы расширения Земли. В сб. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.

Веселов К.Е., Карус Е.В., Савинский К.А., Долицкая Т.В. Физико-геологические основы концепции глобального рифтогенеза. М.: МГУ. 1993. 128 с.

Гиляров А.М. Универсальные закономерности использования пространства животными и растениями. Природа. 1999. №2.

Кренделев Ф.П. Изменение силы тяжести в геологическом прошлом Земли по результатам изучения химического состава костей позвоночных. Геология и геофизика. 1977. № 9. С. 154-157.

Кузнецов В.В. Гравитационное поле Земли в геологическом прошлом. Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 10. С. 98-107.

Милюков В.К. Изменяется ли гравитационная постоянная. Природа. 1978. № 6. С. 96-104.

Смирнов Л.С., Любина Ю.Н. О возможности изучения изменения силы тяжести с геологическим временем. ДАН СССР. 1969. Т.187, № 4. С. 874-877.

Шмидт-Нильсон К. Как работает организм животного М.: Мир. 1976. 140 с.

Brans C., Dicke R.H. Mach's principle and relativistic theory of gravitation. Phys. Rev. 1961. V. 124. N. 3. P. 925-935.

Carey S.W. The expanding Earth. Amsterdam: Elsevier. 1976. 488 p.

Dicke R.H. Implication for cosmology of steller and galactic evolution rates. Rev. Mod. Phys. 1962. V. 34. N. 1. P. 110-122.

Dirac P.A.M. Anew basis for cosmology. Pros. Roy. Soc. London A. 1938. V. 165. P. 199-206.

Flandren T.C. Determination of rate of change of G. Month. Notic. Roy. Astron. Soc. 1975. V. 170. N 2. P. 333.

Hilgenberg O. Vom wachsenden Erdball. B. 1933. 56 p.

Holmes A. Trans. geol. Soc. Glasg. 1947. V. 21. P. 117-152.

Holmes A. Principles of physical Geology. Nelson. London. 1965. 1260 p.

Jordan T.H. The deep structure of the continents. Sci.Amer. 1979. V. 240. N 1. P.70-82.

Kapp R.O. Towards a unified Cosmology. Hutchinson. London. 1960. 303 p.

Shapiro I.I., Counselman C.C., King R. Verification of the principle of equivalence for massive bodies. Phys. Rev. Lett. 1976. V. 36. N. 11. 555-558.

Stewart A.D. Palaeogravity in Palaeogeophysics (edit. by Rankorn, S.K) Academic Press, London. 1970.

Stewart A.D. Palaeogravity from the compaction of fine-grained sediments. Nature 1972. V. 235. P. 322.

Заключение

Цель этой книги состоит не только в том, чтобы дать читателю общее представление о состоянии науки, называемой «физика Земли», но и показать, как много вопросов в этой области знаний не находят решения, несмотря на огромное количество университетов и институтов, занимающихся этими проблемами в течение всего времени цивилизации на Земле.

В моих лекциях, посвященных актуальным вопросам физики Земли, прочитанных аспирантам университетов и опубликованных на сайте автора: http://www.vvkuz.ru/ сформулированы некоторые нерешенные задачи физики Земли в контексте модели горячей Земли. Решение их предполагает проведение теоретических и экспериментальных исследований, а также численного моделирования. Перечислим некоторые из задач:

1. *Моделирование выхода ударной волны (УВ) на поверхность. Двумерная модель «сильных движений» грунта в момент выхода УВ, условия «развала» УВ при подходе к поверхности (проблема защиты от землетрясения) и т.п.*
2. *Математическая модель акустического сверхизлучения. Физика генерации ударной волны в сплошной среде, как на реализации структурного фазового перехода, в том числе и на квантовых эффектах нелокальности в природных минералах.*
3. *Механизм самогравитации большого числа* ($>> 10^8$) *микрочастиц, вращение «облака» частиц, образование волн плотности при формировании звезды и планет, волны плотности и закон Боде, сгущение вещества на гребнях волн и т.п.*
4. *Модель образования месторождений металлов при охлаждении горячей Земли за счет гигантских флуктуаций плотности при достижении критических температур.*
5. *Устойчивость четырех долгоживущих вихрей Россби (одного циклона и трех антициклонов) в атмосфере с градиентом температуры: вихрей в атмосферах Юпитера и Сатурна и глобальных магнитных аномалий Земли.*
6. *Разработка модели аддитивного источника генерации геомагнитного поля и, на её основе, - модели дрейфа магнитных полюсов в настоящее время и в прошлом.*
7. *Моделирование конвекции во внешнем ядре при изменении (уменьшении) радиуса внутреннего ядра. Проверка гипотезы отсутствия упорядоченной конвекции при некоторых соотношениях радиусов оболочек.*
8. *Моделирование радиационной обстановки на Земле в момент смены полярности геомагнитного поля с учетом эффектов разрушения радиационных поясов.*
9. *Оценка предельных величин суперземлетрясений, супервулканов, суперураганов на Земле и супервспышек на Солнце - решение проблемы "cut-off" в геофизике и солнечно-земной физике. Разработка идей Тцаллиса о негиббсовской термодинамике в геофизическом приложении как способ решения проблемы.*
10. *Изменения климата и роль выбросов пыли в стратосферу при взрывах супервулканов, роль экскурсов геомагнитного поля и связанного с ними повышения радиационного фона. Взгляд на современное потепление через призму палеоданных.*
11. *Эволюция жизни, причина кембрийского взрыва, временная привязка генетических мутаций к экскурсам и географическая приуроченность их к Африке.*
12. *Природа атмосферного электрического поля (АЭП), причина унитарной вариации в АЭП и ионосфере. Связь АЭП с климатом. Форбуш- понижение в АЭП, проблема быстрого восстановления поля после его понижения.*

Очевидно, что круг задач намного шире…

Обсуждая материал по физике Земли, представленной в учебнике, мы пришли к выводу о том, что в современной науке практически нет общих законов, принципов и закономерностей, следующих из общей теории Земли. Некоторые ученые называют такую науку – геономией. Очевидно, что как науки, геономии ещё нет, то есть, нет такой

теории, и, естественно, нет и фактов, следующих из теории и подтвержденных наблюдениями и экспериментом. Зададимся вопросом: можно ли создать на базе новой модели горячей Земли теорию, или, по крайней мере, введение в теорию Земли, т.е., собственно, геономию? Для этого необходимо установить соответствие между очевидными фактами, касающимися параметров Земли, с одной стороны, и результатами, следующими из модели, - с другой. Сформулируем некоторые закономерности, возможно, даже законы или проекты законов, следующие из нашей модели, подтвержденные опытом наблюдений:

1. Образование планет и их спутников происходит одновременно и в едином механизме с рождением звезды. Начальная температура планеты (спутника) определяется его массой. В процессе образования вещество планеты (или его часть) находится в состоянии перегретого и переуплотненного пара. Эволюция планеты заключается в охлаждении нагретого вещества и превращении его из состояния пара в жидкость и жидкого – в твердое состояние путем реализации фазовых переходов (ФП) первого рода, конденсации и кристаллизации. Именно на этой стадии при критической температуре металлов формируются гигантские флуктуации их плотности – прообразы будущих месторождений полезных ископаемых.

2. Образование планет и спутников и их последующая эволюция проходят под действием принципа минимизации гравитационного потенциала. Применение этого принципа формально позволяет оценить величину «поверхностного натяжения» планеты и на этой основе, оценить величину поверхностной силы Лапласа. Наличие силы Лапласа приводит к движению земной коры и верхней мантии вдоль по градиенту высоты геоида. Относительные повышения и понижения высот геоида при этом уменьшаются.

3. Внутренняя энергия планеты и спутника обеспечивается функционированием двух экзотермических фазовых переходов (ФП): первый - на границе внутреннего ядра (конденсация - испарение), второй – на границе ядро-мантия (кристаллизация - плавление). Теплота первого ФП примерно в 20-30 раз выше, чем второго. Энергия ФП расходуется на создание теплового потока, дрейф континентов, образование океанов, генерацию магнитного поля, сейсмичность и вулканизм и т.п. Разность теплот ФП находит отражение в различии величин теплового потока Земли и Луны. Известно, что тепловой поток Луны меньше земного примерно в 30 раз.

4. Геомагнитное поле возникает за счет реализации переноса вещества в проводящей среде области фазового перехода на границе внутреннего ядра. В течение эволюции количество перегретого вещества внутреннего ядра уменьшается, и после того, как оно полностью конденсируется, Земля потеряет магнитное поле. Эта ситуация, похоже, уже произошла с Луной, Марсом и, возможно, с Венерой.

5. Плотность перегретого пара вещества Земли в момент её образования выше, чем плотность её вещества в конденсированном состоянии. Горячее вещество, охлаждаясь, становится менее плотным. Земля при этом - расширяется. ФП происходит с выделением скрытой теплоты, что ведет к локальному нагреву и смене направления ФП: испарению вместо конденсации и плавлению вместо кристаллизации. Эти явления обеспечивают Земле пульсирующий режим расширения, её магнитному полю – режим смены полярности, сейсмичности, вулканизму и геодинамике – смену режима спрединга на режим субдукции и т.д.

6. В цикле расширения материки за счет спрединга океанического дна расширяются. При этом изменяется форма геоида. В цикле сжатия (в настоящее время) Земля стремится минимизировать свою гравитационную энергию, уменьшая высоту геоида. Материки при этом движутся вдоль по градиенту геоида в направлении его нулевой высоты.

7. В процессе эволюции поверхность Земли постепенно остывает. В некоторые моменты активации геодинамических процессов, связанных с циклами расширения Земли, происходят извержения супервулканов, во время которых в стратосферу выбрасывается огромное количество пыли. Наступает т.н. вулканическая зима – оледенение. Оледенение прекращается после того, как стратосферная пыль выпадает на поверхность Земли либо естественным путем, либо с помощью космических лучей за счет их участия в образовании дополнительного количества водного аэрозоля. Усиление интенсивности космических лучей и увеличение естественного радиационного фона на Земле происходят в моменты переполюсовки (инверсии) геомагнитного поля, когда прекращается экранирующее действие поля. Увеличение фона приводит к мутациям и резким изменениям биологического разнообразия.

Хотелось бы надеяться, что успешное решение сформулированных выше задач позволит на поставленный вопрос ответить утвердительно.

Эпилог

(Цитируя: У. Кэрри, В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной, М.: Мир. 1991).

На протяжении тысячелетий здравый смысл говорил о том, что Земля плоская, пока Пифагор не распознал её тень на Луне; но его представление о сферической Земле отвергалось ещё целое столетие. В течение следующих 16 столетий ученые твердили, что Земля неподвижный центр мироздания, пока Коперник не низвел её просто до положения одного из спутников Солнца, причем и Солнце вскоре стало казаться ничем не выделяющимся среди миллиардов других солнц; но провидение Коперника было отвергнуто современными ему астрономами и богословами. Живые существа считались уникальными, неизменными созданиями, пока Дарвин не выдвинул идею эволюции, но эту идею до сих пор подвергают злобному осмеянию верные последователи буквального толкования библии. Формирование органических химических соединений считали возможным только посредством «жизненной силы» живых организмов, пока Фридрих Вёлер не синтезировал мочевину; но прошло ещё несколько десятилетий, прежде чем старое ложное представление было отброшено. Живое подобие Бога – человек, для которого создана вся Вселенная, только сейчас начинает осмысление себя как промежуточную вершину эволюционного процесса, который должен продолжать развиваться по ещё неизвестным путям на протяжении неисчислимых будущих эонов (Эон - в геологии, - длительный период времени, состоящий из нескольких эр). Ещё в текущем столетии аксиомой считалось неизменность относительного расположения материков, но Вегенер потряс мир, показав, что очертания этих материков удивительно точно совпадают. Однако он подвергся насмешкам и издевательствам, потому что физики настаивали на невозможности скольжения материковых плит по нижележащему субстрату. Когда американские океанологи не оставили сомнений относительно того, что все океаны расширяются с поразительно высокими скоростями, возражения физиков были

сметены потоком всеобщего признания тектоники плит. Но, оглядываясь назад, мы видим, что физики были правы. Материки не движутся по подстилающей мантии. Истина была скрыта – как от геологов, так и от физиков – ещё одной ложной догмой: безосновательным допущением, что радиус Земли неизменен. Рост океанов дает Земле возможность расширяться без перемещения материков относительно находящейся под ними мантии.

Избавились ли мы, наконец, от всех наших ложных аксиом? Конечно, нет. Сегодня нам надо набраться смелости и по примеру Пифагора, Аристотеля. Леонардо да Винчи, Ньютона, Дарвина, Вегенера и Эйнштейна освободить свой разум от ещё более ложных аксиом, унаследованных в нетронутом виде от нашего первобытного прошлого, - от того, что мы, якобы, хорошо «знаем», и считаем само собой разумеющимися, по сути, не задаваясь вопросом, верно ли это.

Во-первых, ортодоксы всегда считали, что Вселенная была создана со своим полным количеством материи, которое в дальнейшем оставалось постоянным. Считалось также, что вся материя, имеющаяся в современной Солнечной системе, присутствовала и в первоначальной газовой туманности, из которой зародилось Солнце и его спутники. Подобным же образом считалось само самим разумеющимся, что всё вещество Земли унаследовано от времен её первоначальной аккреции. Все эти родственные допущения неверны: материя создается непрерывно и самопроизвольно на всех уровнях.

Во-вторых, современная космология цепляется за миф о том, что время и пространство начали существовать несколько миллиардов лет назад, и что вещество 20 миллиардов звезд возникло из ничего при Большом Взрыве, и с того момента продолжает разлетаться во все стороны.

В-третьих, ортодоксальная догма учит, что полная масса-энергия Вселенной колоссально велика. В отличие от этого, Трайон и я, независимо друг от друга, пришли к выводу, что космос всегда был, есть и всегда будет нулевым. С философской точки зрения никакого иного решения нет: нулевой космос никогда не мог бы появиться.

В-четвертых, Эйнштейн выражал удивление по поводу того, что инертная и гравитационная массы оказываются в точности равными, хотя это, - и не следует ни из какого фундаментального соотношения. Он также вывел формулу, согласно которой масса равна энергии, деленной на квадрат скорости света (которую можно представить как безразмерную величину). Таким образом, масса и энергия относятся к одной категории понятий – по существу это дополняющие друг друга двойники, как две стороны медали, рождающиеся вместе и уничтожающиеся тоже вместе. Если ко Вселенной добавляется новая масса, то добавляется и потенциальная энергия, в точности равная её инертной массе, - наоборот.

В-пятых, законы Ньютона и Хаббла взаимно дополняют друг друга: один описывает наблюдаемое поведение Солнечной системы, другой – наблюдаемое поведение галактик. Соединенные в одном уравнении, они управляют динамикой всей Вселенной, автоматически делают ненужной космологическую постоянную Эйнштейна и определяют средний размер галактик.

Каждое из этих пяти положений убивает одну из ложных догм, которые с самого начала принимались на веру, и они становятся, таким образом, в один ряд с представлением о сферической Земле Пифагора, гелиоцентризмом Коперника, принципом эволюции Дарвина, учением о расхождении материков Вегенера.

Общий смысл всего этого долгого повествования – неоднократно повторяющиеся случаи сопротивления прогрессу со стороны наших убеждений – будь то религиозная доктрина, аристотелевские догмы эпохи Ренессанса или вето современного общества. Даже величайшие мыслители не могут избавиться от шор своей веры, своих убеждений. Вера – это наркоз, препятствующий познанию.

Чем радикальнее отход от существующих ортодоксальных представлений, тем более несомненно, что «ересь» будет осмеяна и отвергнута. Стремление оградить свой

престиж – уязвимое место великих людей, и даже такие реформаторы науки, как Вернер, Ньютон, Кельвин, Джеффрис, Бейли Уиллис, Гейлорд Симсон и Дж. Т. Уилсон, не преминули внести свою лепту в беспощадную травлю отвергаемых ими новых идей.

Дело не только в том, что новое поколение приходит слишком поздно. Слава выдающихся достижений науки, так изумляющих нас, будет тускнеть, и тускнеть всё сильнее в самых неожиданных местах, и каждый новый успех будет освещать новые, более далекие горизонты – и так *ad infinitum* (до бесконечности).

Но не ждите, что вас будут приветствовать, как героя, когда вы сделаете великое открытие. Скорее всего, к вам отнесутся с неприязнью и презрением – может быть, провалят на экзаменах. Ваши статистические выкладки, или ваши наблюдения, или ваше исследование литературы, или что-то другое, – наверняка покажутся явно несовершенными. Не сомневайтесь, что в наш просвещенный век действительно важные достижения отвергаются, и будут отвергаться чаще, чем получать одобрение. Не следует сомневаться и в том, что в нашей собственной профессиональной деятельности мы тоже будем отвергать с высокомерной категоричностью наиболее значительные идеи, когда они попадут на наш рабочий стол.

Должны ли мы в таком случае доверять каждому еретику и бунтарю с его наивностью, энтузиазмом или упрямством, с каким он бросает вызов существующему порядку вещей? Конечно, нет! В большинстве случаев еретические взгляды бывают ложными, однако в нагромождениях лжи скрываются жемчужины века. Чтобы найти их безошибочно в доктрине или в ереси, нужен более острый ум, чем когда бы то ни было до сих пор, - но это наша вечная и, очевидно, недостижимая цель.

Продолжая высказанную геологом Кэрри мысль относительно роли еретических взглядов и идей в науке, приведу принцип физика академика А.М. Будкера, выступления которого в руководимом им институте ядерной физики Сибирского отделения РАН я имел удовольствие неоднократно слышать, работая в течение 10 лет после окончания университета в этом институте. Будкер, обращаясь к молодежи, говорил:

«Если у Вас возникла принципиально новая идея, и созрело желание или необходимость начать её разработку, ни в коем случае не читайте книг и статей в журналах, – думайте сами. Если что-либо такое «придумалось», начинайте читать. Если то, что Вы придумали, написано в книгах или статьях, бросайте это дело – Вы безнадежно отстали. Если этого никто раньше не придумал, – действуйте! Однако знайте, что в 99 % случаев вы сочинили чушь, но существует тот один заветный процент, который может привести Вас к успеху. Но, для достижения его, Вам придется пройти долгий и сложный путь, который не будет усыпан розами. Совсем, наоборот, во время этого пути Вас будут «топтать и поливать грязью», травить, унижать и всячески противоборствовать. И чем новее и необычнее Ваша идея, тем противоборство будет только сильнее. Успех ждет только того, кто пройдет этот путь до конца».

Я придерживаюсь этого принципа более 40 лет работы в науке и все больше и больше убеждаюсь в его правоте, особенно в той его части, где говорится о травле, противоборстве и унижении…

В.В. Кузнецов

ФИЗИКА ЗЕМЛИ

Учебник
- монография.
Для физиков и геофизиков

Новосибирск, 2011

Приложение 1.
Квантовые эффекты в физике Земли.

Показано, что использование идеи многочастичной квантовой запутанности в науках, далеких от квантовой механики, в, частности в физике Земли, позволит решить некоторые актуальные проблемы, которые в настоящее время решения не имеют.

1. Введение

Мы живем в мире, о котором знаем ещё очень мало. В природной среде, живой и неживой природе, - происходят события, которые мы, с точки зрения классической физики, – объяснить не можем. Например, в чем состоит физика таких явлений как землетрясение, или шаровая молния? Какова физика вулканов, как они возникают, почему они встречаются на всех планетах и спутниках, почему на Ио (спутнике Юпитера) давно извергается супервулкан, и почему подобные вулканы были на Земле раньше, а сейчас - нет? Мы знаем, что многие процессы, происходящие в Природе, являются фликкер-шумом и подчиняются общим правилам самоорганизации, однако, физика этих явлений так и не известна. Здесь озвучена только ничтожная толика возникающих вопросов. Многие наблюдения природных, - да и социальных явлений – показывают, что они происходят, по не всегда понятной нам причине, – одновременно на огромных пространствах, или при громадном скоплении живых организмов, в том числе и людей. Такие явления, когда множество однотипных процессов происходят одновременно, - принято считать кооперативными. Природа кооперативности, несмотря на то, что это явление давно используется в науке, до сих пор так и не вскрыта.

Кооперативные явления в многочастичной системе связаны с когерентным (согласованным) взаимодействием большого числа частиц, иначе говоря, с развитыми многочастичными корреляциями. Простейший пример кооперативных явлений, это гидродинамические движения (звук, теплопроводность и т. п.). Причина таких движений состоит в локальных изменениях термодинамических характеристик (плотности, давления и т. д.), а также скорости и имеет достаточно большие пространственные и временные масштабы (необходимые для установления локального равновесия).

Кооперативные явления происходят как в равновесных физических системах, так и в системах различной природы (физических, химических, биологических и т. п.), находящихся вдали от термодинамического равновесия. Равновесные кооперативные явления можно разделить на две группы: критические явления, связанные с различными фазовыми переходами, и когерентные явления, связанные с установившейся макроскопической упорядоченностью. Вполне возможно, что в основе кооперативных явлений, явлений самоорганизации и физики фликкер-шума - положены принципы т.н. квантовой запутанности…

В современной физике в последние годы проблема квантовой запутанности стала широко обсуждаться в физических журналах в основном в связи с реализацией идеи построения квантового компьютера. Квантовая запутанность (нелокальность, сцепленность) основана на использовании принципа неопределенности Гейзенберга и неслучайности корреляций между двумя наблюдателями, производящими измерения над квантовыми состояниями, известной как парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР). Среда, при её запутанности (нелокальности) становится когерентной (кооперативной). Она может быть описана некой волновой функцией и, когда происходит редукция этой функции (декогеренция, смерть запутанности и т.п.), то этот процесс распространяется мгновенно независимо от величины объекта, вовлеченного в квантовую запутанность. (По мнению некоторых авторов, скорость редукции волновой функции не должна превышать скорость света, но для наших моделей из области физики Земли, о которых пойдет речь ниже, этот момент не столь принципиален). Приведем несколько примеров из этой области физики, которая в течение последних нескольких лет активно развивается как в

плане постановки экспериментов, так и в теоретическом плане, однако прежде мне хотелось бы остановиться на причине, по которой у меня возник очень серьезный интерес к квантовой многочастичной запутанности. Причем, именно к многочастичной квантовой запутанности (МКЗ), т.к. парадокс ЭПР, неравенства Белла (запутывание по пространству) и Леггетта-Гарда (запутывание по времени) имеют отношение к двум - трем запутанным квантовым частицам. Следует отметить, что традиционный гильбертов формализм квантовой теории утверждает, что в Природе существует неограниченный запас запутанных состояний любой сложности, а существование запутанных состояний многих квантовых частиц является экспериментально установленным фактом. Есть свидетельства в пользу того, что их использование в процессе компьютерного моделирования сложных систем в некоторых случаях способно принести заметный эффект.

2. Исходные предпосылки

Станислав Лем в своей известной книге «Сумма технологии» написал (с. 113), что на вопрос о «первопричине» науки Эйнштейн ответил забавно и метко: «Никто не почешется, если у него не зудит». Подобный «зуд» вызвал мой интерес к проблеме МКЗ. Работая в области физики Земли около 30 лет и занимаясь практически всеми её разделами, я столкнулся с ситуацией, как мне показалось, неразрешимой. Она возникла довольно давно, когда я начал решать проблему физики землетрясения. Именно в последнем случае у меня возник тот самый «зуд». Я довольно быстро сообразил, что механизмом, вызывающим на земле наблюдаемые свойства землетрясений (разрывы, колебания почвы, и т.п.) может быть только ударная волна (УВ). С физикой УВ я был знаком, и мне не представляло труда сопоставить явления, происходящие в эпицентре землетрясения с теми, которые соответствовали описанию физики выхода УВ на свободную поверхность твердого тела (Зельдович и Райзер, 1966, 11 глава). Однако возникала некоторая, неприятная для меня «нестыковка» при формировании ударной волны в литосфере.

Дело в том, что землетрясение обладает удивительным свойством. С одной стороны, землетрясение, по наблюдениям многих сейсмостанций, - ведет себя как движущийся снизу вверх «точечный» источник сейсмических волн. С другой стороны, область разрушений поверхности Земли, объём генерации сейсмических волн и возникновения афтершоков землетрясения говорят - об обратном. Именно о том, что очаг землетрясения занимает подчас огромное пространство. Например, размер очага землетрясения на Суматре (2004) составляет в поперечнике 1000 км. Характерное время фронта землетрясения порядка одной секунды и меньше. Как можно синхронизовать этот процесс, оставаясь в рамках механики сплошной среды, согласно которой скорость происходящих процессов не должна превышать скорость звука, которая для среды генерации землетрясения не превышает 10 км/с? В нашем случае она должна быть больше в 100 раз. Эта оценка совсем не открытие. Обратимся к самой серьезной книге по сейсмологии (Аки и Ричардс, Количественная сейсмология: теория и методы, 1983). Там написано, что источник землетрясения (его очаг) имеет двойное толкование: как точка и как объем, причем совсем не малый. Однако прежде чем приступать к конкретным примерам МКЗ в Природе, стоит обратить внимание на основные базовые источники этого подхода

3. Квантовомеханическая запутанность и телепортация.

Квантовая запутанность. Qquantum entanglement - одно из названий, среди таких как: соотношение неопределённостей, связанность, нелокальность и суперпозиция - квантовомеханическое явление, при котором квантовое состояние двух или большего количества объектов должно описываться во взаимосвязи друг с другом, даже если отдельные объекты разнесены в пространстве.

Связность - это одно из тех свойств квантовой теории, которое не признавал А. Эйнштейн и некоторые другие учёные. В 1935 Эйнштейн, Подольский и Розен сформулировали знаменитый ЭПР-парадокс, который показал, что из-за связности квантовая механика становится нелокальной теорией. Известно, как Эйнштейн высмеивал связность, называя его «кошмарным дальнодействием». Это было вполне естественно, т.к. нелокальная связность опровергала постулат теории относительности о предельной скорости света (передаче сигнала).

Парадокс Эйнштейна, Подольского и Розена (ЭПР). Суть ЭПР парадокса состоит в том, что, согласно соотношению неопределенностей, - мы не можем измерить одновременно координату частицы и её импульс. Причиной неопределённости является тот факт, что, производя измерение одной величины, - мы вносим принципиально неустранимые возмущения в её движение и искажаем значение другой величины. Однако можно было бы предложить гипотетический способ, которым соотношение неопределённостей можно обойти.

Допустим, две одинаковые частицы *A* и *B* образовались в результате распада третьей частицы *C*. В этом случае, по закону сохранения импульса, их суммарный импульс должен быть равен исходному импульсу третьей частицы, то есть, импульсы двух частиц должны быть связаны. Это даёт нам возможность измерить импульс одной частицы и по закону сохранения импульса рассчитать импульс второй, не внося в её движение никаких возмущений. Поэтому, измерив координату второй частицы, мы сумеем получить для этой частицы значения двух неизмеримых одновременно величин, что по законам квантовой механики невозможно. Таким образом, получается, что соотношение неопределённостей не является абсолютным, а законы квантовой механики являются неполными и должны быть в будущем уточнены.

Другой вариант парадокса связан с трактовкой «внезапного изменения» состояния частицы *B* как результата её взаимодействия с изменённой измерением частицей *A*, для чего при определённых условиях может потребоваться противоречащая основным принципам теории относительности передача сигнала со сверхсветовой скоростью.

Кот Шрёдингера. В статье Шрёдингера «Противоречивая ситуация в квантовой механике» (Schrödinger, 1935) обсуждался ЭПР парадокс. В закрытый ящик помещён кот. В ящике имеется механизм, содержащий радиоактивное ядро и ёмкость с ядовитым газом. Параметры эксперимента подобраны так, что вероятность того, что ядро распадется за 1 час, составляет 50 %. Если ядро распадается, оно приводит механизм в действие, он открывает ёмкость с газом, и кот умирает. Согласно квантовой механике, если над ядром не производится наблюдения, то его состояние описывается суперпозицией (смешением) двух состояний - распавшегося ядра и не распавшегося ядра. Следовательно, кот, сидящий в ящике, и жив, и мёртв одновременно. Если же ящик открыть, то экспериментатор обязан увидеть только какое-нибудь одно конкретное состояние — «ядро распалось, кот мёртв» или «ядро не распалось, кот жив». Заметим, что Шрёдингер в этой статье ввёл термин «запутанность» (entanglement).

Вопрос стоит так: *когда система перестаёт существовать как смешение двух состояний и выбирает одно конкретное?* Цель эксперимента — показать, что квантовая механика неполна без некоторых правил, которые указывают, при каких условиях происходит коллапс волновой функции и кот либо становится мёртвым, либо остаётся живым, но перестаёт быть смешением того и другого.

Вопреки расхожим представлениям, - сам Шрёдингер придумал этот опыт вовсе не потому, что он верил, будто «мёртво-живые» коты существуют; наоборот, он считал *квантовую механику неполной* и не до конца описывающей реальность в данном случае. Поскольку ясно, что кот обязательно должен быть либо живым, либо мёртвым (не

существует состояния, промежуточного между жизнью и смертью), то означает, что это верно и для атомного ядра. Оно обязано быть либо распавшимся, либо не распавшимся.

Рис. П1-1. Граница между миром квантовым и миром классическим - декогеренция. (Zurek, 2002).

В мире микроскопических объектов, описанных квантовой механикой, не всегда всё так просто, как в ситуации с котом Шрёдингера. Вообразите атом, который мог бы подвергнуться радиоактивному распаду в определённый промежуток времени. Или не мог бы. Мы можем ожидать, что у этого атома есть только два возможных состояния: "распад" и "не распад", но в квантовой механике у атома может быть некое объединённое состояние - "распада - не распада", то есть ни то, ни другое, а как бы – между ними. Вот это состояние и называется "суперпозицией".

Теорема Белла. В 1964 году Джон Белл, физик из Северной Ирландии получил новый и неожиданный для многих теоретический результат. Он доказал, что можно провести определенный эксперимент, результаты которого позволят определить, действительно ли квантово-механические объекты описываются волновыми функциями распределения вероятностей, как они есть, или же имеется скрытый параметр, позволяющий точно описать их положение и импульс, как у ньютоновского шарика. Теорема Белла, как ее теперь называют, показывает, что как при наличии в квантово-механической теории скрытого параметра, влияющего на *любую* физическую характеристику квантовой частицы, так и при отсутствии такового можно провести серийный эксперимент, статистические результаты которого подтвердят или опровергнут наличие скрытых параметров в квантово-механической теории.

Д. Белл показал, что можно однозначным образом решить вопрос, возможна ли теория *локальных скрытых параметров*, т.е. можно ли приписать отдельной квантовой частице такие свойства, которые при "измерении" проявлялись бы как значения (вообще говоря, некоммутируемых) величин.

Покажем здесь очень простенький вывод одной их форм неравенства Белла. Пусть имеется объект, характеризующийся тремя величинами: A, B и C, принимающими два значения, которые мы обозначим, как «+» и «–». Предположим, что этот объект может обладать этими тремя величинами одновременно (как свойствами).

Рассмотрим теперь набор (ансамбль) таких объектов. Обозначим через A^+ тот случай, когда свойство A для объекта из ансамбля имеет значение +, и аналогично для B, C

минуса. Через N обозначим число объектов, которые имеют соответствующий набор значений для нашей тройки свойств. То есть $N(A^+B^-C^-)$ обозначает число объектов в ансамбле, у которых A равно плюсу, а B и C – минусу. Соответственно, $N(A^+B^-)$ – число частиц, у которых A равно плюсу, B – минусу, C же произвольно (или плюс, или минус).
Очевидно, что: $N(A^+B^-) = N(A^+B^-C^+) + N(A^+B^-C^-)$
Аналогично: $N(B^-C^+) = N(B^-C^+A^+) + N(B^-C^+A^-)$
$N(A^+C^-) = N(A^+C^-B^+) + N(A^+C^-B^-)$

Сложив, получаем:

$$N(B^-C^+) + N(A^+C^-) = [N(B^-C^+A^+) + N(A^+C^-B^-)] + N(B^-C^+A^-) + N(A^+C^-B^+)$$

Ясно, что выражение в квадратных скобках равно $N(A^+B^-)$, таким образом, получаем:

$$N(A^+B^-) \le N(B^-C^+) + N(A^+C^-)$$

Это и есть одно из неравенств Белла.

Опыт, предлагаемый Беллом, оказался простым только на бумаге и поначалу казался практически невыполнимым. Эксперимент должен был выглядеть так: под внешним воздействием атом должен был синхронно испустить две частицы, например два фотона, причем в противоположных направлениях. После этого нужно было уловить эти частицы и инструментально определить направление спина каждой и сделать это тысячекратно, чтобы накопить достаточную статистику для подтверждения или опровержения существования скрытого параметра по теореме Белла (выражаясь языком математической статистики, нужно было рассчитать *коэффициенты корреляции*).

Самым неприятным сюрпризом для всех после публикации теоремы Белла как раз и стала необходимость проведения колоссальной серии опытов, которые в ту пору казались практически невыполнимыми, для получения статистически достоверной картины. Однако не прошло и десятилетия, как ученые-экспериментаторы не только разработали и построили необходимое оборудование, но и накопили достаточный массив данных для статистической обработки. Когда в начале 1970-х годов результаты экспериментов были обобщены, всё стало предельно ясно. Волновая функция распределения вероятностей совершенно безошибочно описывает движение частиц от источника к датчику. Следовательно, уравнения волновой квантовой механики не содержат скрытых переменных. Это единственный известный случай в истории науки, когда теоретик доказал *возможность* экспериментальной проверки гипотезы и дал обоснование *метода* такой проверки. Экспериментаторы титаническими усилиями провели сложный, дорогостоящий и затяжной эксперимент, который в итоге лишь подтвердил и без того господствующую теорию и даже не внес в нее ничего нового, в результате чего все почувствовали себя жестоко обманутыми в ожиданиях!

Однако не все труды пропали даром. Совсем недавно ученые и инженеры к немалому собственному удивлению нашли теореме Белла весьма достойное практическое применение. Две частицы, испускаемые источником на установке Белла, являются *когерентными* (имеют одинаковую волновую фазу), поскольку испускаются синхронно. И это их свойство теперь собираются использовать в криптографии для шифровки особо секретных сообщений, направляемых по двум раздельным каналам. При перехвате и попытке дешифровки сообщения по одному из каналов когерентность мгновенно нарушается (опять же в силу принципа неопределенности), и сообщение неизбежно и мгновенно самоуничтожается в момент нарушения связи между частицами.

А Эйнштейн, похоже, был неправ: Бог все-таки играет в кости со Вселенной. Возможно, Эйнштейну все-таки следовало прислушаться к совету своего старого друга и коллеги Нильса Бора, который, в очередной раз, услышав старый припев про «игру в кости», воскликнул: «Альберт, перестань же ты, наконец, указывать Богу, что ему делать!».

Телепортация. С квантовой нелокальностью и мгновенной передачей информации тесно связаны вопросы телепортации и обращения времени. В статье, опубликованной Ч. Беннеттом с соавторами (Bennett, et al), в самом заголовке употреблялся непривычный для физиков термин «телепортация» - «Телепортация неизвестных квантовых состояний через двойной, классический и ЭПР-канал». Эта работа считается отправной точкой современного прикладного этапа в развитии квантовой механики, в частности, теории запутанных состояний и квантовой теории информации.

К настоящему времени проведено очень много экспериментов по квантовой телепортации. Из последних работ в этой области можно упомянуть эксперимент группы А. Цайлингера (Ursin, et al.. 2004) по реализации квантовой телепортации через Дунай, то есть на довольно большом расстоянии (600 м). Суть экспериментов по телепортации несложная. Если описать ее упрощенно, она будет выглядеть так: допустим, у нас есть частица 1 и запутанная пара частиц 2–3 (типа ЭПР-пары). Объединяя частицы 1 и 2 (измеряя в белловском базисе), то есть, переводя пару 1–2 в максимально запутанное состояние типа того, которое было раньше у пары 2–3, состояние 3 становится таким, каким было раньше состояние 1, поскольку общее состояние трех частиц не меняется. Таким образом, частица 1 как бы телепортируется на место частицы 3, другими словами, частица 3 приобретает свойства частицы 1.

Сейчас проводятся все более сложные эксперименты по телепортации (Pan et al, 2000). Используется метод, который называется «телепортация запутанности», или «обмен запутанностью». Суть его в том, что две некоррелированные системы можно связать квантовым каналом связи (запутать между собой) при помощи дополнительной вспомогательной системы (ancilla), состоящей из запутанной пары. Когда эти коррелированные части анциллы передаются каждой из двух независимых систем, то последние становятся тоже запутанными, хотя раньше классически не взаимодействовали друг с другом.

Такой обмен квантовой запутанностью предполагается использовать при ее пересылке в определенное место. Если доступный канал передачи имеет ограниченное качество («зашумленность»), то при прохождении через него запутанных состояний корреляции нарушаются из-за декогеренции. В такой ситуации метод квантового повторителя позволяет разделить квантовый канал на короткие участки, которые очищаются известными методами дистилляции запутанности, а затем объединяются методами обмена запутанностью.

Обмен запутанностью может быть использован и для ряда других практических целей: для построения квантового коммутатора, для увеличения скорости распределения запутанных пар между удаленными пользователями, для построения запутанных состояний, охватывающих большое число частиц, и т. д. Сейчас предложено уже довольно большое количество различных схем применения этого метода.

4. Декогеренция.

Процесс квантовой декогеренции, возвращает объект (рис. 1) из квантового мира в мир классический. Воспользуемся подходом к декогеренции, развитым Войцехом Зуреком из Лос-Аламосской национальной лаборатории (Zurek, 2002). Он показывает, что специфический пример декогеренции - частица в точке x, взаимодействующая со скалярным полем φ (которое может рассматриваться как набор гармонических осцилляторов), что описывается Гамильтонианом

$$H_{int} = \epsilon x \, d\phi/dt.$$

В этом случае матрица плотности $\rho(x, x')$ частицы в заданной точке эволюционирует согласно основному уравнению:

$$\dot{\rho} = \overbrace{-\frac{i}{\hbar}[H,\rho]}^{\text{Von Neumann Equation}} - \overbrace{\gamma(x-x')\left(\frac{\partial}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x'}\right)\rho}^{\text{Relaxation}} - \overbrace{\frac{2m\gamma k_B T}{\hbar^2}(x-x')^2\rho}^{\text{Decoherence}},$$

$$\dot{p} = -FORCE = \nabla V \qquad \dot{p} = -\gamma p \qquad \text{Classical Phase Space}$$

где H - Гамильтониан частицы (независимый от потенциала $V(x)$, который учитывается членом $Hint$), γ – коэффициент релаксации, k_B – постоянная Больцмана, а T – температура поля. Это уравнение в первом приближении точно соответствует уравнению Шредингера для частицы в поле и поэтому отображает степени свободы поля.

Уравнение естественным образом разделяется на три слагаемых, каждое из которых отвечает за различный аспект эффективного поведения в классическом случае. Первое слагаемое - уравнение фон Неймана (которое может быть выведено из уравнения Шредингера) - порождает классическую обратимую эволюцию ожидаемого значения некоторой наблюдаемой, что имеет классический аналог для ρ (теорема Эренфеста). Второе слагаемое приводит к диссипации. Коэффициент релаксации $\gamma = \eta/2m$ пропорционален вязкости $\eta = \varepsilon^2/2$, вызванной взаимодействием со скалярным полем. Это взаимодействие уменьшает средний импульс и ведет к потере энергии. Последнее слагаемое также имеет классический аналог: оно ответственно за флуктуации, или случайные "толчки", приводящие к броуновскому движению.

Для наших целей влияние последнего слагаемого на квантовую суперпозицию представляет наибольший интерес. Оно разрушает квантовую когеренцию, удаляя недиагональные члены, отвечающие за квантовые корреляции между пространственно разделенными частями волнового пакета. Следовательно, оно ответственно за классическую структуру фазового пространства, поскольку оно преобразует суперпозиции в смеси локализованных волновых пакетов и, в классическом пределе – в хорошо знакомые точки фазового пространства.

Привычные представления о квантовых процессах в веществе обязывают его находиться при нулевых Кельвинах. Сегодня доказано теоретически (Богданов и др., 2007) и подтверждено экспериментально (Dür, Cirac, 2001), что квантовые процессы, в частности и квантовая запутанность, происходят при комнатной и более высокой температуре.

Физика возникновения в среде многочастичной квантовой запутанности (МКЗ) сегодня практически не известна. В ряде экспериментов эффект достигается, например, при облучении вещества излучением лазера, в других случаях использовался ускоритель заряженных частиц, облучение электромагнитными волнами и т.п.

Корни МКЗ исходят из известного уравнения Гейзенберга и принципа нелокальности, парадокса Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПР), «кота Шредингера», неравенств Белла и экспериментов Аспекта. Наиболее известный «продукт» МКЗ – это лазер, менее известны пучок квантовозапутанных атомов водорода в мазере и, вообще, квантовая оптика. Сформировалась как наука квантовая химия. В последние годы идеи МКЗ усиленно развивались в биологии, в частности, удалось показать, что устойчивость ДНК обязана квантовым процессам. В стадии становления находится квантовая биология. На очереди внедрение МКЗ в физику Земли. В этой науке очень много явлений, необъяснимых с точки зрения классической физики. Перечислим такие явления как землетрясения (Leibfried et al., 2005), вулканы, торнадо, алмазные трубки взрыва и т.п. В их числе находится, естественно, и шаровая молния. Вполне возможно, что решение этих проблем позволит придать особый статус такой науке как «квантовая физика Земли». Вероятнее всего, теорию этих явлений удастся создать лишь после того, как будет сформулирована теория МКЗ, квантовой телепортации и декогеренции. Ситуация не

безнадежна, т.к. без решения этих проблем, невозможно создание квантового компьютера, а научное сообщество решит эту проблему непременно.

5. Эксперименты с квантовой запутанностью. Состояние квантовой запутанности, предсказанное в 1964 году Беллом (Aspect, 2002), долгое время считалось базисом, на котором были построены все последующие эксперименты квантовой физики. Классической физической системе из двух и более объектов не свойственно полное разрушение связей – сумма сил взаимодействия между элементами системы всегда стремиться к нулю, но никогда его не достигает. Разрушение (рекомбинация) запутанности (квантовая смерть) не подчиняется этим правилам – она моментально прекращает взаимодействие сил запутанности, бесповоротно разрушая связь между квантами. В квантовой механике подобное явление описывается т.н. редукцией волновой функции.

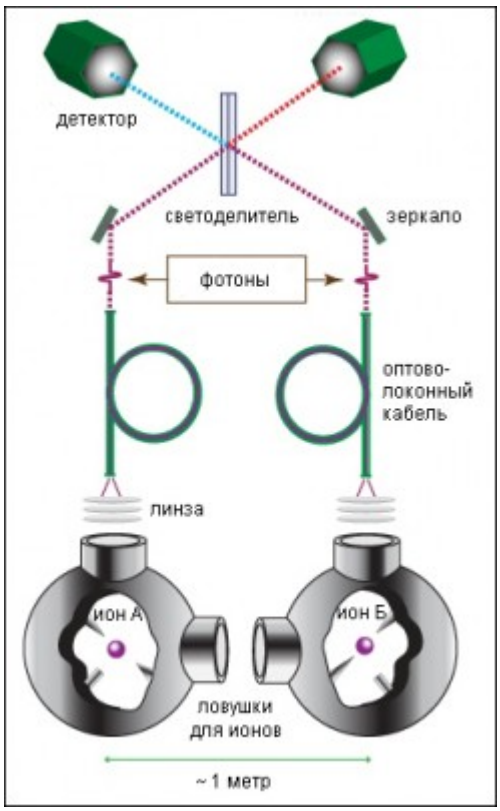


Рис. П1-2. Эксперимент по телепортации фотонов (Moehring, et al., 2007).

На практике эффект внезапной смерти квантовой запутанности возникает при взаимодействии как минимум двух источников «электромагнитного шума» в окружающей среде. Каждый из источников по отдельности вызывает возмущения в запутанности квантов, но два сразу могут привести к незамедлительному запуску «квантовой смерти». В настоящее время, не известно – какие сочетания «шумов» могут оказывать подобное влияние. Так как не существует способов нейтрализовать влияние «шумов», поскольку даже в абсолютном вакууме существуют энергетические вибрации. Подробное изучение «квантовой смерти» позволит находить способы борьбы с ней и, например, создавать столь сложные системы, как квантовый компьютер.

Ученым из Университета Мэриленда (США) удалось осуществить перемещение квантовой информации между двумя атомами, расположенными в метре друг от друга, причем показатель надежности доставки превысил 90 процентов (Moehring, et al., 2007).

Физическую реализуемость квантовой телепортации обеспечивает свойство квантовой запутанности, выражающееся в том, что состояния (а следовательно, и некоторые физические свойства) двух связанных объектов - даже разнесенных в пространстве - оказываются взаимозависимыми. В эксперименте американских ученых связанными оказались два иона иттербия, помещенные в вакуумные ловушки и окруженные металлическими электродами (см. рис. П1-2). Непосредственно перед проведением опыта исследователи определили два основных состояния ионов, которые использовались в качестве элементов хранения квантовой информации – кубитов.

В начале эксперимента ионы (назовем их А и Б) находились в одном из основных состояний. Затем на ион А направлялось микроволновое излучение, испускаемое одним из электродов, в результате кубит оказывался в некоторой суперпозиции своих собственных состояний (происходила запись информации для передачи). Сразу после этого оба иона возбуждались лазерным импульсом пикосекундной длительности. Возврат в одно из основных состояний — «значений» кубита - проходил с испусканием фотонов, «цвет» которых (красный или синий), соответствовавший разным длинам волн, однозначно определял конкретное значение. Затем фотоны с помощью линз направлялись по оптоволоконному кабелю к светоделительному элементу. При попадании на него каждая частица могла либо отразиться, либо пройти напрямую (вероятности этих событий одинаковы). По обеим сторонам светоделителя располагались детекторы.

До попадания на светоделитель каждый из фотонов находился в неизвестной суперпозиции состояний, однако в детекторе могли быть зарегистрированы уже только четыре различных вида частиц, соответствующих цветовым комбинациям «синий-синий», «синий-красный», «красный-синий» и «красный-красный», и лишь в одном из указанных вариантов фотоны одновременно достигают обоих детекторов. В этом случае определить, какому иону «принадлежит» данный квант света, становится невозможно (не хватает информации о том, отразился фотон от светоделителя или прошел насквозь). Такая неопределенность и сигнализирует о том, что квантовые состояния ионов оказались связаны.

Достигнув этого результата, ученые определили состояние иона А. В полном соответствии с законами квантовой механики, измерение вывело его из суперпозиции в некоторое определенное состояние, причем ион Б при этом принял противоположное «значение». Зная выходное состояние кубита А, исследователи установили параметры микроволнового импульса, при воздействии которым на кубит Б из него извлекалась информация, записанная на первой стадии эксперимента. На этом процесс телепортации завершился.

Заметим, что исходное состояние иона А в процессе передачи разрушается; именно это отличает данный процесс от копирования («клонрования») и позволяет применять термин «телепортация».

Приведем ещё пример. Датским ученым удалось связать частицы газов, расположенные на значительном расстоянии друг от друга, передавая информацию от одной к другой при помощи лазера. Между двумя облаками газа была достигнута так называемая "квантовая связь": удалось связать около миллиона атомов цезия, а предыдущим рекордом были всего четыре. По завершении исследований, когда будет получен определенный набор элементарных частиц, станет возможным воспроизводить набор таких же на расстоянии.

В декабре 1997 "Nature" опубликовал информацию о том, что двум группам физиков из Австрии и Италии, независимо друг от друга (и по разным методикам),

удалось экспериментально подтвердить существование явления квантовой телепортации. Группа австрийских физиков под руководством А. Цайлингера наблюдала телепортацию квантового состояния на примере фотонов света. Позже появились сообщения об эксперименте по телепортации фотонов в Италии. Результаты ещё одного эксперимента, показывающие наличие связи между состояниями фотонов на гигантских (в масштабах микромира) расстояниях - более 10 км - опубликованы швейцарскими учёными летом 2001 этого года в журнале "Physical Review A". Эффект квантовой телепортации сейчас в центре внимания физиков, он регулярно затрагивается в специальных журналах - "Nature", "Scientific American". Телепортация была включена в темы докладов на прошедшей в Москве XVI международной конференции "Когерентная и нелинейная оптика".

Следует отметить, что термин "телепортация" применительно к описанным экспериментам не совсем правилен. По существу, речь идёт о мгновенной передаче информации о состоянии частиц без посредства материального носителя. При этом никакой материальный объект, естественно, не переносится мгновенно. Вместе с тем, в квантовом мире устроено так, что если две частицы обладают одинаковыми свойствами, то это действительно абсолютно тождественные частицы и если параметры одной частицы были переданы другой, то она становится точной копией первой, именно такой, какая получилась бы при "настоящей" телепортации. Если чисто гипотетически на основе явления квантовой телепортации нужно было бы осуществлять телепортацию макрообъектов, то выглядело бы это следующим образом: в месте "нуль-передачи" сканируются характеристики всех микрочастиц объекта, информация передаётся в пункт "нуль-приёмника", передаваемый объект разрушается (становится грудой атомов), а принятый объект становится точной копией исходного объекта. Достаточное количество атомов, естественно, должно быть приготовлено заранее в пункте приёма. Эта схема очень хорошо описана в романе писателя-фантаста Клиффорда Саймака "Пересадочная станция".

Опыты, проведённые учёными Орхусского Университета (Дания) в конце сентября 2001 года, доказали практическую возможность такой телепортации. Экспериментаторы добились квантовой связи между двумя облаками охлаждённых почти до абсолютного нуля паров цезия, расположенными на значительном расстоянии друг от друга. Датчанам удалось связать около миллиона атомов цезия, правда, на очень короткое время, на доли миллисекунды. Связь должна приводить к взаимному влиянию облаков пара. По версии экспериментаторов, воздействие на оригинал влечёт аналогичное изменение параметров копии. Исследователи планируют изучение свойств полученного канала с целью реализации в будущем возможности передачи копий структур из атомов. Удачный эксперимент, поставленный в марте 2009 в Калифорнийском университете, показал, что квантовые состояния можно передать на расстояние до 1000 километров за 7,2 микросекунды (!).

6. Многочастичная квантовая запутанность (МКЗ)

http://issp.ras.ru/Control/Inform/perst/2006/6_01_02/perst.htm

В настоящее время большое внимание уделяется разработке методов генерации запутанных состояний и манипуляции ими с целью практического использования запутанности. Даже если запутанные частицы “физически” не взаимодействуют друг с другом, они не являются независимыми друг от друга и описываются общей волновой функцией. Однако экспериментальная реализация запутанных состояний и исследования их свойств - становятся все более и более сложными по мере увеличения числа частиц N в системе. Основная трудность здесь заключается в манипулировании и регистрации состояний отдельных частиц в запутанном многочастичном ансамбле, а также в контроле межчастичных взаимодействий. Максимум, что удалось достичь к настоящему времени – это перепутать $N = 4$ иона (Sackett et al., 2000) и $N = 5$ фотонов (Zhao et al., 2004). Среди

различных типов запутанных многочастичных состояний два представляют особый интерес: так называемые “W-состояние” |W⟩ и “состояние шредингеровского кота” |Cat⟩. Если каждая частица может находиться в двух базисных состояниях, |S⟩ и |D⟩, то |W⟩ = (|DD … DDS⟩ + |DD … DSD⟩ + … +|SD … DDD⟩)/$N^{1/2}$ и |Cat⟩ = (|DD … DD⟩ + |SS … SS⟩)/$2^{1/2}$. W-состояния отличаются высокой устойчивостью и “выживают” даже при потере одной или нескольких частиц. Они рассматриваются в качестве основного ресурса для систем обработки квантовой информации и квантовой связи. Состояния |Cat⟩ – суперпозиции двух “максимально различающихся” состояний системы – могут оказаться полезными не только при квантовых вычислениях, но и, например, в интерферометрии – для увеличения отношения сигнал/шум. Они также играют большую роль в различных тестах по проверке квантовой механики.

В работе (Häffner et al., 2005) австрийской группы сообщается об успешном конструировании W-состояний из $N = 4, 5, 6, 7$ и 8 ионов $^{40}Ca^{+}$ в магнитной ловушке. Роль базисных состояний |S⟩ и |D⟩ играли основное ($S_{1/2}$) и метастабильное возбужденное ($D_{5.2}$, время жизни ≈ 1 с) состояния каждого иона. Индивидуальная адресация ионных кубитов осуществлялась путем индуцирования квадрупольных переходов |S⟩ ↔ |D⟩ сфокусированным лазерным пучком с $\lambda = 729$ нм. После приготовления (за время ≈ 1мс) W-состояния определение его характеристик проводилось с использованием селективной флюоресценции. При всех $N = 4 \div 8$ матрица плотности разлагалась по базису наблюдаемых, после чего измерялись соответствующие ожидаемые величины. Всего было использовано 3^N различных базисов, и для каждого из них выполнено не менее 100 измерений. После набора большой статистики (например, при $N = 8$ полное число измерений превысило 656 тысяч за время ≈ 10 часов) были реконструированы матрицы плотности W-состояний (см. рис.1). Точность их определения (fidelity) составила F =0.85, 0.76, 0.79, 0.76 и 0.72 для $N = 4, 5, 6, 7$ и 8 соответственно. Запутанный характер приготовленных в [9] W-состояний подтверждается, в том числе, запутанностью всех возможных редуцированных двухчастичных матриц плотности. Существенно, что причины некоторого отклонения от “идеальной запутанности” не являются фундаментальными, а носят чисто технический характер и в принципе могут быть преодолены.

Практически одновременно с работой (Häffner et al., 2005) сотрудники Национального института стандартов и технологии (Боулдер, США) сообщили о создании состояний |Cat⟩ из $N \le 6$ атомных кубитов с базисом из сверхтонких уровней ионов $^{9}Be^{+}$ в магнитной ловушке ((Leibfried et al., 2005). Для генерации этих состояний использовали соответствующие последовательности лазерных импульсов, а для доказательства их когерентного характера – эффект флюоресценции после “декодировки” путем специальной операции, зависящей от фазы. Величина F оказалась достаточно низкой (0.76, 0.60 и 0.51 для $N = 4, 5$ и 6 соответственно). Это связано с тем, что состояния |Cat⟩ гораздо сильнее подвержены декогеренции, чем W-состояния. Основной причиной декогеренции является спонтанная эмиссия. Зато состояния |Cat⟩ могут быть использованы для приготовления белловских состояний любой пары кубитов, что делает их незаменимыми в квантовой криптографии.

Авторы работ (Häffner et al., 2005; Leibfriedet al., 2005) подчеркивают, что использованные ими методики в принципе могут быть расширены на системы из гораздо большего числа кубитов.

Можно ли говорить о том, что, разобравшись в физике запутывания двух-трех атомов, можно считать, что мы понимаем физику МКЗ? На этот вопрос в (Чернявский, 2009) получен однозначный ответ. В этой работе рассматривается вопрос о невозможности полного описания квантовой запутанности системы многих частиц лишь при помощи двухчастичной запутанности ее подсистем. Приводится численный механизм подбора контрпримера и его результаты. Также показано, что мера запутанности чистых

состояний, основанная на минимизации энтропии измерений, является существенно многочастичной, т.е. не может быть выражена через коэффициенты Шмидта.

Возможна ли МКЗ в Природе? Как известно, сейсмически активные регионы, как правило, оказываются и зонами активного вулканизма. Очевидно, что причина этих «родственных» явление – одна. Это особенности геодинамики зон сейсмичности и вулканизма. Зададимся вопросом: существует ли взаимосвязь между ними, отражающая общность генезиса? Как мы отмечали, одной из возможных причин ударно-волнового механизма землетрясения является одномоментное изменение структуры, например, связанное с изменением длины водородных связей или их разрушением. Что произойдет, если этот процесс будет недостаточно быстрым для возникновения УВ? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к физике водородных связей.

Водородная связь - особый вид связи, возникающий за счет того, что атом водорода, связанный с сильно электроотрицательным элементом (азотом, кислородом, фтором и др.), испытывает недостаток электронов и поэтому способен взаимодействовать с неподеленной парой электронов другого электроотрицательного атома этой же или другой молекулы. Водородная связь - разновидность не валентного взаимодействия между атомом водорода Н, ковалентно связанным с атомом А группы А-Н молекулы RA-H и электроотрицательным атомом В другой молекулы. Наличие водородных связей и их кооперативные свойства, в частности, в воде приводит к тому, что её свойства изменяются в зависимости от количества водородных связей. Так, например, во льду водородных связей много, их количество уменьшается по мере того, как лед тает. В талой воде водородных связей – меньше, ещё меньше их в нагретой воде и практически нет – в воде кипящей. Если бы вода полностью лишилась возможности образовывать водородные связи, то превратилась бы в пар, конденсирующийся в жидкость при - 100 °С. Водородные связи присутствуют не только в воде, но и в литосфере, определяя её особые свойства. Если по какой-то причине водородные связи в литосфере начнут быстро и одновременно рваться, то возникнет ударная волна. Если этот процесс происходить так быстро не может, то это приведет к тому, что произойдет изменение термодинамических свойств литосферы – изменится её температура плавления. Она может оказаться ниже, чем местная температура литосферы и объем среды с МКЗ, в котором произошло разрушение водородных связей, - расплавится с образованием магматического очага, – образуется вулкан.

Примеров, когда правдоподобное объяснение в рамках классической физики найти невозможно, можно привести множество, причем, как в неживой, так и в живой природе. Обратим внимание, например, на поведение косяка мелких рыбешек или мелких птиц перед отлетом их на юг. Птицы и рыбы ведут себя как единый механизм с четкими границами. Действия их настолько синхронны, что любая оценка синхронизма за счет акустического, визуального или любого другого сенсорного канала оказывается неудовлетворительной. Ещё один пример, теперь из области социологии. Всем хорошо известно поведение толпы молодых людей на концерте популярного ансамбля или артиста. Участники такого действа неоднократно рассказывали, что каждый из них попадает «в раж» и перестает ощущать себя как индивид. На них действует какая-то сила, объяснения которой пока нет. Может быть, во всех этих случаях мы сталкиваемся с МКЗ?

В химии и биологии неоднократно предпринимались попытки применить методы квантовой механики для объяснения хорошо известных и изученных феноменов. Причем, если в химии эти попытки были убедительно обоснованы (Kandrashkin, 1998) , то в биологии - ситуация не столь однозначна (Wiseman, Eisert , ArXiv) . В этой работе авторы четко очерчивают предмет критики. Конечно, полагают они, квантовые эффекты в молекулярной биологии важны - это и динамика возбуждения биомолекул, туннелирование протонов и электронов и т.д. Однако авторы утверждают, что они не

видят никаких предпосылок для *более нетривиальных квантовых проявлений* в живых системах.

Надо сказать, что в настоящее время среди специалистов по квантовой механике принято считать, что возможность существования квантовомеханических запутанных состояний объектов, разнесенных на макроскопические расстояния, - в принципе возможна. Однако такая макроскопическая когерентность может быть реализована лишь при тщательной экранировке этих объектов от внешних шумов, которые эту когерентность разрушают. Подобная экранировка в Природе (например, понижение температуры до миликельвинов) представляется совершенно нереалистичной.

7. Что известно о МКЗ, теория и эксперименты

В работе (Богдпанов и др., 2007) рассмотрена физическая модель, в которой реализуются запутанные ЭПР состояния из r механических осцилляторов, прикрепленных к перегородке массой mо. В силу конечности этой массы, осцилляторы оказываются связанными между собой. К системе с внешней стороны прикреплен ещё один $(r + 1)$ –ый осциллятор, который служит измерителем для системы в целом. Когда измеряется выделенная $(r + 1)$ –я частица и она оказывается в основном состоянии, то, не проводя дальнейших измерений, можно сделать вывод, что и остальные частицы будут находиться в основном состоянии (рис. 3).

Авторы вводят r действительных параметров $f_1, f_2,\ldots f_r$. В каждой точке внутри системы в виде гипершара единичного радиуса $(f^2_1 + f^2_2 + \ldots + f^2_r < 1)$ - сопоставляется некоторое квантовое состояние. Пусть $(r + 1)$-я частица оказалась в состоянии n. Вероятность этого события:

$$P_n = (1 - f^2)(f^2)^n.$$

Полученные вероятности P_n удовлетворяют условию нормировки: $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$.

Вероятности P_n образуют геометрическую прогрессию аналогичную состоянию теплового равновесия гармонического осциллятора. Соответствующая эффективная температура находится из условия: $\exp(-\hbar\omega/\theta) = f^2$. Из этого равенства получается выражение для температуры: $\theta = -\hbar\omega/\ln(f^2)$.

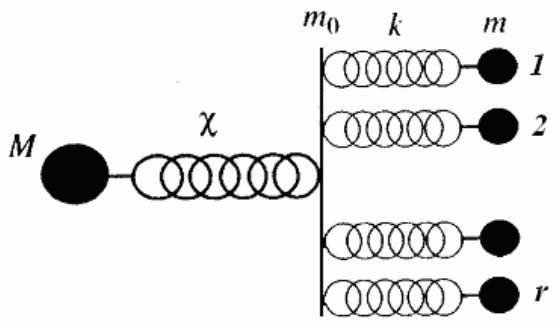


Рис. П1-3. Система осцилляторов, связанных друг с другом посредством перегородки; k,m – жесткость и масса осцилляторов с номерами $j = 1, 2, \ldots, r$, χ, M – жесткость и масса $(r+1)$–го осциллятора, mо –масса перегородки (Богданов и др., 2007).

В работе показано, что термодинамическое равновесие может рассматриваться как следствие квантового запутывания системы. Авторы, для описания термодинамических распределений, - не вводят никакого другого статистического механизма, кроме механизма, изначально имеющегося в постулатах квантовой механики. Таким образом, была разработана и исследована физическая многочастичная квантовая модель, в которой запутанность возникает благодаря связи частиц-осцилляторов с единым посредником (перегородкой, стенкой и т.п.). Предложенная модель позволяет вскрыть природу и

механизм возникновения равновесных квантовых распределений. Возникающая в системе температура определяется отношением массы системы частиц к массе связанной с ними перегородки. Таким образом, впервые температура вводится не как феноменологическое свойство, а как физический параметр системы, поддающийся явному расчету.
Приведем ещё несколько примеров. В работе (Dür; Cirac, 2001) выполнен теоретический анализ двух экспериментов по МКЗ состояний 3 (4) частиц. Обсуждается проблема активизации запутанности. В работе (Neumann., et al., 2008) авторам впервые удалось добиться переноса квантовых состояний частиц в твердотельном материале (алмазе). Они показали, что возможно получить квантовую запутанность двух или трёх частиц в кристаллической решётке. По мнению многих специалистов, получение устойчивого эффекта "телепортации" позволит в будущем создать работоспособную модель квантового компьютера. Опыты по установлению и удержанию дистанционной корреляции между наблюдаемыми физическими свойствами объектов проводятся не первый год. Учёные уже "связывали" несколько отдельных атомов, например восемь ионов кальция, или группу фотонов. Спутать же частицы в твердотельных системах, которые теоретически обеспечат квантовому состоянию бóльшую устойчивость, до сих пор ни у кого не получалось.

По-видимому, самым удивительным результатом, в плане изучения эффектов МКЗ можно считать эксперимент (Desbrandes, Van Gent, 2006), выполненный с пространственно-разделенными запутанными TLD-кристаллами, предназначенными для термолюминисцентной дозиметрии, находящимися в Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция) на расстоянии 8182 км. Образцы из легированного фторида лития были облучены тормозным излучением одновременно и совместно (в одном месте) с целью создания запутанных ловушек в смежных TLD-чипах на медицинском ускорителе. Один из этих чипов был отправлен в Батон-Руж, а его запутанный партнер остался в Живарлэ. Подогрев образца, находящегося в Батон-Руж, производился в соответствии с температурой другого (запутанного с первым) образца, которая измерялась фотоумножителем в Живарлэ и была равна температуре окружающей среды. Были получены коррелированные сигналы при нарастании, а затем убывании (вследствие отключения подогревающего устройства в Батон-Руж) температуры. Момент, когда в Батон-Руж достигнут максимум температуры TLD, точно соответствовал моменту максимума корреляции сигнала фотоэлектронного умножителя, записанного в Живарлэ (рис. П1-4). Этот эксперимент выходит за рамки обычных представлений. Авторы ((Desbrandes, Van Gent, 2006) осознавая это, предлагают повторить его в других условиях.

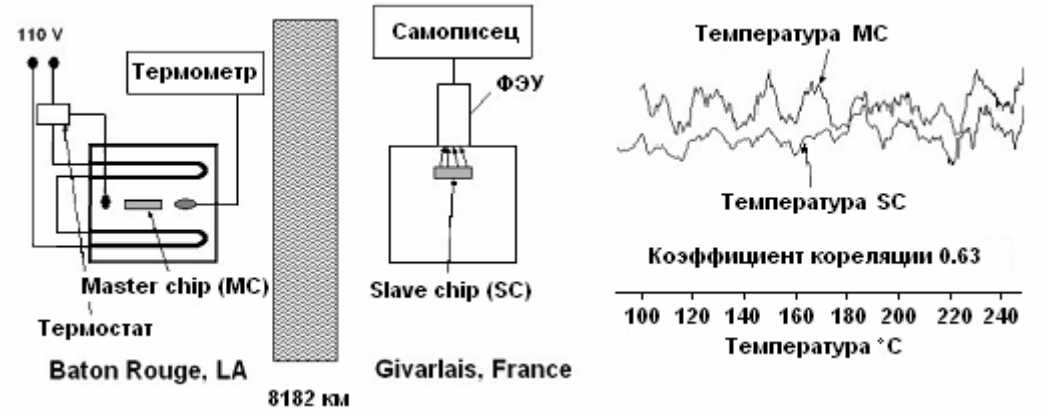


Рис. П1- 4. Слева: трансконтинентальный эксперимент между Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция). Справа: Вверху – температура чипа H1, LiF100 подогреваемого в Батон-Руж. Внизу – сигнал от вспомогательного образца в Живарлэ (Desbrandes, Van Gent, 2006).

Полагаю, что такое повторение крайне необходимо для дальнейшего понимания физики дальнодействия многочастичного квантового запутывания. Получение подобных результатов другими исследователями и их осмысление, возможно, позволит приблизиться к решению этой важной в практическом плане проблемы.

Принято считать, что квантовая запутанность как двух-трех, так и многих, может проявляться только при температуре в доли Кельвина. Некоторые работы, выполненные в самые последние годы, опровергают это мнение (Souza, et al., 2008; Souza, et al., 2009). В этих работах приведены результаты измерений термальной запутанности в кластеризованной спиновой системе, сформировавшейся в компаунде $Na_2Cu_5Si_4O_{14}$. В качестве объекта запутанности исследовалось магнитная восприимчивость. Двухчастичная запутанность наблюдалась при температуре ниже 200 К., трехчастичная запутанность наблюдалась при температуре ниже 240 К. Авторы (Souza, et al., 2008) изучали теорию эволюции запутанности как функции поля и температуры. В работе (Souza, et al., 2009) предъявлены свидетельства, указывающие на возникновение квантовой запутанности в кристаллах $Na_2Cu_5Si_4O_{14}$. Наличие запутанности исследовалось по величине магнитной восприимчивости. Двухчастичная запутанность наблюдалась при температуре Te ниже 200 К., трехчастичная запутанность - при температуре Te ниже 240 К. В работе (Souza, et al., 2009) квантовая запутанность в карбоксилате меди $[Cu_2(O_2CH)_4][Cu(O_2CH)_2$ (2-methylpyridine$)_2]$ была получена при Te ~ 630 К.

В работе (Алдошин и др., 2008) показано, что измерения магнитной восприимчивости поликристаллических образцов биядерных нитрозильных комплексов железа (НКЖ) $[Fe_2(C_3H_3N_2S)_2(NO)_4]$ (I) и $[Fe_2(SC_3H_5N_2)_2(NO)_4]$ (II) свидетельствуют о существовании в этих соединениях квантово-механической запутанности спиновых степеней свободы. НКЖ существуют в живых клетках и участвуют в метаболических и физиологических процессах, происходящих в биологических системах и организмах, включая человека.

Зависимость величины (меры) запутанности (E) от температуры (T) получена при использовании формулы Вуттерса (Wootters, Zurek, 1982):

$$C = 2 \max \{|w| - \sqrt{uv}\,, 0\},$$

где $E \sim \sqrt{1-C^2}$, C – согласованность, а w, u, и v – элементы матрицы плотности ρ:

$$\rho = \begin{pmatrix} u & & & \\ & x_1 & w & \\ & w^* & x_2 & \\ & & & v \end{pmatrix}.$$

Согласованность $C(T) \sim T$ при $T < T$e и $C(T) = 0$ при $T \geq T$e, где Te – критическая температура запутанности. Для комплекса I: Te ≈ 80-90 K, а для комплекса II: Te ≈ 110-120 K

Высокая температура Te парамагнитных материалов является их существенным преимуществом по сравнению с веществами с ядерными спинами, где запутанность может возникать лишь при десятых долях микрокельвина.

В подсистеме спиновых степеней свободы вещества используется понятие спиновая температура (Ts) - термодинамическая величина, характеризующая состояние внутреннего квазиравновесия. Величина Ts определяет вероятность W_i нахождения системы частиц, обладающих спином, в стационарном состоянии с энергией E_i:

$$W_i = Z^{-1} \exp(-E_i / kT_s),$$

где Z - статистическая сумма. Это соотношение аналогично обычному *каноническому распределению Гиббса,* однако E_i - лишь часть полной энергии системы, зависящая от спиновых переменных. Предполагается, что локальное внутреннее равновесие в спиновой

подсистеме (квазиравновесие) устанавливается гораздо быстрее, чем равновесие между спиновой подсистемой и остальными степенями свободы (истинное равновесие с темпрой T_o)**.** Магнитная восприимчивость, как объект квантовой запутанности подтверждается и в работах других авторов (Wieśniak, et al,. 2005).

8. Роль квантовой запутанности в самоорганизации, фликкер-шуме и декогерентности

Проблемой естествознания является понимание физики самоорганизации вещества в живой и неживой природе. Сегодня ни механизм, ни детальные параметры этого процесса - неизвестны (Денисова, 2001). В тоже время существует множество вопросов без ответов, например, чем объясняется свойство систем самоорганизовываться и регулировать отношения с внешним миром, как вообще возникают организованные структуры с их функциями? На все эти вопросы пытается ответить синергетика. В частности, определение, данное Г. Хакеном в 1980-е в рамках синергетики (Хакен, 1980): «Самоорганизация - процесс упорядочения (пространственного, временного или пространственно-временного) в открытой системе, за счёт согласованного взаимодействия множества элементов её составляющих».

Трудность этой проблемы состоит в том, что необходимо раскрыть физическую природу всех этих процессов (Денисова, 2001). И если речь зашла о физической природе самоорганизации, то эту проблему, прежде всего, должна решать физика, которая пока решить ее не может. Возьмем такой объект органической природы, как живая клетка. Это ярко выраженная самоорганизующаяся система, но физика бессильна объяснить загадку живой клетки. Возьмем кристалл – объект неживой природы. О кристалле физика знает почти всё, однако перед загадкой кристалла как самоорганизующейся системы она тоже бессильна.

Не могу не согласиться с выводом автора (Денисова, 2001): «Проблема самоорганизации вещества в природе является первостепенной и главнейшей проблемой естествознания. И, прежде всего, ее должна решать физика, но, как мы видели, она не может этого делать. Поэтому можно сказать, что именно физика сегодня сдерживает развитие естествознания». Автор (Денисова, 2001) предлагает свой механизм самоорганизации, в основе которого положено взаимодействие пары противоположностей: «вещество – поле», которая описывается парой: «механика – электродинамика». Отсюда следует появление фантастического «зародыша постоянного электромагнитного поля» и т.п. Назвать это физикой - не представляется возможным. Проблема физики самоорганизации остается неясной.

Автор (Zak, 2002) высказывает смелую идею относительно того, что самоорганизация базируется на квантовой запутанности. В статье обсуждаются несколько парадигм самоорганизации (например, обратной диффузии, передачи условных информации, децентрализованной координации совместных вычислений, конкурентоспособные игры, топологические эволюции в активных системах) на основе квантовой запутанности. Тем не менее, эта идея остается пока недостаточно проработанной.

Авторы работы (Матизен и др, 2009) полагают, что проводимые ими эксперименты с матрицами (решетками), построенными на джозефсоновских переходах, показывают, что в основе взаимодействия элементов матриц между собой лежит самоорганизация, точнее, -самоорганизованная критичность (СОК).

В работе (Матизен и др, 2009) обнаружены лавины магнитного потока в джозефсоновских решётках (J-решётки) с переходом сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (SIS) при её намагничивании при $T < \sim 5$ К. Лавины носят стохастический характер и возникают, когда глубина проникновения магнитного поля в решётку (λ) сравнивается с длиной ребра J-решётки (a) при понижении температуры. Представлены статистические свойства таких лавин. Распределение лавин по их величине носит

степенной характер с отрицательным нецелым показателем порядка единицы, что свидетельствует о достижении состояния СОК. J-решётки с переходом из плохого металла (SNS) СОК не обнаруживают.

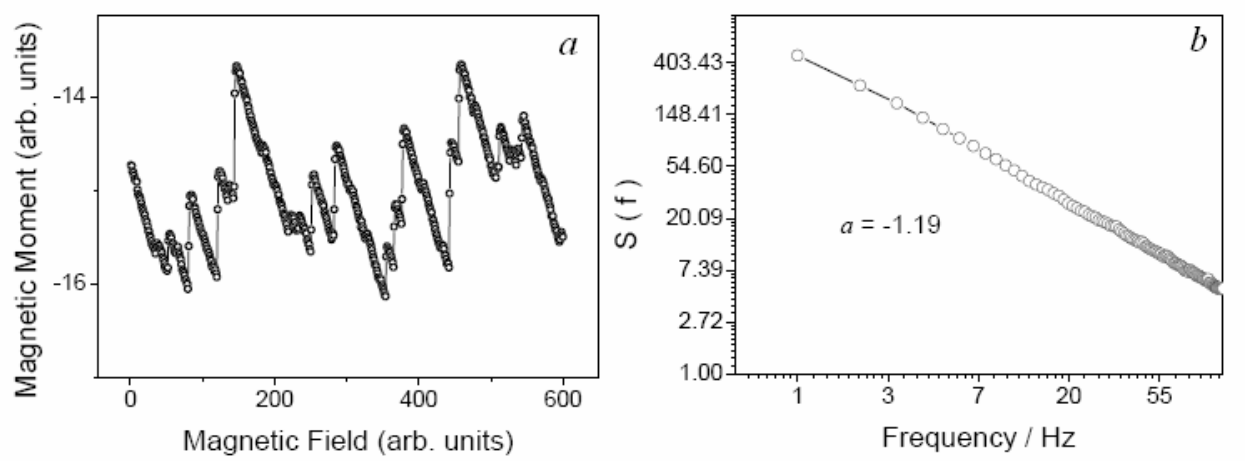


Рис. П1-5. Часть кривой магнитного гистерезиса – *a*. Фурье-спектр лавин магнитного потока - *b* (Матизен и др, 2009).

На небольшой части кривой магнитного гистерезиса (рис. 5-а) отчётливо видно, что при увеличении поля растёт отрицательный магнитный момент. В некоторый точке его абсолютная величина резко уменьшается до произвольного значения, после чего начинается его рост до нового срыва. Падение достаточно резкое. Специальные измерения выявили, что падение происходит менее чем за 0.01 сек. При этом в решётку входит до нескольких сотен квантов потока. Естественно, что при уменьшении поля на другой части полной петли гистерезиса наблюдается зеркальная картина – при этом кванты потока выходят из решётки с уменьшением поля.

Отметим, что полученный авторами Фурье спектр лавин магнитного потока носит степенной характер. Спектр отсортированных по величине лавин представляет собой степенную функцию $f\ a$ со средним показателем $a = -1.193$ (см. рис.5-*b*). Это спектр фликкер-шума (Валиев, Кокин, 2001;. Paladino et al., 2002; Bacciagaluppi, 2007), о чем в статье не говорится. Мне представляется, что если полученные авторами результаты интерпретировать в терминах МКЗ и спиновых волн (Plastina et al., 2004), то можно найти объяснение некоторым не объясненным результатам.

Несколько слов о декогеренции, которая показывает, что происходит разрыв связи спонтанных взаимодействий между системой и окружающей ее средой (окружением). В результате этого происходит подавление интерференции (запутанности). Объектом изучения явления моделирование взаимодействий между системой и средой, вывод ведущих (основных) уравнений (master equations) для редуцированного (reduced) состояния системы, обсуждение временных масштабов и т.д. Из определения следует, что декогеренция имеет непосредственную связь с редукцией волновой функции.

9. МКЗ и энтропия Тцаллиса

Суть многочастичной квантовой запутанности заключается в том, что в единую систему соединяется некая совокупность одинаковых квантовых элементов. Принято считать, что такие элементы создаются путем квантового клонирования. Клонирование - это такая операция, в результате которой создается состояние, являющееся тензорным произведением идентичных состояний подсистем.

Теорема о запрете клонирования (Wootters, Zurek , 1982; Dieks, 1982) утверждает, что создание идеальной копии произвольного неизвестного квантового состояния невозможно. Эта теорема применима для случая, когда запутывание всей системы

представляется как некая сумма двухчастичных запутанностей. Этот случай, который принято называть моногамией, – не реален. Как показано в работах (Tsallis et al., 2001; Kim, Sanders, 2009; Kim, Tsallis, 2010), совсем другая ситуация, возникает при т.н. полигамии, когда, используя формализм энтропии Тцаллиса, авторам удается доказать, что МКЗ может существовать.

Тцаллис показал (Tsallis, 1988), что существуют системы, в которых есть сильные корреляции, сильное взаимодействие между всеми частями системы. Это приводит к нарушению термодинамической аддитивности системы, потому их не удается описать больцмановской статистикой и термодинамикой. Значит, необходим иной подход, который каким-либо образом сумел бы справиться с режимом сильной связи между всеми частицами системы. В последние годы предложение Тсаллиса начало находить применение во многих физических и геофизических задачах, в задачах, которые касались термодинамически аномальных систем. Это, как правило, были системы с *дальнодействующим взаимодействием,* в пределе – взаимодействия между частицами «каждая с каждой». Существуют и другие системы, которые не могут быть описаны больцмановской термодинамикой. Только причина такого "неповиновения" может быть разной. Это могут быть, например, "эффекты памяти", когда система в некотором смысле «помнит» свое прошлое.

Тсаллис предложил, что статистика должна быть небольцмановская. Это значит, что выражение для энтропии могло бы описать неэкстенсивные системы и переходить в стандартную формулу в пределе слабой связи. Тсаллис взял стандартное выражение для энтропии, и вместо логарифма ввел новую функцию - степенную:

$$ln(x) \text{ –> } ln_q(x) = \frac{1}{(q - 1)}(x^{1-q} - 1)$$

с неким числовым параметром q. При q, стремящемся к 1, $ln_q(x)$ переходит в обычный логарифм, в чем можно убедиться простым дифференцированием. Новая формула для q-энтропии выглядит так:

$$S_q = -\Sigma_i (p_i^q \, ln_q(p_i)) = \frac{1}{(q - 1)}(1 - \sum_i p_i^q).$$

Если $q > 1$, то q - энтропия Тцаллиса переходит в стандартную больцмановскую энтропию.

В работах (Tsallis et al., 2001; Kim, Sanders, 2009; Kim, Tsallis, 2010), q - энтропия Тцаллиса используется для оценки степени запутанности. Так, например, автор, используя q-энтропию Тцаллиса, установил, что запутывание двух частиц (двух кубитов) соответствует величине параметра q: $1 \le q \le 4$. Моногамное многочастичное (multi-qubit) запутывание выраженное q-параметром возможно в интервале $2 \le q \le 3$ (Plastina et al., 2004. В (Башкиров, 2007) убедительно показано, что информация Тцаллиса есть вырожденная форма энтропии Реньи. Для описания сложных систем в книге (Встовский, 2002) также предлагается использовать энтропию Реньи, зависящую от параметра q и совпадающую с энтропией Гиббса–Шеннона при $q = 1$. Принцип максимума энтропии Реньи позволяет получить распределение Реньи, переходящее в каноническое распределение Гиббса при $q = 1$. Термодинамическая энтропия сложной системы определяется как энтропия Реньи для распределения Реньи. В отличие от обычной энтропии, основанной на энтропии Гиббса–Шеннона, эта энтропия возрастает с увеличением отклонения распределения от распределения Гиббса и достигает своего максимума. При этом распределение Реньи становится степенны́м распределением, что соответствует фазовому переходу в более упорядоченное состояние. В этом фазовом состоянии эволюция к дальнейшей упорядоченности системы сопровождается ростом энтропии, что, согласно второму закону термодинамики, означает предпочтительность естественной эволюции в направлении самоорганизации (Встовский, 2002).

10. Запутанности: чего с чем

Квантовая запутанность обнаружена для различных частиц и комплексов. Изначально, ещё во времена публикации и обсуждения парадокса ЭПР и, затем, работ Белла, речь шла о фотонах. Далее, в «круг» объектов запутанности попали электроны, протоны, ионы различного сорта и т.п. Ниже перечислены различные компоненты, рассматриваемые как объекты квантовой запутанности:
- протоны водородных связей (Allan , et al., 2007; Fillaux et al., 2008), в том числе у пара-воды (у орто-воды - таких способностей нет), - спиновые степени свободы(Neumann et. al., 2008); - нитрозильные комплексы железа; - магнитная восприимчивость; - джозефсоновские переходы (Матизен и др., 2009); - гидратированные ионы; - спиновая поляризация квантовых состояний в тонких слоях немагнитного металла при температуре Ферми и т.д.

[В некоторых упоминаемых выше ссылках нет упоминания о квантовой запутанности (нелокальности), но, по мнению автора, результаты этих работ можно объяснить в контексте МКЗ].

11. МКЗ и самосинхронизация

Обратимся к мнению ведущего в России специалиста по физике нелинейных колебательных систем и воздействию вибрации на различные среды И.И. Блехмана. Недавно вышла обобщающая его опыт статья (Блехман , 2008), посвященная, в частности, явлению синхронизации элементов многоэлементной колебательной системы. Представим себе, что несколько объектов (например, волчков), вращаются с различными частотами. Объединим их в единую систему путем установки на общую массивную плиту (см. рис.3). В этом случае этом волчки начинают вращаться с одинаковой, или кратными частотами. В этом состоит явление синхронизации. Тенденция к синхронизации, даже при слабой связи между объектами, оказывается во многих случаях столь сильной. Самосинхронизация маятниковых часов была обнаружена ещё Х. Гюйгенсом. Известна самосинхронизация планет и спутников солнечной системы (закон Боде). Принято считать, что речь идет о т.н. «притяжении ритмов», характерном для взаимодействующих объектов как живой, так и неживой природы – неуравновешенных роторов, турбинных лопаток, электрических генераторов, небесных тел, птиц, насекомых, сообществ клеток и даже сообществ людей (в том числе и массовый психоз).

Самосинхронизация – фундаментальное явление, происходящее как в микро-, так и в макромире: например, синхронизация орбит и ядерный магнитный резонанс. Самосинхронизация, несомненно, играет важную роль в биологических и физиологических процессах. Однако природа самосинхронизации остается неясной, несмотря на фундаментальные работы А.М. Ляпунова, В.И. Арнольда, Н. Винера и др. Остается выяснить, не является ли МКЗ возможным решением проблемы самосинхронизации.

12. Что следовало бы сделать и чего можно ожидать

Рассмотрим несколько предложений в плане проведения исследований, имеющих конечную цель – выяснить природу многочастичной квантовой запутанности. В этом разделе мы не будем касаться теоретических исследований, т.к. я считаю себя, по всему предыдущему опыту, – экспериментатором. Так как мой основной интерес сосредоточен на физике Земли, предложения в значительной мере касаются этой области знания. Перечислим эти предложения:

- Повторить исследования, начатые в экспериментах по дальнодействию МКЗ на термолюминисцентных кристаллах (рис. 4) (Desbrandes, Van Gent, 2006). В этих экспериментах можно было бы попытаться разобраться в таких вопросах, как условия приведения системы в состояние запутанности, оценка степени запутанности и характерное время её спада и т.д.
- Выяснить, можно ли считать, что эксперименты по аномальному увеличению АЭ нагруженных образцов горной породы (Журков и др., 1980; Kusunose et al., 1991) имеют в основе МКЗ. Если причина этого явления действительно МКЗ, то имеет смысл провести эксперимент идентичных образцов на двух различных прессах и выяснить насколько коррелируют результаты наблюдений. Можно также выяснить, зависит ли предполагаемый эффект от расстояния между образцами, аналогично тому, как это было получено в предыдущем опыте.
- Разобраться в физике появления в АЭ режима акустического молчания (Купцов, 2006). Выяснить, является ли причиной этого эффекта возможный механизм нарушения квантовой запутанности объекта, области пространства, принимающего участие в формировании УВ, - со средой. Поняв физику квантовой запутанности, можно попытаться строить научно обоснованные системы прогноза землетрясений. Предположим, что причина декогеренции и образование при этом ударной волны, т.е., собственно, землетрясения, состоит в квантовой запутанности протонов водородных связей. Предположим далее, что запутываются не только протоны, входящие в состав минералов в районе гипоцентра. Будем полагать, что в этот процесс включены протоны водородных связей воды, атмосферных водных аэрозолей и т.п. В этом случае открывается путь к пониманию таких предвестников, как изменение атмосферного электричества, свечение воды, явления в ионосфере, генерация частиц высокой энергии и пр.
- Провести лабораторное моделирование возникновение магматического очага в среде за счет разрушения водородных связей и изменения уравнения состояния среды. Облучая лед синхротронным излучением с энергией квантов, равной энергии водородных связей и разрушая их при этом, получить, по возможности, эффект плавления льда без его внешнего нагрева.
- Анализ данных по акустической эмиссии возникающей при плавлении льда дает основание предположить, что газогидраты также могут быть источниками акустических сигналов. Эта идея, с одной стороны, открывает возможность обнаруживать природные залежи газогидратов по регистрации уровня акустической эмиссии. С другой - оценить, может ли возникнуть в такой среде МКЗ. Если действительно это явление может происходить, то при декогеренции и редукции волновой функции - должны образовываться огромные пузыри метана, всплывающие во время декогеренции, характеризующейся предшествующим ей резким усилением акустической эмиссии.
- МКЗ в момент декогеренции ведёт к выделению в «запутанной» системе скрытой теплоты структурного фазового перехода. Этот факт оставляет надежду на то, что, поняв физику явления МКЗ и научившись управлять квантовой запутанностью, можно рассчитывать на освоение принципиально новых источников энергии из окружающей среды.
- Выяснение многих проблем МКЗ возможно, по моему мнению, при проведении исследований на установке, описанной в работе (Матизен и др., 2009), в частности: в чем состоит физика запутывания (почему СОК возникает в случае SIS, и отсутствует в случае SNS); можно ли считать лавины потока спиновыми волнами; имеет ли место запутывание со средой и декогеренция; и т.п.

13. Заключение

По-видимому, МКЗ можно рассматривать как инструмент, позволяющий связать квантовую физику с физикой классической. Раздел науки, в котором предпринимаются

аналогичные попытки понять как эфемерный квантовый мир «перетекает» в привычную, воспринимаемую нашими органами чувств реальность получил название квантовый дарвинизм. Квантовый дарвинизм – теория возникновения классического описания мира из квантовых законов, согласно которой - классические параметры наиболее устойчивы к т.н. квантовой декогеренции, быстрее размывающей описания, основанные на других параметрах. Декогеренция квантовой системы (появление у нее классических черт) возникает в процессе взаимодействия системы с окружающей средой и хорошо описывается в рамках теории непрерывных квантовых измерений (Blume-Kohout, Zurek, 2006; Ananthaswamy, 2008).

Теория декогеренции (иногда называемой «динамической» декогеренцией) изучает конкретные спонтанные взаимодействия, которые приводят к подавлению интерференции. Концепция декогеренции описывает процесс «коллапса» многих квантовых состояний при взаимодействии с окружающей средой.

В моделях таких взаимодействий проявляются некоторые интересные свойства (это не означает, что все такие свойства являются общими для всех моделей) (Bacciagaluppi, 2007):

- Подавление интерференции может быть исключительно быстрым процессом, в зависимости от самой рассматриваемой системы и ее окружения.
- Окружение стремиться объединиться с системой и подавить интерференцию между выделенным множеством состояний, будь это дискретное множество или некоторое непрерывное множество.
- Эти выделенные состояния могут быть охарактеризованы в терминах их устойчивости по отношению к взаимодействию с окружением. Пока система запутана с окружением, состояния, между которыми интерференция подавляется, оказываются состояниями с *наименьшей степенью запутанности* с окружением в ходе последующего взаимодействия. Это приводит нас к различным дальнейшим (взаимосвязанным) аспектам декогеренции.

С точки зрения квантового дарвинизма, декогеренция является процессом «естественного отбора» тех квантовых состояний, которые не нарушаются при контакте со средой. Окончательное, стабильное состояние, «выжившее» в процессе декогеренции («pointer state») многократно копируется и может наблюдаться в макроскопическом масштабе.

В заключение хочу сослаться на мнение на одного из ведущих специалистов по квантовой запутанности Влатко Ведрала (Verdal, 2008), который полагает, что ещё недавно квантовое запутывание традиционно считалось принадлежностью только микроскопических объектов. Это явление бросало вызов объяснению, основанному, как считается, на здравом смысле. Теперь квантовое запутывание признано повсеместно и считается надежно установленным фактом. С пониманием того, что квантовая запутанность может произойти и в макроскопических системах, а так же с развитием экспериментов, направленных на использование этого эффекта – возникают новые возможности, необходимые для определения степени запутанности макроструктур.

Хочется надеяться на то, что изучение проблемы многочастичной квантовой запутанности будет признано прорывным направлением науки и получит крайне необходимую моральную и финансовую поддержку. Уверен в том, что развитие этого направления принесет пользу и будет практически использовано во многих отраслях науки и техники. В частности, видны пути решения отмеченных нами во введении таких проблем как физика землетрясения, вулкана, шаровой молнии и т.п. В последнем случае решение может состоять в том, что Природа умеет запутывать водные кластеры и поэтому шаровая молния «живет» довольно долго, в то время как экспериментаторы этого делать пока не научились и получаемая ими шаровая молния угасает очень быстро…

Литература

Валиев К.А.. Кокин А.А. Квантовые компьютеры; надежды и реальность. 2001. Ижевск: РХД. 352 с.
Встовский Г.В. Элементы информационной физики. М.: МГИУ. 2002. 260 с.
Денисова Н.А. Проблема самоорганизации вещества и физика // Докл. XII Межд. симп. “Перестройка естествознания в третьем тысячелетии” 2001.
Дроздов А.В. Гидратация биологических молекул и орто- пара-молекулы H_2O // VIII Международная Крымская конференция «Космос и Биосфера». Судак. 2009. http://cb.science-center.net/conf/Files/Drozdov3_Session_4_Ru.htm
Журков С.Н., Куксенко В. С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. науч. тр. М.: Наука. 1980. С. 78-85.
Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР ДВО РАН. 2006.
Матизен Э.В., Мартынец В. Г., Безверхий П. П. Состояние самоорганизованной критичности в джозефсоновской решётке // Вестник СибГУТИ. 2009. № 3 С. 137-144.
Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с
Чернявский А.Ю. Неэквивалентность двухчастичной и многочастичной квантовой запутанности // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. №. 6. С. 449-451.
Шишкин А.М., Радер О. Квантовые состояния как посредники в магнитном взаимодействии // Природа. 2010. № 5. С. 18-26.

Ananthaswamy A. Quantum Darwinism // Foundation Questions Institute. 2008, November. P 1-3.
Aspect A. Bell’s theorem: the naïve view of an experimentalist // Quantum [Un] speakables – From Bell to Quantum information. Ed. R.A. Bertlmann & A. Zeilinger, Springer. 2002.
Bacciagaluppi G. The role of decoherence in quantum mechanics // Stanford Encyclopedia of Phylosophy. 2007. http://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence/
Blume-Kohout R., Zurek W.H. Quantum Darwinism: entanglement, branches, and the emergent classicality of redundantly stored quantum information // Phys. Rev. 2006. V. A. 73. P. 062310 1-21.
Desbrandes R., Van Gent D.L. Intercontinental liaisons between entangled electrons in ion traps of thermoluminescent crystals // arXiv:quant-ph/0611109 2006.
Dieks D. Communication by EPR devices // Physics Letters A. 1982. V. 92(6). P. 271-272.
Dür W., Cirac J. I. Multiparticle entanglement and its experimental detection // J. Phys. A: Math. Gen. 2001. V. 34. P. 6837-6850.
Fillaux F., Cousson A., Gutmann M.J. A neutron diffraction study of macroscopically entangled proton states in the high temperature phase of the $KHCO_3$ crystal at 340 K // J. Phys.: Condens. Matter 2008 20 015225
Häffner H., Hänsel W., Roos C. F. et al. Scalable multiparticle entanglement of trapped ions // Nature. 2005. V. 438. P. 643-646.
Kandrashkin Yu.E., Salikhov K.M., van der Est A., Stehlik D. Electron spin polarization in consecutive spin-correlated radical pairs: aplication to short-lived and long-lived precursors in type 1 photosynthetic reaction centres // Appl. Magn. Reson. 1998. V. 15. P. 417-447.
Kim J. S., Sanders B.C. Monogamy and polygamy for multi-qubit entanglement using Renyi entropy // arXiv:0911.5180v1 [quant-ph] 2009
Kim J. S. Tsallis entropy and entanglement constraints in multi-qubit systems // Phys. Rev. 2010. V. A 81. P. 062328 (arXiv:0911.5181v2 [quant-ph]).
Kusunose K, Lei X., Nishizawa O., Satoh T. Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock // PEPI 1991. V. 67. Iss. 1-2. P. 194-199.

Leibfried D., Knill E., Seidelin S. et al. Creation of a six-atom 'Schrödinger cat' state // Nature. 2005. V. 438, 639-642.
Moehring D.L, Maunz P., Olmschenk S., et al. Entanglement of Single Atom Quantum Bits at a Distance. Nature, 2007, V. 449, P.41.
Neumann P., Mizuochi N., Rempp F., et al. Multiparticle entanglement among single spins in diamond // Science. 2008. V. 320. P. 1326-1328.
Paladino E., Faoro L., Falci G., Fazio R. Decoherence and 1/*f* noice in Josephson qubits // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. N. 22. P. 228304.
Pan J.-W., Gasparoni S, Ursin R, et al., Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. Nature. 2000. V. 403. P. 515–519.
Sackett C. A., Kielpinski D., King B. E. et al. Experimental entanglement of four particles // Nature. 2000. V. 404. P. 256-259.
Schrödinger E. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik // Naturwissenschaften, 1935, **48**, 807, **49**, 823, **50**, 844
Souza A.M., Reis M.S., Soares-Pinto D.O. et al. Experimental determination of thermal entanglement in spin clusters using magnetic susceptibility measurements // Phys. Rev. 2008. V. B 77. 104402.
Souza A.M., Soares-Pinto D.O., Sarthour R.S. et al. Entanglement and Bell's inequality violation above room temperature in metal carboxylates // Phys. Rev. 2009. V. 79. 054408.
Tielrooij K.J., Garsia-Araez N., Bonn M., Bakker H.J. Cooperativity in ion hydration // Science. 2010. V. 328. P.1006-1009.
Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics // J. Stat. Phys. 1988. V. 52. P. 479-487.
Tsallis C., Lambert P.W., Prato D. A non extensive critical phenomenon scenario for quantum entanglement // Physica A. 2001. V. 295. P. 158-171.
Ursin, R. *et al.* Quantum teleportation link across the Danube. *Nature* **430**, 849 (2004)
Vedral V. Progress Article Quantifying entanglement in macroscopic systems // Nature. 2008. V. 453. P. 1004-1007.
Wieśniak M., Vedral V., Brukner C. Magnetic susceptibility as a macroscopic entanglement witness // New J. Phys. 2005. V. 7. P. 258. doi: 10.1088/1367-2630/7/1/258
Wiseman H.M., Eisert J. Nontrivial quantum effects in biology: A skeptical physicists' view // ArXiv: 0705.1232
Wootters W.K., Zurek W.H. A Single Quantum Cannot be Cloned // Nature. 1982. V. 299. P. 802-803.
Wootters W.R. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. N. 10. P. 2245-2248.
Zhao Zhi, Chen Yu-Ao, Zhang An-Ning. Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation // Nature. 2004. V. 430. P. 54-58.
Zurek W.H. Decoherence and the transition from quantum to classical - Revisited // Los Alamos Science, Number 27 2002

Приложение 2.
Физика явлений с отрицательной вязкостью.
Старр В.П. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир. 1971. 130 с.

В книге Старра (1971) обсуждается предположение, что в жидких системах определенных типов проявляется турбулентная или виртуальная вязкость, которая систематически оказывается отрицательной. Эффект положительной вязкости состоит в том, чтобы препятствовать относительным движениям в жидкости, в то время как эффект отрицательной вязкости – в поддержании разности скоростей или увеличении её, если это допускают все остальные факторы. Данное явление строго установлено из наблюдений. Известно как оно происходит, но неизвестно – почему.
Свойство жидкости оказывать сопротивление движению со сдвигом (течение, у которого поперечный градиент скорости отличен от нуля) известно из многочисленных данных наблюдений. Поэтому довольно трудно воспринять идею о возможности обратного эффекта

Согласно предположению, высказанному ещё Ньютоном, в обычных жидкостях при наличии сдвига в потоке, как показано на рис. П2-1, напряжение трения, или сила трения, действующая на единичную площадку в касательном направлении, пропорциональна величине сдвига. Отсюда приходим к понятию коэффициента вязкости, как коэффициента пропорциональности, связывающего напряжение τ со сдвигом, так что

$$\tau = \mu \partial u / \partial y \qquad (П2.1)$$

где u - составляющая скорости жидкости в направлении оси x. Линейная зависимость напряжений от величины сдвига отражена в динамических уравнениях Навье - Стокса, соответствующих общему случаю трехмерного течения жидкости.

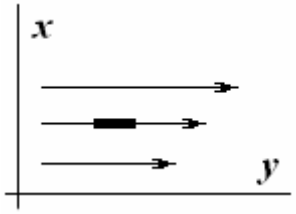


Рис. П2-1. В декартовой системе координат (x, y, z) простейшее течение со сдвигом изображено стрелками. Ради простоты показана только одна компонента движения по направлению оси x, которая не зависит от y и z. Жирным отрезком прямой, которым помечена средняя стрелка, обозначена единичная площадка, параллельная плоскости xz.

По определению знаки τ и μ, выбирают таким образом, чтобы положительные значения этих величин соответствовали свойству жидкости оказывать сопротивление сдвигу, схематически изображенному на нашем рисунке, т. е. соответствовали стремлению к уменьшению сдвига со временем в отсутствие каких-либо поддерживающих его сил. Остановимся на причинах того, почему физические соображения заставляют ожидать именно такого эффекта.

Обычно предполагается, что эффект вязкости принадлежит к так называемым *молекулярным* явлениям. Обсудим случай, когда интересующая нас среда - газ. Выше мы условились, что вектор скорости параллелен оси x. Это следует понимать в смысле статистического среднего. В действительности на молекулярном уровне отдельные молекулы, вообще говоря, обладают также компонентой скорости, параллельной оси y, и, следовательно, пересекают единичную площадку, по отношению к которой определяется величина напряжения. Переноса массы через рассматриваемую площадку в среднем не происходит. Отсюда следует, что суммарная масса молекул, пересекающих единичную площадку снизу вверх в данный момент времени, равна по величине массе молекул, движущихся сверху вниз. Согласно ньютоновской механике, напряжение τ определяется величиной потока через единичную площадку составляющей количества движения

(импульса) по оси x. Поэтому движущиеся вверх молекулы при пересечении площадки должны приносить с собой дефицит x-компоненты импульса, тогда как молекулы, движущиеся вниз, уносят с собой его избыток. В результате суммарный перенос импульса происходит сверху вниз, что соответствует положительной величине τ.

Используя понятие средней длины свободного пробега из статистической механики, можно рассчитать необходимую разность импульсов, переносимых молекулами снизу вверх и сверху вниз, причем результат вычислений нетрудно предвидеть. Эта разность, кроме того, не может появиться за счет хаотических компонент молекулярного движения. Она возникает только за счет компоненты, испытывающей систематический сдвиг. Это становится понятным, если учесть, что молекулы, пересекающие площадку, первоначально находились по обе стороны от нее на некоторых расстояниях выше или ниже площадки.

Как известно, Максвелл впервые рассчитал молекулярную вязкость газов, опираясь на указанную концепцию, он получил удовлетворительное согласие вычисленных значений с результатами измерений.

Выскажем несколько общих замечаний, которые будут полезны в дальнейшем.

Во-первых, полученный Максвеллом результат имеет статистический характер. Это означает, что в среднем каждая молекула, пересекающая площадку сверху вниз, обладает большим по величине импульсом, чем молекула, пересекающая площадку снизу вверх. Другими словами, для всех молекул, которые пересекают площадку, составляющие импульса по оси x и y имеют отрицательную корреляцию, причем измерения осуществляются в момент пересечения площадки.

Во-вторых, молекулы, пересекающие площадку, обладают также в смысле статистического среднего составляющей импульса по оси x, соответствующей их первоначальному положению ниже или выше площадки, задаваемому сдвигом.

И, наконец, поскольку размеры молекул очень малы, для макроскопического описания напряжение связывают с дифференциальными характеристиками среднего течения в некоторой точке пространства. Поэтому дифференциальное выражение для τ можно записать в виде (2.1); а для того чтобы получить величину результирующей сил вязкости, действующих на элемент жидкости, его надо продифференцировать по пространственным координатам.

1. Понятие турбулентной вязкости. Наблюдая за различными течениями вязкой жидкости, нам редко (если это вообще когда-либо возможно) удается проследить за всеми деталями таких течений. Так, при измерении коэффициента молекулярной вязкости μ каким-либо вискозиметром мы не имеем дела непосредственно с молекулярными движениями. При исследовании движений в атмосфере и океане скорости почти всегда измеряются приборами, которые осредняют не только молекулярные движения, но также неоднородности движения больших пространственных и временных масштабов. Проследить за всеми движениями, включая и мелкие нерегулярности почти до масштабов молекулярных движений, в обычных течениях фактически невозможно.

Когда делаются попытки проанализировать такие сглаженные осреднением течения, то вскоре обнаруживается, что в подавляющем большинстве случаев невозможно согласовать операцию осреднения с использованием коэффициента молекулярной вязкости μ. Использование его для описания некоторых течений приводит к абсурду. Для описания других течений он, по-видимому, слишком мал по порядку величины. Если при определении μ мы допускали, что перенос импульса через площадку осуществляется только посредством молекулярного обмена между частями, находящимися по обе

стороны рассматриваемого сечения, то теперь естественно предположить, что существует возможность обмена через единичную площадку макроскопическими

элементарными массами. В результате такого усиленного обмена массами поведение макроскопических *x*- и *y*-компонент скорости *u* и *v* приобретает сложный и запутанный характер. Перенос импульса, осуществляемый макроскопическими массами, обычно значительно превосходит перенос импульса молекулярными движениями, хотя последний по-прежнему имеет место. Этим и объясняется неэффективность использования коэффициента μ без введения дополнительных условий.

В случаях, которые мы только что обсуждали, обычно говорят, что течение характеризуется наличием *турбулентности* и в нем происходит турбулентный перенос импульса. Если этот турбулентный перенос импульса воспроизводит эффект молекулярной вязкости (т. е. происходит в том же направлении), то говорят о наличии *турбулентной вязкости.* Иногда ее называют *виртуальной* или *вихревой вязкостью,* и тогда можно ввести коэффициент турбулентной вязкости η, но при этом сразу возникают дополнительные вопросы, которые необходимо обсудить.

Предположим, что по аналогии с (П2.1) мы записываем соотношение

$$\tau_R = \eta \frac{\partial [u]}{\partial y} \qquad \text{(П2. 2)}$$

$$[u] = \frac{1}{L} \int_{x_1 - \frac{L}{2}}^{x_1 + \frac{L}{2}} u dx$$

где L — длина выбранного отрезка, параллельного оси x, с серединой в данной точке $x=x_x$. Напряжение τ_R в (П2.2) является турбулентным напряжением, или, как его часто называют, напряжением Рейнольдса.

Исследователи, занимавшиеся изучением турбулентности, затратили большие усилия, чтобы найти физически обоснованный вывод соотношения (П2.2), подобно тому как Максвелл и другие успешно сделали это для (П2.1). Одно из главных направлений исследований заключалось в том, чтобы элементу массы, охваченному вихревым движением, поставить в соответствие *путь перемешивания,* в некотором смысле аналогичный средней длине свободного пробега молекул, и затем связать эту величину с коэффициентом η. Конечно, это соответствие никогда не может быть точным, так как в отличие от молекулы, жидкая частица не является самостоятельным образованием. Точно так же путь перемешивания нельзя рассматривать буквально как среднюю длину свободного пробега жидкой частицы хотя бы потому, что этот пробег не является свободным. Жидкая частица постоянно взаимодействует с окружающей средой, и исследование турбулентной вязкости в отличие от молекулярной должно основываться на законах механики сплошных сред. Чтобы согласовать теорию с экспериментом или данными наблюдений, основой исследования обычно становится полуэмпирический метод.

Вообще говоря, попытки получить физически обоснованный вывод соотношения (П2.2) так и не имели существенного успеха даже в тех случаях, когда полуэмпирические методы описания некоторых турбулентных течений нашли успешное применение в инженерных и других прикладных задачах. Конечно, если τ_R, а также $[u]$ измеряются непосредственно, всегда можно приписать величине η такое значение, которое удовлетворяет рассматриваемым данным наблюдений. Однако соотношение (П2.2) тем и полезно, что η можно определить заранее и затем рассчитывать τ_R, зная величину одной только средней скорости течения. Можно отметить, что попытки вывести соотношение (П2.2) из общих принципов вновь ставили своей целью связать τ_R с дифференциальными характеристиками осредненного движения в одной точке пространства так же, как это было сделано в молекулярном случае.

2. Появление отрицательной вязкости. Предположим, что мы измеряем реальные значения величин τ_R и $[u]$, входящих в соотношение (П2.2). Для определенных видов

течений, как в лабораторных, так и в естественных условиях, оказывается, что значения η, необходимые для выполнения равенства (2.2), систематически получаются отрицательными, что соответствует мнимому значению пути перемешивания. Это является результатом того, что турбулентный перенос импульса τ_R в таких течениях направлен из областей с меньшим значением скорости среднего потока в области с большим ее значением, причем влияние такого турбулентного переноса импульса на среднее течение прямо противоположно эффекту фрикционного торможения. В этих случаях значения τ_R много больше значений величины τ, заданной равенством (П2.1), если вместо u, используется $[u]$. Ясно, что такое поведение жидкости представляет собой новое физическое явление и не может рассматриваться по аналогии с молекулярной вязкостью, следствием которой никогда не бывает столь резко аномальный эффект.

Из общих представлений и некоторых соображений, о которых будет сказано ниже, следует, что положительная турбулентная вязкость приводит к диссипации кинетической энергии среднего течения, причем эта энергия переходит в нерегулярные движения, а от них в энергию молекулярных движений и в конечном итоге преобразуется в тепло. При наличии отрицательной турбулентной вязкости последовательность событий должна быть обратной: среднее течение получает кинетическую энергию от нерегулярных движений, а энергия среднего течения остается в определенных пределах за счет диссипативного влияния других процессов. Нерегулярные движения либо постепенно ослабевают, либо же поддерживаются некоторыми процессами, например систематическим преобразованием тепла в кинетическую энергию в рамках отдельных возмущений. В последнем случае, если турбулентный режим является установившимся, система должна обеспечиваться необходимым количеством тепла.

Реальными течениями, в которых имеет место эффект отрицательной вязкости, являются дифференциальное вращение солнечной фотосферы, дифференциальное вращение земной атмосферы, среднее состояние Гольфстрима вблизи американского побережья и течения в некоторых лабораторных экспериментах. Кроме того, как следует, по крайней мере, из некоторых подсчетов, такое явление обнаруживается и в среднем дифференциальном вращении дисков спиральных галактик. Вероятно, многие другие течения, еще не изучавшиеся с излагаемой точки зрения, будут дополнительно включены в этот список в недалеком будущем. Следует отметить также, что к настоящему времени построен ряд теоретических моделей, с помощью которых в той или иной степени удавалось воспроизвести течения реальных жидких систем. В указанных моделях упомянутый здесь турбулентный эффект ничем заранее не задается и является следствием самих гидродинамических или магнитогидродинамических уравнений.

3. Модель. Идея отрицательной турбулентной вязкости возникла из вычисления напряжений Рейнольдса по данным наблюдений, касающихся главным образом земной атмосферы. Как и в других аналогичных примерах, когда новые данные приводят к существенному отклонению от привычного мышления, переход к научному мышлению на основе физических концепций должен основываться на наблюдаемом явлении настолько непосредственно, насколько это возможно, чтобы быть убедительным и внушать доверие. Ввиду того, что создание действительно адекватных теоретических моделей упоминаемых выше течений, является одной из наиболее трудных задач прикладной математики, когда-либо попадавших в руки теоретиков от гидродинамики, наблюдательная основа нашего изучения является особенно ценной. Однако надо отдать справедливость исследователям и сразу же отметить, что прогресс, которого они достигли в моделировании атмосферы посредством вычислений на электронных машинах, является в настоящее время действительно потрясающим. Это не значит, что надежное долгосрочное предсказание погоды уже близко, поскольку имеются дополнительные нерешенные

проблемы, но для тех, кто полностью сознает всю сложность рассматриваемых систем, такое суждение едва ли покажется нелепым.

Однако еще до того, как мы попытаемся мысленно охватить данные наблюдений, желательно рассмотреть некоторый теоретический материал, непосредственно относящийся к гидродинамическим законам. Из методических соображений мы сделаем это на примере модели, упрощенной насколько возможно. Ее недостатки совершенно очевидны, но все-таки она более близко подводит нас к самой сути явления и необходимой методологии.

4. Решение системы уравнений горизонтального движения. Мы предполагаем, что рассматриваемая жидкость является несжимаемой, с постоянной плотностью, чисто горизонтальным движением в плоскости *xy* и без молекулярной вязкости. Слой имеет малую толщину по вертикали и ограничен двумя ровными стенками при $y = \pm yi$, где y_x постоянно, так что образуется канал постоянного сечения. Чтобы иметь дело с замкнутой системой, зададим в качестве искусственного условия, что движение повторяется в направлении *x* с периодом *L*. Это никоим образом не мешает использованию декартовых координат и не меняет формы гидродинамических уравнений.

Если мы допустим, что давление является единственной реально действующей силой, то динамические *уравнения движения* будут иметь вид

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x}, \qquad \rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y}, \tag{П2.3, П2.4}$$

где *u* и *v* – скорости частиц, *p* – давление, ρ – плотность, *t* – время, а

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} \tag{П2.5}$$

есть скорость изменения со временем величины, переносимой вместе с данной частицей, каково бы ни было ее движение. Соответственно левые части (П2.3) и (П2.4) представляют собою массу единичного объема ρ, умноженную на компоненты ускорения в инерциальной системе координат, и потому равны полным силам давления на единицу объема. Кинематическое условие (П2.5) - соотношение Эйлера, связывающее индивидуальную скорость изменения свойства частицы с пространственными производными и скоростью изменения со временем свойства в фиксированной точке пространства.

Закон сохранения массы в нашем случае равносилен сохранению объема и потому имеет форму

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{П2.6}$$

что представляет собой *уравнение неразрывности* для нашей задачи. Следует отметить, что уравнения (П3), (П4) и (П6) содержат три независимые переменные — *x, y* и *t.* Эти три уравнения образуют замкнутую систему для трех зависимых переменных или неизвестных *u, v* и *p.* Каждое из последних в общем случае должно быть выражено через *x, y* и *t.* Единственное решение, не содержащее произвольных функций (появляющихся в результате интегрирования), может быть, разумеется, обеспечено выполнением граничных и начальных условий.

Имеется ряд методов решения системы (3), (4) и (6). Сведем систему к единственному уравнению с одним неизвестным. Давление может быть исключено из (3) и (4) перекрестным дифференцированием и приравниванием получившихся смешанных производных. При использовании (5) и (6) легко показать, что система сводится к двум уравнениям с двумя неизвестными *u* и *v,* а именно

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right)=0,$$
$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0. \qquad (П2.7)$$

Первое из этих уравнений содержит величину $\partial v/\partial x - \partial u/\partial y$, т. е. вихрь, который является скоростью вращения частицы в окрестности соответствующей точки. Это уравнение выражает тот факт, что индивидуальные частицы при движении сохраняют свой вихрь; действующие в данном случае на частицу силы (т. е. силы давления) не способны создать отличный от нуля момент. Этот факт указывает на необходимость приписать каждой частице тем или иным способом в качестве начального условия желаемое значение вихря, т. е. выбрать движение жидкости в начальный момент. Уравнение неразрывности все еще должно остаться в системе (7), так как, хотя оно и было использовано при выводе первого уравнения, или *уравнения вихря,* это не привело к исключению дополнительного неизвестного.

Ни одно из оставшихся неизвестных нельзя исключить непосредственно из (П2.7). Поэтому мы далее введем *функцию тока* ψ, использование которой заменяет уравнение неразрывности, так что наша система будет иметь вид

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right)=0,$$
$$u=-\frac{\partial \psi}{\partial y}, \qquad (П2.8)$$
$$v=+\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Теперь в системе (8) три уравнения и три неизвестных u, v и ψ. Большим преимуществом этой процедуры является то, что u и v можно тотчас же исключить из уравнения вихря и получить одно уравнение для определения $\underline{\psi}$. После раскрытия полной производной мы получаем уравнение

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}\right)-\frac{\partial\psi}{\partial y}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial\psi}{\partial x}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}\right)=0 \qquad (П2.9)$$

Это уравнение двумерного движения невязкой жидкости с постоянной плотностью по отношению к инерциальной системе координат.

- Уравнение имеет третий порядок и нелинейно. Общее решение уравнения не может быть выписано.
- Второй и третий члены его образуют якобиан, или функциональный детерминант, для ψ и вихря по отношению к x и y, обращение которого в нуль означало бы совпадение изолиний ψ (т.е. линий тока) и изолиний вихря. Такое условие необходимо для стационарности потока. Если поток нестационарен, то якобиан дает скорость изменения вихря в фиксированной точке.
- Если бы мы могли получить общее решение уравнения (П2.9), то оно содержало бы три независимые произвольные функции, поскольку уравнение имеет третий порядок. Мы уже отмечали, что одна из произвольных функций требуется для удовлетворения начальным условиям; остающиеся нужны для фиксирования граничных условий.

Функция тока ψ и вихрь не независимы. Если задана функция ψ, то вихрь является ее *лапласианом* $\partial^2\psi/\partial x^2 + \partial^2\psi/\partial y^2$ и потому получается дифференцированием. При заданном вихре функция тока может быть получена обращением лапласиана, т. е. решением *уравнения Пуассона*

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=F(x,y) \qquad (П2.10)$$

при заданных граничных условиях. Функция *F(x, y)* описывает пространственное распределение вихря. Так как уравнение (9.10) нелинейно, можно явно выписать его общее решение с помощью функции Грина в виде

$$\psi(x,y)=\frac{1}{2\pi}\iint F'\ln\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}\times dx'\,dy'+\varphi_1(x+iy)+\varphi_2(x-iy), \qquad (П2.11)$$

где штрих означает данные в точке *x′*, *y'* , а *i* - мнимая единица. Функции φ_1 и φ_2 произвольны, и в принципе с их помощью можно удовлетворить граничным условиям. Интеграл распространяется на всю рассматриваемую область.

Решение уравнения (9) для нашей задачи сводится к получению функции $\psi = \psi(x, y, t)$, соответствующей данному начальному потоку в момент $t = 0$, когда $\psi = \psi_o(x, y)$, и удовлетворяющей граничным условиям, т. е. $\psi = \psi_a$ при $y=y_1$ и $\psi = \psi_b$ при $y = -y_1$, где ψ_a и ψ_b -постоянные в области $t \geq 0$.

Так как ψ_o описывает начальный вихрь, мы можем вычислить в (9) якобиан при $t=0$. Это позволяет найти распределение вихря в момент $t = \Delta t$ линейной экстраполяцией, если Δt достаточно мало. Это новое распределение вихря можно подставить в правую часть (10), так что, согласно (11), мы можем получить новое, слегка измененное распределение ψ. Новое распределение ψ мы можем опять подставить в (2.9), и процесс повторяется для второго интервала времени Δt и т. д. для последовательных временных шагов. Чем меньше шаг по времени и чем больше число итераций для получения данного, зависящего от времени решения, тем больше точность результата.

На основе конечно-разностной схемы легко показать, что уравнение (10) может быть аппроксимировано соотношением

$$\psi_a + \psi_b + \psi c + \psi_d - 4\psi_o = F_0(x, y). \qquad (П2.12)$$

Такое же уравнение можно получить для каждой внутренней точки. При этом число неизвестных значений ψ будет равно числу уравнений, так как значения в точках стенки задаются граничными условиями. Задача сводится к решению замкнутой системы алгебраических уравнений типа (П2.12). Это можно сделать сколь угодно точно, используя методы релаксации, обращения матриц или какие-либо другие методы.

Если значения ψ известны, то легко можно получить компоненты скорости, а по ним давление путем интегрирования уравнений динамики. При проведении этой процедуры уравнение вихря фактически может рассматриваться как условие интегрируемости.

5. Энергия и количество движения (импульс) в простой замкнутой системе. Если уравнения движения (3) и (4) умножить на *u* и затем сложить, мы получим

$$\rho\frac{d}{dt}\frac{u^2+v^2}{2}=-u\frac{\partial p}{\partial x}-v\frac{\partial p}{\partial y}=-\left(\frac{\partial pu}{\partial x}+\frac{\partial pv}{\partial y}\right)+p\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right). \qquad (П2.13)$$

Последний член, который в общем случае может рассматриваться как источник горизонтальной кинетической энергии, в нашей задаче исчезает в силу уравнения неразрывности. Левая часть после раскрытия полной производной и использования уравнения неразрывности может быть переписана так, что (П2.13) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial t}\frac{\rho(u^2+v^2)}{2}=-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\frac{\rho u(u^2+v^2)}{2}+\frac{\partial}{\partial y}\frac{\rho v(u^2+v^2)}{2}\right\}-\left(\frac{\partial pu}{\partial x}+\frac{\partial pv}{\partial y}\right). \qquad (П2.14)$$

Можно проинтегрировать (П2.14) по нашей периодически повторяющейся области, после чего видно, что

$$r(u,v)=\frac{[uv]-[u][v]}{\sqrt{[u^2]-[u]^2}\sqrt{[v^2]-[v]^2}}=\frac{[u'v']}{\sigma(u)\sigma(v)},$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{-y_1}^{y_1}\oint\rho\frac{u^2+v^2}{2}dxdy=0, \qquad (П2.15)$$

как интеграл от дивергенции потока кинетической энергии и дивергенции давления, умноженного на скорость, равен нулю вследствие периодичности по x и условия $v \equiv 0$ на двух границах. Таким образом, на основании (П2.15) можно заключить, что, поскольку $\rho(u^2 + v^2)/2$ - кинетическая энергия на единицу объема, полная энергия в нашей системе остается постоянной, несмотря на изменения потоков во времени. Другими словами, движение продолжается по инерции.

Введем далее обозначения $u = [u] + u'$, $v = [v] + v'$, (П2.16)

где квадратные скобки означают среднее по периоду L вдоль оси x, т. е.

$$[(...)]=\frac{1}{L}\oint(...)dx. \qquad (П2.17)$$

Штрихи означают отклонения от среднего по x (или зонального среднего, как мы его будем называть). Вследствие неразрывности движения в нашей системе $[v] = 0$. Теперь мы можем написать соотношение

$$\int_{-y_1}^{y_1}\oint\rho\frac{u^2+v^2}{2}dxdy=\rho L\int_{-y_1}^{y_1}\frac{[u]^2}{2}dy+\rho L\int_{-y_1}^{y_1}\frac{[(u')^2+(v')^2]}{2}dy,$$

$$r(u,v)=\frac{[uv]-[u][v]}{\sqrt{[u^2]-[u]^2}\sqrt{[v^2]-[v]^2}}=\frac{[u'v']}{\sigma(u)\sigma(v)}, \qquad (П2.18)$$

$$\sqrt{[v^2]-[v]^2}$$

т. е. полная кинетическая энергия остается постоянной. Она является суммой средней зональной части, представленной первым членом справа, и незональной, или, так называемой, - турбулентной, части, - представленной величинами со штрихом. С течением времени может иметь место один из трех процессов:

а) Турбулентная часть уменьшается, зональная часть растет.

б) Турбулентная часть растет, зональная часть уменьшается.

в) Обе части энергии остаются постоянными.

Какой процесс будет иметь место в некоторый данный момент, зависит от решения, которое в свою очередь зависит от интегральных свойств системы, а также граничных и начальных условий. Чтобы сказать нечто большее об этих возможных обменах между зональной и турбулентной частями энергии, мы должны в некотором смысле вернуться назад и обсудить, как ведет себя количество движения системы.

Мы можем переписать уравнение движения (3) для зонального направления, раскрывая обыкновенную производную по времени и используя уравнение неразрывности, в форме

$$\frac{\partial\rho u}{\partial t}=-\left\{\frac{\partial}{\partial x}(\rho uu)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho uv)\right\}-\frac{\partial p}{\partial x}. \qquad (П2.19)$$

Как легко проверить, интегрирование уравнения по x и y приводит к результату, который показывает, что полное зональное количество движения из-за условия

периодичности по x и исчезновения v на стенках остается постоянным во времени. Мы можем записать этот факт следующим образом:

$$\rho L \int_{-y_1}^{y_1} [u]dy = \rho L \int_{-y_1}^{y_1} [u_0]dy = const, \qquad (П2.20)$$

где u_o - начальное значениеu. Таким образом, профиль $[u]$ ограничивает постоянную площадь, однако распределение импульса в направлении x между различными зонами внутри канала не имеет ограничений. Это позволяет профилю $[u]^2$ изменяться, в то время как условие

$$\rho L \int_{-y_1}^{y_1} \frac{[u]^2}{2} dy \qquad (П2.21)$$

может изменяться. Однако очевидно, что у этой кинетической энергии имеется нижний предел, который следует из (20) и достигается, когда $[u]$ не зависит от y.

Поскольку мы только что видели, что распределение ' x-компоненты количества движения по различным зонам определяет среднюю зональную кинетическую энергию, рассмотрим механизм, который может производить изменения в этом распределении. Разделим систему на две области, мысленно проведя линию, параллельную стенкам при $y = Y$. Проинтегрируем (19) по области между $-y_1$ и Y, т. е.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-y_1}^{Y} \oint \rho u dx dy = -\int_{-y_1}^{Y} \oint \frac{\partial \rho uv}{\partial y} dx dy = \oint_{Y} -\rho uv dx = \oint_{Y} -\rho u'v' dx, \qquad (П2.22)$$

где была использована периодичность при исключении производных по x.

Последний интеграл по периоду в (П2.22) дает скорость, с которой возрастает x-компонента количества движения области интегрирования, и представляет собой поток количества движения в поперечном направлении, создаваемый возмущениями u' и v' при $y = Y$. Величина – $[\rho u'v']$, определяемая этим интегралом, является напряжением Рейнольдса, или турбулентным напряжением, параллельным среднему течению. Эта величина, имеющая также вид - $[\rho uv]$, легко интерпретируется физически как поток импульса через единичную площадку (вертикальной поверхности при $y = Y$) и может быть выписана непосредственно.

Мы можем определить коэффициент линейной корреляции между u и v вдоль длины L при $y = Y$ формулой

$$r(u,v) = \frac{[uv] - [u][v]}{\sqrt{[u^2] - [u]^2}\sqrt{[v^2] - [v]^2}} = \frac{[u'v']}{\sigma(u)\sigma(v)},$$

откуда видно, что напряжение Рейнольдса, или ковариация u и v, есть числитель коэффициента корреляции. Здесь σ( ) означает дисперсию величины. Нельзя определить знак этой корреляции с помощью какого-нибудь простого правила, пока мы не найдем его из решения в случае теоретической модели или измерим по фактическим данным в случае реального течения.

Тот факт, что компоненты скорости в любой данный момент на замкнутой «широтной» линии или стенке в нашей системе должны быть коррелированы, позволяет заглянуть еще немного в природу переноса импульса. Последующее изложение поможет в существенных чертах прояснить этот процесс. Предположим для конкретности, что профиль $[u]$ имеет единственный максимум в середине канала, как показано в левой части рис. П2-2. Цель рисунка - показать линии тока, при которых осуществляется перенос импульса в сторону максимума среднего профиля, т. е., например, вверх через прямую $y = -y_1/2$. То, что это так, видно по стрелкам, показывающим скорости справа и слева от оси *ложбины,* т. е. линии, соединяющей точки максимальной кривизны линий

тока. Стрелки справа показывают большие положительные u и v, в то время как слева u близки к нулю, а v отрицательны. Полный эффект обмена жидкостью через линию $y = -y_1/2$ положителен, т. е. происходит перенос x-компоненты импульса вверх.

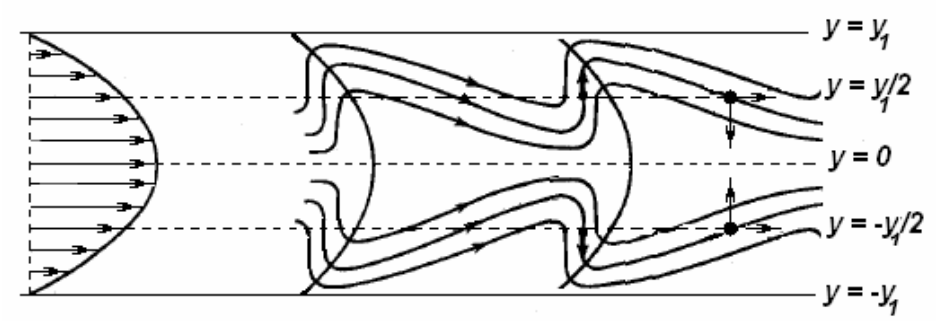


Рис. П2-2. Гипотетическое течение в канале шириной $2y_1$ показывающее конвергенцию потока импульса в средней части канала. Слева показан параболический профиль среднего течения. Возмущенные линии тока иллюстрируют типичную форму, приводящую к корреляции компонент скорости вдоль и поперек течения по длине канала. Стрелки при $y = -y_1/2$ и $y = +y_1/2$ помогают понять этот эффект.

При $y = +y_1/2$ все условия противоположны и поэтому тоже приводят к переносу импульса в сторону максимума среднего профиля скорости. Характерной особенностью, которую следует отметить, является изменение фазы возмущения по y, т. е. наклон оси ложбины. Оси ложбин, которые кажутся изогнутыми средним течением в форме, похожей на его профиль, переносят количество движения в сторону максимума скорости. Следовательно, в данном случае проявляется эффект отрицательной вязкости. Конечно, линии тока не обязательно должны быть гладкими и фактически могут иметь нерегулярный вид, однако если в статистическом смысле наклоны ложбин и корреляции существуют, то средний эффект должен быть похожим на то, что было показано выше.

Конечно, большинство реальных течений такого типа содержит случайные компоненты и, следовательно, является турбулентным. В общем случае возмущения не движутся со средним течением. Однако их движение непосредственно не входит в выражение для потока импульса.

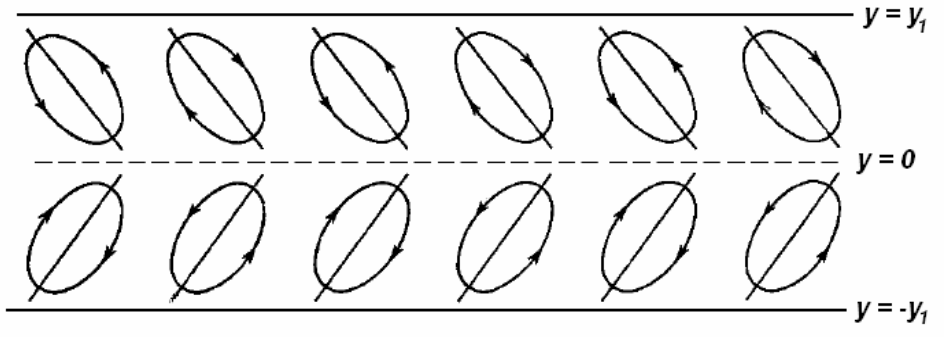


Рис. П2-3. Другое гипотетическое течение, переносящее импульс в центральную часть канала. Существенной особенностью течения являются эллиптические циркуляции с систематическим наклоном их главных осей. Следует заметить, что при полном обращении всех движений полный поток импульса к середине канала останется неизменным.

Имеются и другие, но в основном аналогичные примеры линий тока, которые осуществляют перенос импульса через канал. Так, в примере, показанном на рис. 4, осуществляется перенос импульса к середине канала, но, возможно, нет среднего течения (в этом случае последнее скоро возникнет - положительное в середине и отрицательное у стенок). Очевидно, снова будут иметь место корреляции скорости из-за эллиптичности замкнутых линий тока и наклонов их главных осей. Могут встречаться и комбинации течений, показанных на рис. П2-2 и П2-3, особенно с дополнительными турбулентными нерегулярностями.

Ясно, что возмущения, которые мы нарисовали в нашей модели и описали уравнениями, не являются акустическими или гравитационными волнами. Для простоты терминологии мы могли бы назвать их вихревыми возмущениями, так как эти движения характеризуются сохранением вихря в индивидуальных частицах.

Рассмотрим в канале узкую зону шириной δy. Импульс, приносимый в зону снизу, на нашем рисунке равен $+\rho[u'v']$, а выносимый вверх равен $\rho[u'v'] + \partial\{\rho[u'v']\}/\partial y \delta y$. Отсюда следует, что зона накапливает импульс со скоростью

$$-\frac{\partial}{\partial y}\rho[u'v']\delta y, \qquad (\text{П2.23})$$

равной полной ускоряющей силе, отнесенной к единице длины зоны. Умножив последнюю на $[u]$, мы получим работу этой силы при формировании кинетической энергии среднего потока. После интегрирования получаем

$$-\int_{-y_1}^{y_1}[u]\frac{\partial}{\partial y}\rho[u'v']dy = \int_{-y_1}^{y_1}\rho[u'v']\frac{\partial[u]}{\partial u}dy - \left|[u]\rho[u'v']\right|_{-y_1}^{y_1}, \qquad (\text{П2.24})$$

что дает скорость возрастания кинетической энергии в модели. Заметим, что в нашей модели наличие твердых стенок приводит к обращению в нуль граничных значений скорости. Следует отметить, что те зоны, в которых турбулентный перенос импульса происходит от малых к большим значениям скорости среднего течения, вносят вклад в возрастание полной кинетической энергии среднего потока. Таким образом, эффект отрицательной вязкости действует как фактор, формирующий энергию среднего течения, как того и следовало ожидать. Выражение в правой части (24) можно также получить умножением динамического уравнения движения по оси x в форме (19) на $[u]$, введением возмущений и интегрированием по рассматриваемой области.

Укажем теперь на недостатки нашей простой модели. Очевидно, что, поскольку полная кинетическая энергия должна оставаться постоянной, энергия среднего течения должна иметь своим источником турбулентную кинетическую энергию, как мы знаем из уравнения (П2.18). Отсюда следует, что эффекты отрицательной вязкости не могут доминировать в стационарном режиме, так как вся кинетическая энергия нерегулярных движений была бы скоро исчерпана. Точно так же средняя кинетическая энергия не может постоянно переходить в нерегулярные движения. Это подтверждается тем, что в подобной системе указанный поток энергии обычно регулярно или нерегулярно колеблется. В частных случаях возмущения могут сохраняться в качестве стационарных волн без приобретения или потери энергии.

Теперь можно указать, что в общем случае необходимо для поддержания квазистационарного режима в системе с преобладающим эффектом отрицательной турбулентной вязкости. Отвлекаясь от деталей, легко установить два необходимых условия:

а) Нерегулярные движения, которые переносят импульс против градиента среднего течения, должны иметь источник турбулентной кинетической энергии. Этим источником может быть преобразование других форм энергии (потенциальной, внутренней и т. д.) внутри вихрей, или она может переноситься от нерегулярных движений других масштабов, например меньших. В этом случае меньшие вихри должны получать энергию из других источников. Если таким источником в том или

другом из этих масштабов является тепловая энергия, то последняя также должна иметь соответствующий источник. Если система не является механически замкнутой, работа над нею могла бы производиться окружающей средой, с тем чтобы предотвратить затухание нерегулярных движений.

б) Среднее течение должно подвергаться некоторому виду торможения, чтобы не возрастать беспредельно. Это торможение могло бы быть истинной положительной (например, молекулярной) вязкостью, создающей потерю кинетической энергии среднего течения и утечку, импульса в дно сосуда, содержащего жидкость, или другое аналогичное механическое действие. Оно может быть также немеханическим, например магнитным. В случае электропроводящей жидкости среднее течение может тормозиться напряжениями Максвелла, для преодоления которых жидкость совершает работу наподобие динамо машины, создавая электрические токи. Здесь генерируемая магнитная энергия должна в квазистационарном режиме диссипироваться в джоулево тепло, а тепло должно излучаться или отводиться.

Очевидно, что в случае системы, в которой нерегулярные движения возбуждаются термически, тепло, диссипируемое средним течением посредством трения или производимое гидромагнитным эффектом, не может быть использовано для возбуждения таких движений - это противоречило бы второму закону термодинамики.

Из сказанного вытекает, что стационарные эффекты отрицательной вязкости должны обнаруживаться в очень сложных системах, в частности таких, где жидкость термодинамически активна или вихри возбуждаются извне. Но такие сложные системы движений жидкости в изобилии встречаются в природе. Поэтому, не подозревая о возможном или вероятном существовании аномальных эффектов турбулентной вязкости в таких системах, мы не смогли бы сформулировать адекватное представление об их функционировании.

Добавим также, что в отличие от случая молекулярной вязкости отсюда вытекает следующее общее положение: дифференциальные свойства статистических характеристик турбулентности не могут быть рациональным путем связаны с дифференциальными свойствами среднего течения. Прежде всего, граничные условия для всей системы оказывают большое влияние на ее поведение, и мы могли бы сказать, что статистические эффекты в данной точке зависят от интегралов по пространству и времени. Также существенно, что, по крайней мере, в консервативной системе происходящее зависит от начальных условий.

Приложение 3. Ударные волны в твердом теле.

1. Ударная волна (УВ). УВ - это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. Ударные волны называют также сильными разрывами или скачками. Причины возникновения ударных волн в газах — полеты со сверхзвуковыми скоростями (звуковой удар), истечения с большими скоростями через сопла, мощные взрывы, электрические разряды, интенсивное горение.

Ударные волны являются частью детонационных волн, волн конденсации (хорошо известным примером этого явления служат шлейфы тумана, остающиеся за самолетом при пролете через участки атмосферы с повышенной влажностью), могут возникать при взаимодействии лазерного излучения с веществом (светодетонационные волны). Сход снежной лавины также может рассматриваться как ударная волна.

В твердых телах ударные волны возникают при высокоскоростном соударении тел, в астрофизических условиях — при взрывах звезд.

Введение понятия ударной волны приписывают немецкому ученому Б. Риману.

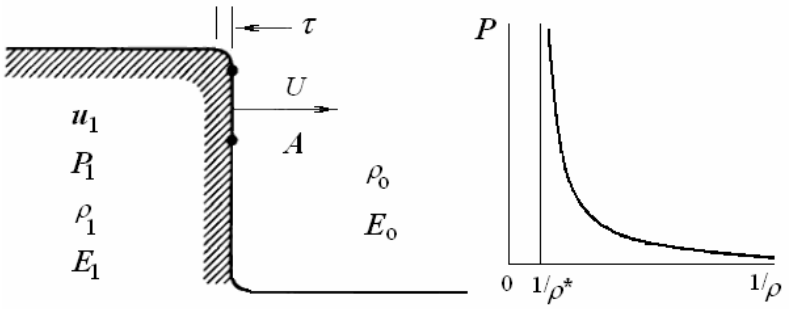


Рис. П3-1. Фронт ударной волны (слева). Адиабата Гюгонио (справа).

2. Условия на фронте ударной волны. При переходе через ударную волну должны выполняться общих законов сохранения массы, импульса и энергии. Соответствующие условия на поверхности волны — непрерывность потока вещества, потока импульса и потока энергии:

$$\rho_0 u_0 = \rho_1 u_1,\quad p_0 + \rho_0 u_0^2 = p_1 + \rho_1 u_1^2,\quad h_0 + \frac{u_0^2}{2} = h_1 + \frac{u_1^2}{2} \qquad (П3.1)$$

(ρ - плотность, u — скорость, p — давление, h - энтальпия, теплосодержание) газа. Индексом "0" отмечены параметры газа перед ударной волной, индексом "1" — за ней. Эти условия носят название условий Ренкина — Гюгонио, поскольку первыми из опубликованных работ, где были сформулированы эти условия, считаются работы британского инженера Вильяма Ренкина (1870) и французского баллистика Пьера Анри Гюгонио (1889).

Условия Ренкина — Гюгонио позволяют получить давление и плотность за фронтом ударной волны в зависимости от начальных данных (интенсивности ударной волны и давления и плотности перед ней):

$$\begin{aligned} &\rho_1 = \rho_0 (U - u_0)/(U - u_1), \\ &P_1 - P_0 = \rho_0 (u_1 - u_0)(U - u_0), \\ &E_1 - E_0 = \frac{(P_1 + P_0)(1/\rho_0 - 1/\rho_1)}{2} = \frac{1}{2}(u_1 - u_0)^2, \end{aligned} \qquad (П3.2)$$

$$h_0 - h_1 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_1}\right)(p_1 - p_0) = 0 \qquad (П3.3)$$

h — энтальпия газа (функция ρ и p). Эта зависимость носит название адиабаты Гюгонио, или ударной адиабаты (рис. П3-1).

Фиксируя на адиабате точку, соответствующую начальному состоянию перед ударной волной, получаем все возможные состояния за волной заданной интенсивности. Состояниям за скачками сжатия отвечают точки адиабаты, расположенные левее выбранной начальной точки, за скачками разрежения — правее.

Анализ адиабаты Гюгонио показывает, что давление, температура и скорость газа после прохождения скачка сжатия неограниченно возрастают при увеличении интенсивности скачка. В это же время плотность возрастает лишь в конечное число раз, сколь бы ни была велика интенсивность скачка. Количественно увеличение плотности зависит от молекулярных свойств среды, для воздуха максимальный рост 6 раз. При уменьшении амплитуды УВ она вырождается в слабый (звуковой) сигнал.

3. Скачки разрежения. В воздухе наблюдаются только скачки уплотнения. В этом случае по отношению к среде перед ее фронтом ударной волны движется со скоростью, превышающей скорость звука в этой среде, по среде за ее фронтом волна движется с дозвуковой скоростью. Звуковые волны могут нагнать ударную волну сзади, сама же волна надвигается бесшумно. Привлечение законов термодинамики позволило теоретически обосновать это свойство ударных волн для сред с обычными термодинамическими свойствами (теорема Цемплена). Однако, в средах со специальными термодинамическими свойствами скачки разрежения возможны: известны скачки такого рода в средах с фазовыми переходами, например, пар - жидкость.

4. Структура ударной волны. Типичная ширина ударной волны в воздухе 10^{-4} мм (порядка нескольких длин свободного пробега молекул). Малая толщина такой волны дает возможность во многих задачах считать ее поверхностью разрыва. Но в некоторых случаях имеет значение структура ударной волны. Такая задача представляет и теоретический интерес. Для слабых ударных волн хорошее согласие эксперимента и теории дает модель, учитывающая вязкость и теплопроводность среды. Для ударных волн достаточно большой интенсивности структура должна учитывать (последовательно) стадии установления термодинамического равновесия поступательных, вращательных, для молекулярных газов еще и колебательных степеней свободы, в определенных условиях — диссоциацию и рекомбинацию молекул, химические реакции, процессы с участием электронов (ионизацию, электронное возбуждение).

Контактные разрывы. Ударные волны следует отличать от контактных разрывов, также являющихся поверхностями раздела сред с различными плотностями, температурами и, может быть, скоростями. Но, в отличие от ударных волн, через контактный разрыв нет протекания вещества и давление с обеих его сторон одинаково. Контактные разрывы называют также тангенциальными.

5. Распад произвольного разрыва. Поверхность произвольного разрыва, разделяющая две области среды с заданными давлением, плотностью, скоростью, в последующие моменты времени в общем случае перестает существовать (распадается). В результате такого распада может возникнуть две, одна или ни одной ударной волны, а также волны разрежения (являющиеся непрерывными) и контактный разрыв, что может быть рассчитано по начальным данным. Решение этой задачи впервые было сообщено Н.Е.Кочиным (доклад 1924 на первом международном конгрессе по прикладной механике в г. Дельфте (Нидерланды), опубликовано в 1926).

6. Выход ударной волны на свободную поверхность тела (Зельдович, Райзер, 1966)**.**

Когда ударная волна, распространяющаяся по твердому телу, выходит на свободную поверхность, сжатое вещество расширяется, или, как говорят, разгружается практически до нулевого давления. Волна разгрузки (разрежения) бежит назад по веществу со скоростью звука, соответствующей состоянию за фронтом ударной волны, а само разгружающееся вещество приобретает дополнительную скорость в направлении первоначального движения ударной волны. Если тело граничит не с вакуумом, а с воздухом, то движущаяся граница разгруженного вещества играет по отношению к воздуху роль поршня и «толкает» впереди себя воздушную ударную волну. Поэтому, строго говоря, вещество разгружается не до нулевого давления, а до давления в воздушной ударной волне. Однако это давление, которое по сравнению с атмосферным может быть большим, столь мало по сравнению с начальным давлением в твердом теле, сжатом ударной волной, что- им всегда можно пренебречь и считать, что разгрузка в воздух не отличается от разгрузки в вакуум. Амплитуда ударной волны в воздухе определяется при этом скоростью «поршня», т. е. скоростью разгруженного твердого вещества.

В дальнейшем будут рассмотрены *не очень сильные ударные волны*, которые сообщают твердому веществу энергию, недостаточную для его плавления, а тем более испарения, так что конечное состояние вещества после разгрузки предполагается твердым. При этом конечный объем разгруженного вещества V_x мало отличается от нормального объема твердого тела V_o. В то же время будем считать ударную волну и не слишком слабой, так, чтобы можно было пренебречь эффектами, связанными с прочностью» твердого тела. Давление в теле, сжатом ударной волной, предполагаем изотропным, как в газе или жидкости. Это справедливо, когда давление велико по сравнению с пределом прочности, критическим напряжением сдвига и т. д. Скорость звука при этом определяется сжимаемостью вещества, модулем всестороннего сжатия, точно так же как в газе и жидкости. В противном случае разгрузка описывается формулами теории упругости, о чем будет сказано в дальнейшем.

Пусть по твердому телу распространяется плоская ударная волна постоянной амплитуды (давление p, массовая скорость u, объем V, который лишь немного меньше нормального объема V_o). В определенный момент времени волна выходит на свободную поверхность, которую считаем параллельной поверхности фронта ударной волны. Не слишком сильная ударная волна, в которой сжатие мало, $Vo - V << V_o$, не отличается от акустической волны сжатия и описывается формулами акустики. Она распространяется по телу со скоростью звука c_o. Давление в ней связано с массовой скоростью соотношением $p = \rho_o c_o u$ ($\rho_o = 1/V_o$). Начиная с момента t = О выхода ударной волны на свободную поверхность, по телу назад распространяется волна разгрузки, которая также является акустической. Она бежит по веществу со скоростью звука (мало отличающейся от скорости звука в нормальных условиях c_o). Давление в волне падает от начального p до нуля, а вещество приобретает скорость u', связанную с изменением давления $\Delta p = - p$ акустической формулой $u' = \dfrac{\Delta p}{\rho_0 c_0} = \dfrac{p}{\rho_0 c_0}$ (рис. П3-2); плотность уменьшается немного: конечная плотность ρ’ мало отличается от нормальной плотности твердого тела: ($V_1 - V_o << V_o$). Из сопоставления формул $p = \rho_o c_o u$ и $u' = p/ \rho_o c_o$ видно, что дополнительная скорость, приобретаемая веществом при разгрузке и', равна массовой скорости в ударной волне и, т. е. при выходе не слишком сильной ударной волны на свободную поверхность скорость вещества удваивается: $u_1 = u + u' \approx 2u$.

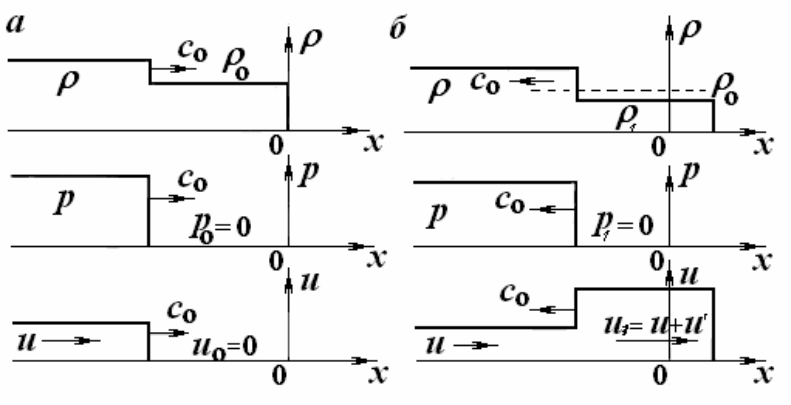


Рис. П3-2. Профили плотности, давления и скорости при выходе не сильной ударной волны на свободную поверхность. а) до момента выхода $t < 0$; б) после момента выхода $t > 0$.

Правило удвоения скоростей можно получить и из общих уравнений для ударной волны и волны разрежения, если перейти в них к предельному случаю малых амплитуд волн.

Из газодинамики известно, что дополнительная скорость, приобретаемая веществом при разгрузке от начального давления p до конечного $p_1 = 0$, равна:

$$u' = \int_0^p \frac{dp}{\rho c} = \int_0^p \left(-\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S^{\frac{1}{2}} dp = \int_V^{V_1} \left(-\frac{\partial p}{\partial V} \right)_S^{\frac{1}{2}} dV,$$

$$u' = \int_0^p \frac{dp}{\rho c} = \int_0^p \left(-\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S^{\frac{1}{2}} dp = \int_V^{V_1} \left(-\frac{\partial p}{\partial V} \right)_S^{\frac{1}{2}} dV, \qquad \text{(П3.4)}$$

где производные в силу адиабатичности процесса разгрузки берутся при постоянной энтропии, равной энтропии во фронте ударной волны. Начальная массовая скорость вещества в ударной волне в силу законов сохранения равна:

$$u = \sqrt{p(V_o - V)}. \qquad \text{(П3.5)}$$

В ударной волне небольшой амплитуды, где изменение энтропии мало, сжатие также невелико; в первом приближении приращение объема можно представить в виде:

$$V - V_0 = \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S p,$$

подразумевая под S энтропию исходного состояния вещества до сжатия ударной волной. Тогда массовая скорость в ударной волне равна:

$$u \approx \left(-\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S^{\frac{1}{2}} p \approx \frac{p}{\rho_o c_0}.$$

В том же приближении можно пренебречь изменением адиабатической сжимаемости в диапазоне давлений от 0 до p и в формуле для u' считать производную постоянной. Получим:

$$u' = \int_0^p \left(-\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S^{\frac{1}{2}} dp \approx \left(-\frac{\partial V}{\partial p} \right)_S^{\frac{1}{2}} p \approx \frac{p}{\rho_0 c_0} \approx u. \qquad \text{(П3.6)}$$

Уолш и Христиан из весьма общих соображений установили верхний и нижний пределы для возможных вариаций величины дополнительной скорости u' и нашли, что при давлениях $p \sim 4 \cdot 10^5$ атмосфер для целого ряда металлов правило удвоения скоростей

справедливо с точностью до 2%. Как показала экспериментальная проверка, правило удвоения скоростей для железа выполняется приближенно вплоть до весьма высоких давлений ~$1{,}5\cdot10^6$ атм.

Вообще говоря, отклонение от правила удвоения скоростей тем больше, чем выше амплитуда ударной волны. Примем теперь во внимание, что ударная волна, даже слабая, не является акустической, и энтропия в ней повышается. При этом в первом приближении, по-прежнему считаем, что дополнительная скорость после разгрузки u' равна u, а плотность и температуру в конечном состоянии рассматриваем в следующем приближении.

При адиабатической разгрузке тела до начального, нулевого давления, оно оказывается нагретым и расширенным по сравнению с исходным состоянием, до сжатия ударной волной. Легко найти энергию необратимого нагревания и конечную температуру разгруженного вещества T_i, если известны термодинамические функции и начальное состояние в ударной волне. Для этого следует воспользоваться уравнением адиабаты разгрузки $d\varepsilon + pdV = 0$, согласно которому, конечная энергия ε_1 равна:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon - \int_V^{V_1} (pdv)_S. \qquad (П3.7)$$

Поскольку энергия в ударной волне есть $\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{1}{2}p(V_0 - V),$ необратимое приращение энергии после разгрузки равно: $\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{1}{2}p(V_0 - V),$

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_0 = \frac{1}{2}p(V_0 - V) - \int_V^{V_1} (pdV)_S. \qquad (П3.8)$$

Если по плоской пластине распространяется ударная волна, за"фронтом которой давление и скорость не постоянны, а падают, например, импульс сжатия треугольной формы, то после выхода такой волны на свободную поверхность тела может произойти откол. Явление откола заключается в следующем. После отражения волны сжатия от свободной поверхности профиль давления в теле образуется в результате сложения двух волн: падающей - волны сжатия и отраженной - волны разгрузки. В акустическом приближении:

$$p = \rho c\left[f_1(x - ct) + f_2(x + ct)\right],$$

где функция f_1 описывает падающую волну, которая распространяется со скоростью звука вправо, а f_2 — отраженную волну, распространяющуюся влево. В данном случае функция f_1 отвечает треугольному профилю давления. Функцию f_2 можно установить, исходя из граничного условия — равенства нулю давления на свободной поверхности. Функции f_1 и f_2, а также составленные из них распределения давления в теле в момент выхода ударной волны на свободную поверхность и в два последующих момента времени изображены на рис.3.20. Если координата свободной поверхности есть x_1 (рис. 3-21), то область $x > x_1$ соответствует пустоте и определение функций f_1 и f_2 в области $x > x_1$ является чисто формальным. Физически реальными являются лишь значения f_1 и f_2 и давления при $x < x_1$ т. е. в теле. Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, функции f_1 и f_2 при $x > x_1$ на рис. 3-19 - показаны пунктиром.

Из рис. П3-2 видно, что после отражения волны сжатия от свободной поверхности в теле возникают отрицательные давления, т. е. на тело действует растягивающее усилие. Если растягивающее напряжение превышает предел прочности вещества на разрыв, то в соответствующем месте тела происходит разрыв, «откол»: от поверхности тела откалывается пластинка материала и отделяется от остального тела, отлетая от

поверхности с определенной скоростью. Так, например, сталь при импульсивных нагрузках разрушается при усилиях порядка 30 000 кГ/см^2.

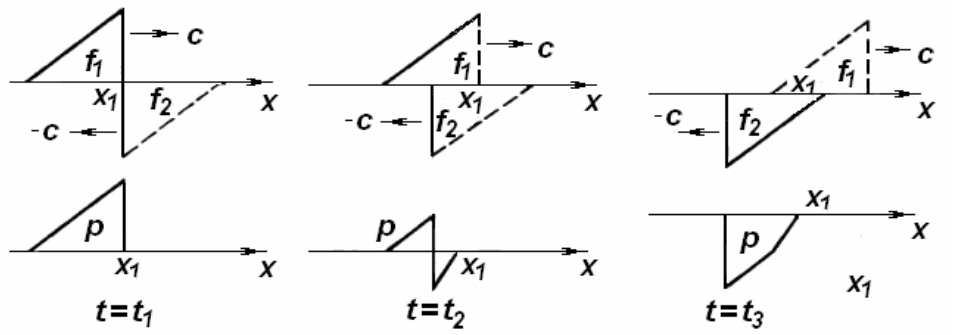


Рис. П3-3. Отражение акустической волны сжатия треугольного профиля от свободной поверхности. $t = t_1$относится к моменту выхода переднего фронта волны на свободную поверхность; $t = t_2$ и $t = t_3$ относятся к последующим моментам.

7. Ударные адиабаты в твердом теле. Законы сохранения массы и импульса связывают между собой четыре параметра фронта ударной волны: скорость распространения ударной волны по невозмущенному веществу D, скачок массовой скорости u, равный скорости движения сжатого вещества относительно невозмущенного, давление p и удельный объем V (или плотность $\rho = 1/V$):

$$\frac{V_0}{V} = \frac{D}{(D-u)}, p = \frac{Du}{V_0}. \qquad (П3.9)$$

Если измерить на опыте скорости D и u, то по этим формулам можно найти давление и объем, а затем, воспользовавшись уравнением энергии,
вычислить удельную внутреннюю энергию ε.

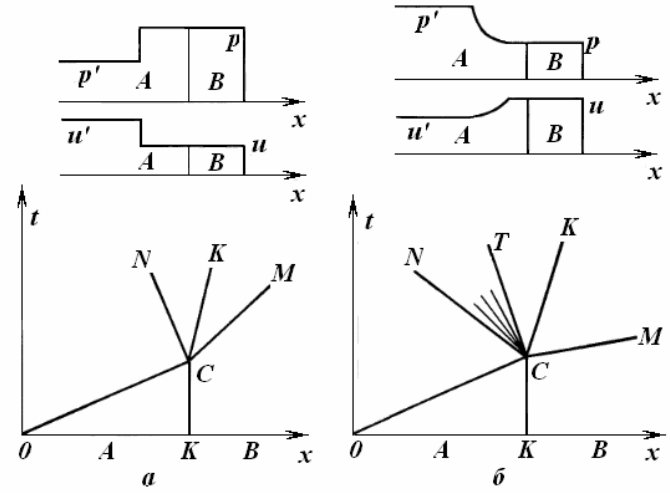


Рис. П3-4. Профили давления и скорости и x, t-диаграмма для опыта с отражением.
а) Случай, когда отраженная волна - ударная. ОС - ударная волна в А; СМ - ударная волна в J3; CN - отраженная ударная волна в А; КСК - линия контакта А и В. б) Случай, когда отраженная волна - волна разрежения. ОС - ударная волна в А; СМ - ударная волна в В; CN - голова волны разрежения; СТ - хвост волны разрежения; КСК - линия контакта А и В.

Таким образом, задача отыскания всех механических параметров фронта ударной волны сводится к экспериментальному определению каких-либо двух из них, в частности наиболее доступных для измерения кинематических параметров: скоростей D и u. Скорость фронта D можно измерить на опыте сравнительно просто, регистрируя моменты

прохождения фронта ударной волны через известные координатные точки, отстоящие друг от друга на заданном расстоянии. Измерить столь же непосредственным образом скачок массовой скорости и экспериментально гораздо труднее, поэтому для отыскания второго параметра прибегают к различным косвенным методам, привлекая для этой цели те или иные механические соображения.

Воспользуемся методом «отражения». В этом методе используются закономерности, которым подчиняется процесс распада произвольного разрыва, возникающего при отражении ударной волны от границы двух сред.

Рассмотрим переход сильной ударной волны из среды А в среду В. По веществу В при этом всегда идет ударная волна, отраженная же волна в А может быть либо ударной, если вещество В «жестче», чем А, либо волной разрежения, если В «мягче», чем А (это проще всего себе представить, если рассмотреть такие предельные случаи: А - газ, В - твердое тело и А - твердое тело, В - газ). Профили скоростей и давлений в обоих случаях изображены на рис. П3-4. Там же даны соответствующие диаграммы *x, t*.

Рассмотрим этот процесс с помощью диаграммы давление - скорость (в исходном состоянии оба вещества, А и В, покоятся в лабораторной системе координат).

Предположим, что уравнение состояния вещества А известно. Изобразим на *p*, *u*-диаграмме (рис. П3-5) ударную адиабату вещества А $p_A(u)$ для первой ударной волны, распространяющейся по невозмущенному материалу. Если измерить на опыте скорость фронта начальной ударной волны D_1, то состояние в ней изобразится точкой *a* (p_a, u_a) - точкой пересечения прямой $p = D_1 u/V_{0A}$ с ударной адиабатой p_A (*u*).

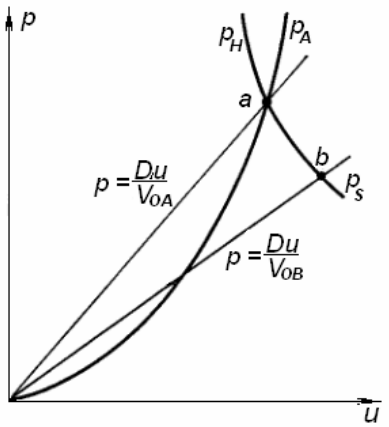


Рис. П3-5. *p,u* - диаграмма для опыта с отражением.

После отражения этой ударной волны от границы между средами А и В в веществе А возникает новое состояние. Если отраженная волна ударная, то состояние лежит на ударной адиабате вторичного сжатия, для которой исходным является состояние *a* (p_a, V_a, u_a); эта ударная адиабата изображается кривой $p_н$, выходящей вверх из точки *a*.

Если же отраженная волна - адиабатическая волна разрежения, то новое состояние лежит на изэнтропе разрежения, идущей из точки *a* вниз (кривая p_s). Поскольку уравнение состояния вещества А предполагается известным, то как ударную адиабату вторичного сжатия $p_н$ (V, V_a, p_a), так и изэнтропу разрежения с энтропией, равной $S_a = S$ (p_a, V_a), можно преобразовать так, чтобы вместо объема в качестве аргумента вошла скорость. В первом случае это делается путем использования соотношений на фронте ударной волны, во втором с помощью соотношений, справедливых для волны разрежения.

Если измерить на опыте и скорость ударной волны *D* в среде В, то геометрическим местом состояний в этой волне служит прямая $p = Du/V_{0B}$. Точка пересечения *b* этой прямой с кривой $p_H a p_s$ - геометрическим местом возможных состояний в веществе А

после отражения ударной волны - и определяет давление и скорость в ударной волне в В, равные давлению и скорости контактной границы А и В (см. рис. П3-4).

На диаграмме *p*, *u* рис. 3-23 изображен второй случай, когда при отражении возникает волна разрежения. В первом случае прямая $p = Du/V_{0B}$ проходит выше прямой $p = D_1 u/V_{0A}$ и точка пересечения *b* лежит выше точки *a* на ударной адиабате вторичного сжатия вещества А, которая описывается кривой $ap_н$.

Отсюда, между прочим, видно, какой величиной характеризуется «жесткость» вещества. Предположим, что ударные волны не очень сильные и их скорости близки к скоростям звука: $D \approx c_B$, $D_1 \approx c_A$. Вещество В жестче, чем А, и отраженная волна - ударная, если $c_B/V_B > c_A/V_A$ или $\rho_B c_B > \rho_A c_A$. Величину ρc называют иногда акустическим импедансом. Она определяет связь давления и скорости в акустической или слабой ударной волне: $p = \rho c u$.

8. Расщепление волн сжатия и разгрузки. Посмотрим, что реально происходит, если к поверхности плоского тела в начальный момент приложить постоянное давление *p*. Будем считать давление достаточно малым для того, чтобы деформация линейно зависела от давления, т. е. подчинялась закону Гука.

Нарисуем диаграмму *p, V* для состояния сжатого вещества за фронтом волны. Учитывая «неизотропность» давления в случае слабых деформаций, будем вместо давления оперировать нормальной составляющей напряжения, действующей на площадку, параллельную поверхности фронта волны, σ_{zz}, если волна распространяется вдоль оси *z*. По оси абсцисс будем откладывать удельный объем тела. При малых деформациях и давлениях состояние описывается законом Гука, который, можно переписать в виде:

$$\sigma_{zz} = \frac{\Delta V}{V}\rho c_l^{\,2}, \sigma_{zz} < p_{кр.} \qquad (П3.10)$$

Когда давление превышает критическое $p_{кр}$, а изменение объема превышает $\Delta V_{кр}/V = p_{кр}/\rho c_l^2$, тело становится текучим и наклон прямой σ_{zz} (ΔV) меняется. В этой области имеем

$$\sigma_{zz} = \frac{\Delta V}{V}\rho c_0^{\,2} + const, \sigma_{zz} > p_{кр.} \qquad (П3.11)$$

Диаграмма σ_{zz}, *V* изображена на рис. П3-5.

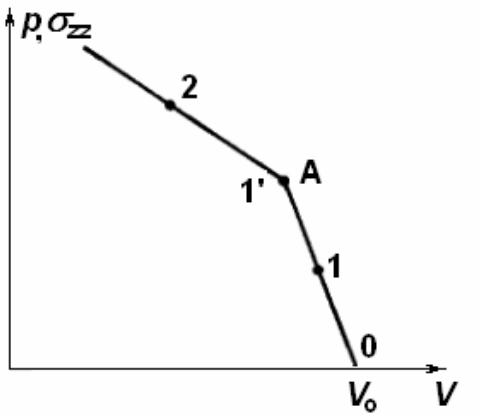


Рис. П3-6. Диаграмма напряжение (давление) — объем.

Если внешнее давление $p < p_{кр}$, по телу побежит одна «упругая» волна сжатия со скоростью c_l (рис. П3-6,а; состояние 1 на диаграмме σ_{zz}, *V* рис. П3-5). Если же

приложенное давление $p > p_{кр}$, то в теле окончательно достигается состояние 2 на диаграмме σ_{zz}, V. Однако в этом случае по телу бежит уже не одна, а две волны: «упругая» с амплитудой $p_{кр}$ и состоянием за фронтом 1', а вслед за нею «пластическая» с состоянием за фронтом 2 (см. рис. 3-25,6). Поскольку $c_0 < c_l$, пластическая волна не догоняет упругую, так что комбинация двух волн устойчива. Пластическая волна бежит по чуть сжатому веществу, которое движется со скоростью $u_{кр} = p_{кр}/\rho c_l$. Эта скорость весьма мала, например, в железе сжатие в упругой волне равно ΔVкр$/V = 5\cdot10^{-4}$, а скорость $u_{кр}$ = 3,6 м/сек. Массовая скорость в пластической волне равна $u' = \dfrac{p - p_{кр}}{\rho c_0}$ относительно вещества, движущегося в упругой волне, и $u' + u_{кр}$ относительно невозмущенного вещества.

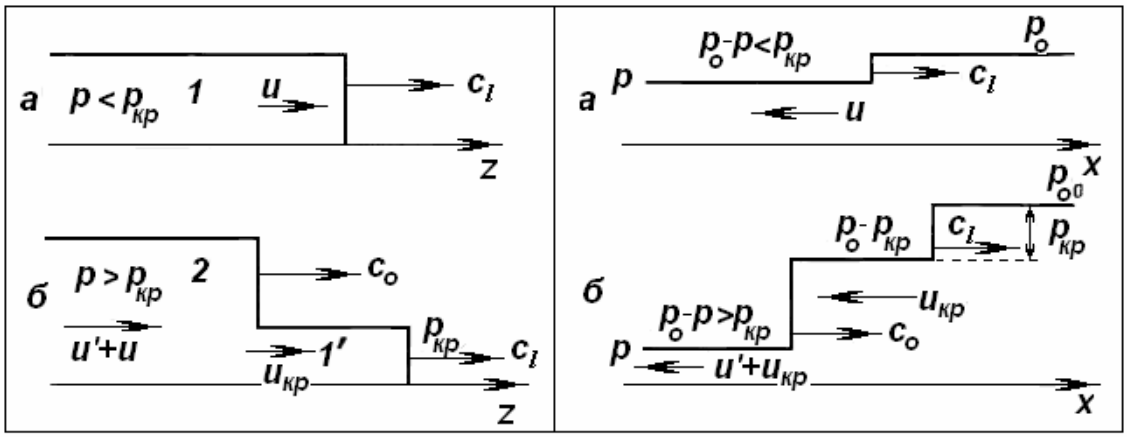


Рис. П3-7. Два случая распространения акустической волны сжатия: а) одна упругая волна; б) система пластической и упругой волн.

Рис. П3-26. Два случая распространения акустической волны разгрузки:
а) одна упругая волна; б) система пластической и упругой волн.

Если рассматривать волны сжатия большой амплитуды, а тем более ударные волны с давлениями в сотни тысяч атмосфер и выше, то эффектами предварительного сжатия вещества упругой волной до одной - двух тысяч атмосфер и разгона его до скорости порядка нескольких метров в секунду пренебречь, считая, что пластическая волна распространяется по неподвижному невозмущенному веществу со скоростью, соответствующей сжимаемости c_0.

Ударные волны достаточно большой амплитуды распространяются со скоростью, заметно превышающей c_0. Если скорость ударной волны $D > c_l$, то расщепления волн вообще не происходит: ударная волна как бы с самого начала бежит скорее упругой и слита с нею в одну волну.

Расщепление волн на упругую и пластическую происходит и в случае достаточно сильной разгрузки предварительно сжатого вещества. Пусть вещество разгружается от давления p_0 до давления p (например, сначала по телу путем сжатия его поршнем была запущена волна сжатия с давлением p_0, а затем через какое-то время давление на поршне падает до величины p). Если $p_0 - p < p_{кр}$, по сжатому веществу бежит одна упругая волна разгрузки со скоростью c_l. Если же $p_0 - p > p_{кр}$, то впереди бежит упругая волна разгрузки, в которой давление падает от pо до $p_o - p_{кр}$, а вслед за нею с меньшей скоростью распространяется пластическая волна разгрузки, в которой давление падает до величины p, равной давлению на «поршне» (в частности, если поршень вообще «убирается», p может быть равным нулю). Эти два случая показаны на рис. П3-26. Явление расщепления волны разгрузки на две наблюдалось экспериментально.

9. Переход твердого тела в текучее состояние. Одним из характерных свойств твердого тела, отличающим его от жидкости, является устойчивость формы твердого тела, сопротивляемость по отношению к сдвигу. В жидкости отсутствует сопротивление по отношению к сдвигу, жидкость с легкостью принимает любую форму, лишь бы при этом не менялся ее объем (плотность). Касательные, сдвиговые напряжения в жидкости отсутствуют в статическом состоянии. Они возникают только в момент изменения формы и зависят не от самих деформаций, а от скорости их изменения.

Жидкость характеризуется нулевым модулем сдвига $G = 0$. Формально при $G = 0$ коэффициент Пуассона $\sigma = 1/2$. Тензор напряжений при этом в любой системе координат диагонален, причем все три нормальные компоненты его одинаковы и равны «гидростатическому» давлению, которое «изотропно». Упругие свойства жидкости характеризуются только ее сжимаемостью или модулем всестороннего сжатия.

Известно, что при достаточно больших нагрузках, не сводящихся к всестороннему сжатию, твердое тело меняет свои упругие свойства и становится пластичным, текучим, в некотором отношении подобным жидкости.

Текучее состояние твердого тела характеризуется не полным отсутствием касательных напряжений, как в жидкости, но отсутствием возрастания касательных напряжений при возрастании сдвиговых деформаций. Начиная с некоторых критических сдвиговых деформаций и напряжений, твердое тело перестает сопротивляться дальнейшему увеличению сдвига.

Модуль сдвига G можно определить как коэффициент пропорциональности между касательным напряжением при чистом сдвиге σ_{xz} и сдвиговой деформацией - τ. В силу линейности зависимости напряжения и деформации при этом одновременно пропорциональны и приращения деформации и напряжения: $\sigma_{xz} = G\Theta$, $d\sigma_{xz} = Gd\Theta$, при чистом сдвиге на угол Θ.

В текучем состоянии твердого тела, после того как сдвиг Θ и напряжение σ_{xz} станут больше критических $\Theta_{кр}$, $\sigma_{кр}$, дальнейший рост напряжения при увеличении деформации прекращается (или резко замедляется). Если формально определить модуль сдвига в этом состоянии как коэффициент пропорциональности между приращениями $d\sigma_{xz}$ и Θ, но не между самими величинами σ_{xz} и Θ, то его следует положить равным нулю.
Рассмотрим одностороннее сжатие нетекучего и текучего тел. Пусть тело цилиндрической формы заключено в цилиндрический сосуд с жесткими стенками и сжимается поршнем вдоль оси. Оценим, как меняется при этом расположение атомов тела. Решетку считаем для простоты кубической. Если тело нетекучее, то межатомные расстояния в направлении оси сокращаются, а в поперечных направлениях остаются неизменными; при этом атомы остаются на «своих местах». Если же тело текучее, то сокращаются все межатомные расстояния, происходит перестройка решетки, такое перераспределение атомов, что решетка и в сжатом состоянии остается кубической.

Первый случай содержит в себе элемент сдвига. При деформации нетекучего тела. ряды атомов не сдвинуты по отношению друг к другу, как и в недеформированном состоянии. При деформации тело приобретает упругую энергию за счет работы внешних сил, производящих деформацию. Если тело нетекучее, эта энергия связана как с изменением объема, так и со сдвигом. При данном объеме упругая энергия минимальна, если сжатие всестороннее и сдвиговых деформаций нет. Поэтому при одностороннем сжатии нетекучего тела до данного объема тело находится в неравновесном состоянии. Равновесное состояние при данном объеме соответствовало бы всестороннему сжатию, т. е. перестроенной кристаллической решетке.

Для перестройки решетки нужна «энергия активации», атомам нужно преодолеть потенциальные барьеры. При небольших нагрузках перестройки не происходит, твердое тело ведет себя по отношению к деформации как нетекучее.

Однако при достаточно больших нагрузках твердое тело утрачивает свою «жесткость», нетекучесть и уподобляется жидкости, т. е. приобретает способность перестраиваться таким образом, чтобы энергия его при данном объеме была минимальной.

В частности, при одностороннем сжатии тела это случается, когда касательное напряжение в плоскости, наклоненной под углом 45° к направлению сжимающего усилия, превышает предел — критическое напряжение сдвига $\sigma_{кр}$.

Оценим величину сжимающего усилия $\sigma_{x'z'}$.

$$\sigma_{x'z'} = \frac{1}{2}(\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) = \frac{1}{2}\frac{1-2\sigma}{1-\sigma}\sigma_{zz} = \frac{1}{2}\frac{1-2\sigma}{1-\sigma}p, \qquad (П3.12)$$

найдем критическую сжимающую нагрузку $p_{кр}$, выше которой происходит переход тела в текучее состояние:

$$p_{кр} = \frac{1-\sigma}{1-2\sigma}2\sigma_{кр}. \qquad (П3.13)$$

В отличие от термодинамических констант вещества (модуля Юнга или сжимаемости), критическое напряжение сдвига, как величина, характеризующая прочность, сильно зависит от обработки металла, примесей и т. д. Для железа примерно $\sigma_{кр}$ = 600 бар, $p_{кр}$ = 1900 бар.

Рассмотрим одностороннее сжатие тела в направлении z под действием сжимающего усилия p. В поперечных направлениях x, y деформаций нет (стержень зажат сбоку). Будем формально описывать переход из нетекучего в текучее состояние, полагая в законе пропорциональности между приращениями напряжения и деформации модуль сдвига равным нулю при нагрузках, превышающих критическую, при $p = \sigma < p_{кр}$:

$$\sigma_{zz} = \left(K + \frac{4}{3}G\right)\frac{\Delta L}{L}, \frac{d\sigma_{zz}}{d(\Delta L/L)} = K + \frac{4}{3}G,$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \left(K - \frac{2}{3}G\right)\frac{\Delta L}{L}, \frac{d\sigma_{xx}}{d(\Delta L/L)} = K - \frac{2}{3}G, \qquad (П3.14)$$

$$\sigma_{x'z'} = \frac{1}{2}(\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) = G\frac{\Delta L}{L}, \frac{d\sigma_{x'x'}}{d(\Delta L/L)} = G.$$

После того как нагрузка достигла критической величины, положим в формулах для производных от напряжений (но не в формулах для самих напряжений) $G = 0$. Получим при $p > p_{кр}$:

$$\frac{d\sigma_{zz}}{d(\Delta L/L)} = \frac{d\sigma_{xx}}{d(\Delta L/L)} = K, \frac{d\sigma_{x'x'}}{d(\Delta L/L)} = 0. \qquad (П3.15)$$

Нормальные напряжения σ_{zz}, σ_{xx}, σ_{yy} растут теперь одинаково в соответствии с модулем всестороннего сжатия (при одностороннем сжатии $\Delta L/L = \Delta V/V$). Касательное напряжение в наклонной плоскости остается неизменным и равным $\sigma_{x'z'} = \sigma_{кр}$ (критическая реформация равна $(\Delta L/L)_{кр} = \sigma_{кр}/G$).

При нагрузках меньших критической и порядка критической $\sigma_{zz} \neq \sigma_{xx}$ «давление» имеет существенно негидростатический характер. В пределе, когда нагрузки достаточно велики, $p >> p_{кр}$, относительная разность $(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})/\sigma_{zz} = 2\sigma_{кр}/\sigma_{zz} \to 0$, т.е. все три нормальных напряжения становятся почти одинаковыми. Касательное напряжение $\sigma_{x'z'} = \sigma_{кр}$ становится малым по сравнению с нормальным. Оно остается постоянным или же медленно возрастает, гораздо медленнее, чем раньше.

10. ***Состояние вещества при воздействии на него сильной ударной волны.*** (Ahrens T.J. Equation of state. Chapter 4. High-Pressure Shock compression of solids Ed. Asay J.R., Shahinpoor M. Springer-Verlag. New York Inc. 1993. 399 p.)

Воспользуемся материалами по экспериментальному наблюдению эффектов, возникающих в твердом теле при прохождении через него ударной волны. В отличие от

условий сравнительно слабой ударной волны (Зельдович, Райзер, 1966) принятой при рассмотрении раздела 3. 8, в этом разделе будут приведены результаты воздействия сильной ударной волны, когда скорость движения частиц за её фронтом составляет примерно 1/3 от скорости волны.

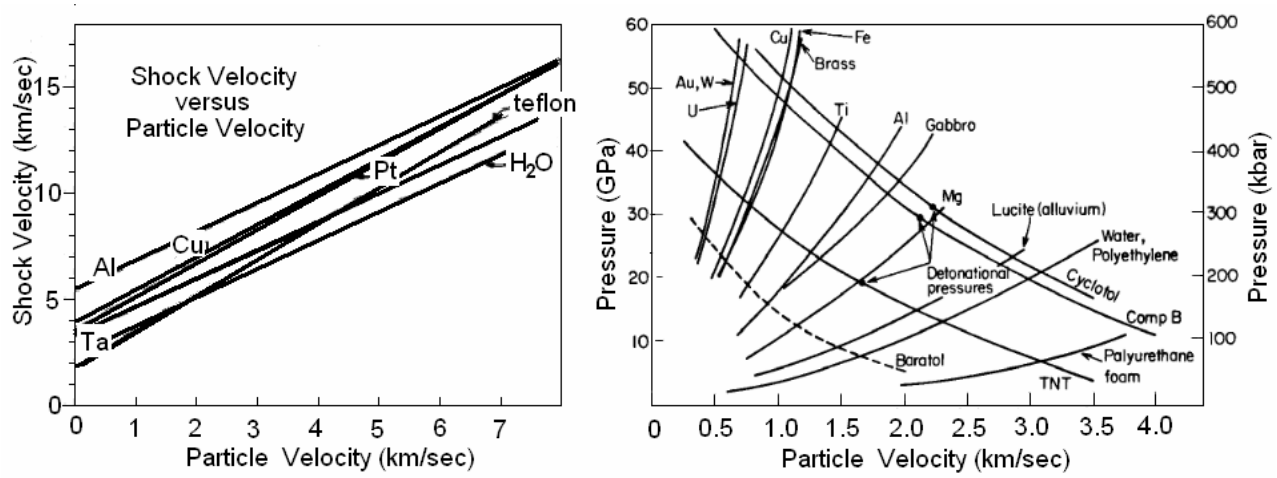


Рис. П3- 27. Взаимосвязь между скоростью ударной волны и скоростью частиц вещества (слева) для нескольких стандартных материалов. Ударное давление, возникающее в технических материалах при заданной скорости движения частиц среды.

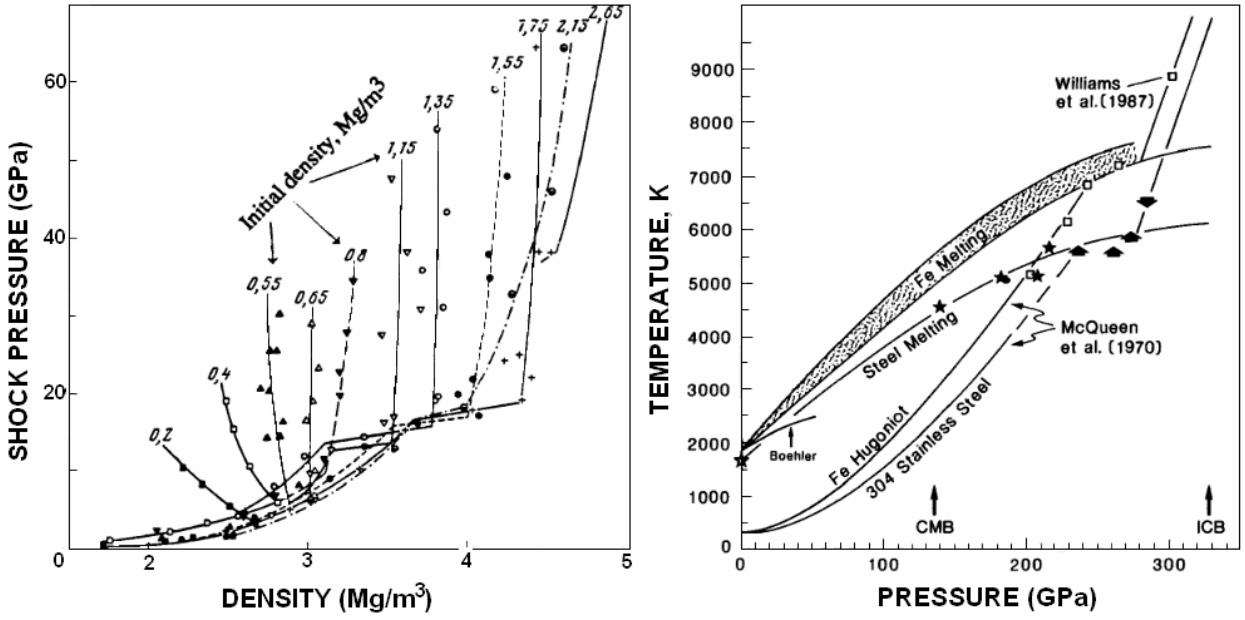


Рис. П3-28. Слева – график: ударное давление - плотность пористых сред по Гюгонио для пористого кварца, начальная плотность которого составляла 0.2-0.8 г/см^3. После воздействия ударной волны, - кварц достигал плотности стишовита (до 2.65 г/см^3. Справа – адиабаты Гюгонио для железа и стали. Стрелками отмечены давления, характерные для ядра Земли.

На рис. П3-27 приведены графики, связывающие скорость частиц со скоростью волны и с давлением на фронте ударной волны.
На рис. П3-28 приведены результаты экспериментов (Ahrens, 1993) по сжатию пористых материалов ударной волной от начального состояния до состояния Гюгонио (слева). Начальная пористость материалов отмечена цифрами, конечная – соответствует

значениям на горизонтальной оси в соответствии с адиабатой Гюгонио. На правой шкале показан конечный результат изучения уравнения состояния железа и стали под воздействием ударных волн. Показана кривая плавления и адиабата Гюгонио. Автор (Ahrens, 1993) отметил на шкале давления значения для внешнего и внутреннего ядра (CMB – граница ядро-мантия, ICB – граница внутреннего ядра).

Приложение 4. Фрактальные свойства и скелинг в физике Земли
(*Идеи Мандельброта, Федера, Бака и др., Хакена, Тсаллиса*)**.**

В Приложении 4 рассмотрены свойства открытых систем, хаос и порядок, роль энтропии в открытых системах. Рассматривается уравнение Фоккера-Планка как уравнение, описывающее механизмы самоорганизации. Обсуждаются два аналитических решения этого уравнения. Описаны: самоорганизованная критичность, фликкер 1/*f* шум, фрактальные свойства систем и методы оценки фрактальной размерности. Обсуждаются явления самоподобия и самоаффинности, фрактальные периметры и поверхности, scaling и cut off. Для объяснения явления cut off приведены идеи Тсаллиса. Сравнивается обычная термодинамика и термодинамика Тсаллиса. Приводятся примеры самоорганизации в физике Земли.

1. Свойства открытых систем.

"Физика открытых систем" как новое научное междисциплинарное направление заявила о себе в самое последнее время (Климонтович, 1996). Ю.Л. Климонтович считает, что у истоков этого направления стояли: физик Л. Больцман, математики А. Пуанкаре и А. Ляпунов, биолог Ч. Дарвин и другие. Для характеристики понятия "открытые системы", автор приводит краткий перечень ключевых слов и понятий: хаос и порядок; критерии упорядоченности и нормы хаотичности; деградация и самоорганизация; переход от обратимых уравнений к необратимым; диссипативные структуры сплошной среды; неравновесные фазовые переходы и т.п. Естественно, многие из этих понятий нельзя назвать "новыми", однако, целью "физики открытых систем" является развитие идей и методов единого описания этого широкого круга вопросов. Обозначим наиболее важные понятия:

Открытые системы обмениваются с окружающими объектами энергией, веществом и информацией.

Диссипативные процессы в открытых системах играют конструктивную роль. Диссипативные структуры, это пространственные, временные и пространственно-временные структуры. Введенный Г. Хакеном (1980) термин "синергетика" означает совместное действие макроэлементов входящих в состав диссипативных структур.

Эволюция в физических замкнутых системах приводит к равновесному состоянию. В открытых системах Климонтович выделяет два класса эволюционных процессов: самоорганизация и деградация. Процессы отличаются один от другого по степени упорядоченности (или хаотичности) системы после её эволюции. Однако далеко не всегда уменьшение степени хаотичности означает наличие самоорганизации и наоборот - увеличение степени хаотичности означает наличие деградации.

Хаос и порядок. Принято считать, что порядок рождается из хаоса. Однако, это не всегда так. Например, согласно Больцману, наиболее хаотичным является состояние равновесия. Один из примеров: перенос тепла за счет теплопроводности, это неорганизованный, хаотический процесс, а конвективный тепломассоперенос - это типичный пример саморегулирования теплового потока - пример самоорганизации. На поверхности жидкости при этом возникает новая периодическая структура, состоящая из ячеек Бенара. Можно привести другие примеры: появление новой структуры в неравновесном фазовом переходе; возникновение когерентной структуры, обладающей дальним порядком (например, в лазерах) и т.п.

Роль энтропии в открытых системах. Энтропия обладает совокупностью свойств, позволяющей использовать её в качестве меры неопределенности (хаотичности) процессов. Известно, что при обратимом адиабатическом процессе энтропия неизменна. Согласно Больцману, при временной эволюции системы к равновесному состоянию, её

энтропия возрастает и остается неизменной при достижении равновесного состояния. Средняя энергия в замкнутой системе остается неизменной при эволюции системы к состоянию равновесия. Отсюда следует, что энергия не может служить мерой неопределенности системы.

Изменение энтропии открытой системы dS складывается из её изменения за счет притока из окружающей среды dS_e и её увеличения $dS_i > 0$ за счет внутренних диссипативных процессов (Изаков, 1997):

$$dS = dS_e + dS_i$$

В открытой системе может быть как приток, так и отток энтропии, т.е. dS_e может иметь любой знак, и энтропия системы может увеличиваться или уменьшаться, но энтропия вместе с окружающей средой всегда увеличивается в соответствии со вторым законом термодинамики.

Энтропия неравновесных систем может быть выражена формулой Гиббса для термодинамических параметров, находящихся в состоянии локального равновесия:

$$dS = dE/T + pdV/T - 1/T \sum \mu_i \, dN_i. \qquad (П4.1)$$

Здесь E - внутренняя энергия, T - температура, p - давление, V - объем μ_i, N_i - химический потенциал и число частиц i-го компонента системы.

Следуя Изакову, обозначим через s удельную энтропию, поделив её на массу: $s = S/M$, тогда изменение удельной энтропии $\partial s/\partial t$ во времени:

$$\partial(\rho s)/\partial t + div\, J = \sigma_s$$

Производство энтропии равно (Изаков, 1997):

$$\sigma_s = Q \nabla(1/T) - 1/T \nabla v - \sum \rho_k v_k \nabla(\mu_k/T) - 1/T \sum \omega_{ki} A_{ki}, \qquad (П4.2)$$

Здесь первый член описывает производство энтропии в процессе теплопроводности, второй – за счет вязкости, третий – за счет диффузии, четвертый - в химических реакциях и фазовых переходах.

2. Уравнение Фоккера-Планка.

Возникновение трещины - случайный процесс, вероятность его не зависит от предыстории системы. Такие процессы принято считать марковскими (пуассоновскими). Вероятность того, что система в момент времени $t + \Delta t$ окажется в состоянии с параметром q в интервале $q + dq$ описывается интегральным уравнением Смолуховского:

$$f(q, t + \Delta t) = \int f(q_o, t)\, g(q_o, q - q_o, \Delta t)\, dq, \qquad (П4.3)$$

где $g(q_o, q - q_o, \Delta t)$ - вероятность перехода системы из точки q_o в точку q за время Δt. После стандартных преобразований этого уравнения: $\partial f(q, t)/\partial t = - \partial j/\partial q$, получаем одномерное уравнение Фоккера-Планка:

$$j = d(\gamma q f)/dq + 1/2\, Q\, d^2(f)/dq^2, \qquad (П4.4)$$

где $\gamma q = K$ - коэффициент дрейфа, а Q - коэффициент диффузии. Это уравнение, как известно, описывает самоорганизацию системы. Физическая суть механизма самоорганизации состоит во взаимодействии двух механизмов переноса: дрейфа и диффузии (перколяции). В нашей модели, как мы показали, имеют место оба этих процесса.

При решении уравнения Фоккера-Планка находятся стационарные решения, когда аргумент не зависит от времени, а так же решения, зависящие от времени, но не зависящие от координаты. Рассмотрим два известных решения этого уравнения, которые были впервые предложены Фоккером (совместно с Планком) еще в 1914 г. для описания закономерности распределения средней энергии вращающегося электрического диполя в поле излучения. Заметим, что уравнение ФП, в своем первоначальном виде, предназначалось для описания физики взаимодействия между частицей и излучением

(полем). Впоследствии выяснилось, что это уравнение объясняет широкий спектр различных явлений самоорганизации в областях физики, химии, биологии, социологии и т.п. (Хакен, 1980).

Стационарное решение уравнения ФП для одномерного случая выглядит следующим образом (Хакен, 1980):

$$f(q) = N \exp(-2V(q)/Q), \qquad (П4.5)$$

где $V(q) = -\int K(q)\, dq$, имеет смысл потенциала, а N - нормировочный множитель.

Стационарное решение этого уравнения, полученное в (Климонтович, 1983), несколько отличается от предыдущего:

$$f(q) = \exp[F_o - (aq + 1/2bq)/D], \qquad (П4.6)$$

где F_o - "свободная энергия" - аналог флуктуирующих сил, a - параметр обратной связи ($a = 0$, означает начало генерации), b - параметр нелинейности, D - интенсивность гаусовского шума.

Сравнивая решения (5) и (6), видим их общность, которая состоит в том, что функция плотности вероятности имеет экспоненциальный характер, причем, в показателе степени экспоненты имеется "силовой" параметр, характеризующий потенциал, энергию и т.п. Физический смысл решения уравнения ФП состоит в зависимости вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (энергия и т.п.), тем меньше вероятность появления этого решения. По-видимому, эта особенность является фундаментальным свойством природы.

Рассмотрим нестационарные решения. В простейшем, одномерном виде, решение нестационарного (зависящего от времени) уравнения Фоккера-Планка имеет вид:

$$f(q, t) = (\pi a(t))^{-1/2} \exp\{-(q - b/t))^2/a(t)\}, \qquad (П4.7)$$

здесь: $a(t) = Q/\alpha(1 - \exp(-2\alpha t)) + a_o \exp(-2\alpha t)$, $b(t) = b_o \exp(-\alpha t)$.

При $a \to 0$ $(a_o = 0)$, решение сводится к δ-функции. Это решение показывает, что при выполнении определенных условий, в диссипативной самоорганизующейся системе может возникнуть нестационарное решение, например (при соответствующем значении входящих в уравнение ФП параметрах), в виде "отдельной волны". Это решение (в виде волны, или δ-функции) может, как показано в (Хакен, 1980), при перемещении во времени и в пространстве постепенно "расплываться" и ослабевать, а может, наоборот, усиливаться и "сжиматься" в пространстве и во времени. Это решение позволяет, в принципе, рассматривать возможность проявления эффекта внезапного усиления акустической эмиссии при неизменной нагрузке на образец горной породы (Lei et al., 1992), которое может оказаться причиной возбуждения сверхизлучения, реализуемого в виде ударной волны.

Приведем результат решения линеаризованного уравнения ФП, типа:

$$dq/dt = -\alpha q + \gamma \Delta q + F. \qquad (П4.8)$$

Здесь α - внешний параметр (имеет физический смысл плотности потока), γ - скорость затухания волнового потока в системе.

Корреляционная функция: $\langle q(x', t')\, q(x, t)\rangle$ для одномерного случая при совпадающих моментах времени $t' = t$ равна:

$$\langle q(x', t)\, q(x, t)\rangle = Q/(\alpha\gamma)^{1/2} \times \exp[-(\alpha/\gamma)^{1/2} |x' - x|]. \qquad (П4.9)$$

Множитель при $|x' - x|$ в показателе экспоненты имеет размерность обратной длины. Поэтому, h_k - корреляционная длина: $h_k = (\alpha/\gamma)^{-1/2}$. Очевидно, что $h_k \to \infty$ при $\alpha \to 0$ и, наоборот, при увеличении плотности потока, длина корреляции уменьшается. Параметр $d = (\alpha/\gamma)^{1/2} h_k$ - выражает фрактальную размерность, или иначе, размерность кластера. Обратим внимание на формулу, связывающую плотность потока импульсов и характерный размер h. Полагая, что первый параметр (α) есть ни что иное, как N (число событий), а второй (размер h) может характеризовать их энергию E, получаем: $E \sim N^{-1/2}$, или иначе: $N \sim E^{-2}$.

Последнее выражение похоже на закон Гутенберга-Рихтера. Кроме этого, эта формула показывает, что в некотором интервале значений интенсивность потока линейно связана с характерным размером (масштабом) образующихся кластеров, тогда это скейлинговое (scaling) отношение.

Таким образом, например, построив теорию самоорганизации излучающих звук трещин, можно получить основные закономерности сейсмичности. Это, с одной стороны, открывает путь к пониманию природы землетрясения и, с другой, позволяет найти объяснение результатов, полученных при лабораторном моделировании.

3. Самоорганизованная критичность.

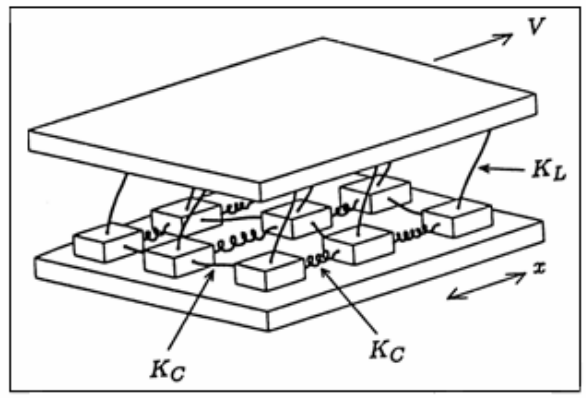
Как было показано в работе (Bak et al., 1987) и серии последующих работ различных авторов, системы с большим количеством взаимодействующих элементов естественным образом эволюционируют к критическому состоянию, в котором любое малое событие может привести к катастрофе или резкой смене состояния. Это состояние системы было названо авторами состоянием самоогранизованной критичности.

Согласно этой теории, составные части системы никогда не достигают равновесия, а эволюционируют от одного метастабильного состояния к другому. Авторы демонстрируют основную идею своей теории на примере с кучей песка. Песчинки ссыпаются медленно и равномерно и всегда из одного и того же места. Они образуют кучу, склон которой становится все круче, до тех пор, пока песчинки не вызовут лавину. Считается, что система (куча песка) перед тем, как на неё упала последняя песчинка, находится в критическом состоянии. Песок сыплется с постоянной скоростью, а его количество меняется со временем. График этой величины представляет собой набор случайных хаотических чисел различной длительности, это *фликкер-шум* или шум мерцания. От белого шума он отличается тем, что система “помнит” все свои предыдущие состояния.

Баком и др. (BTB) было получено наиболее убедительное доказательство генерации фликкер-шума и образование самоорганизованной критичности двумерной структурой, включающей 100×100 маятников, связанных между собой торсионными пружинами. Начальное условие состоит в том, что маятники нестабильны и колеблются. Затем система почти уравновешивается и достигает т.н. локально минимально стабильного (т.е. максимально чувствительного) состояния. Предположим, что мы толкнем один маятник, ослабляя силу, удерживающую его в квазистабильном состоянии. Это вызовет колебания соседних маятников, и возмущение (шум) будет передаваться в системе посредством эффекта домино. Если в конце процесса все маятники вернутся в исходное состояние, то система стабильна к малым возмущениям. Ситуация существенно отличается, если возмущение будет усиливаться при его распространении, эта конфигурация уже нестабильна к малым возмущениям. Такая система эволюционирует, и в ней образуется всё больше и больше минимально стабильных состояний, которые начнут задерживать распространение шума. Система придет в стабильное состояние в том случае, когда шум не сможет распространяться сколь угодно далеко. В этой ситуации можно ожидать возникновение пространственно-инвариантной структуры минимально стабильных состояний, т.е. образования самоподобных фрактальных структур.

Практически все экспериментальные и численные результаты log-log зависимостей показывают, что в интервале больших значений величин энергий наблюдается резкое изменение функции распределения энергии (“обрезания” - cutoff). Принято считать, что cutoff определяется размером системы ~ $L^{2.2}$ (Olami et al., 1992). Однако это объяснение вызвало сомнение у ряда авторов, занимающихся проблемой самоорганизованной критичности в применении к физике сейсмичности и закону Гутенберга-Рихтера, в частности, относительно того, что зависимость ~ $L^{2.2}$ не может быть применена, по-видимому, в системах с очень большим размером L. Тем не менее, большинство авторов считают, что изменение наклона кривой частоты (вероятности) появления события

(например, землетрясения) с энергией E от величины этой энергии (cutoff, обрезание и т.п.) определяется реологией среды, и что это явление зависит от линейного размера системы L.



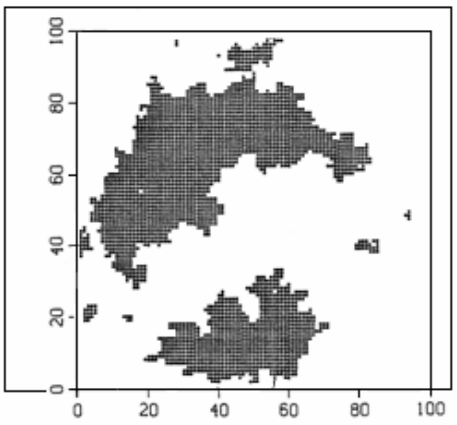


Рис. П4-1. Модель сейсмичности Барриджа-Кнопова (БК) (слева). Рис. П4-2. Эффект образования кластеров, составленных из групп маятников, связанных между собой торсионными пружинами, находящихся в стабильном состоянии (справа).

Рисунок П4-2 иллюстрирует эффект образования кластеров, составленных из групп маятников, связанных между собой торсионными пружинами, находящихся в стабильном состоянии, на “фоне” остальных - нестабильных. Как показали БТВ, такие кластеры возникают в двумерной матрице, составленной из 100×100 маятников при их внешнем возмущении. Начальное условие существования такой системы состоит в том, что все маятники нестабильны. Они будут колебаться до тех пор, пока не достигнут состояния, при котором силы, действующие на маятники со стороны пружин, уравновесят силы гравитации. Предположим, что система маятников находится в стабильном состоянии. Слегка ослабим один маятник, после чего окружающие его маятники окажутся нестабильными, и шум будет распространяться (явление перколяции) к дальним соседям по цепной реакции. Эта система оказывается нестабильной к малым возмущениям и не может служить аттрактором. При самоорганизации система будет развиваться таким образом, чтобы в ней образовывалось все большее и большее количество более чем минимально стабильных состояний, которые способны задерживать движение (перколяцию) шума. Когда она достигнет такого состояния, при котором шумовой сигнал не будет способен распространяться сколь угодно далеко, такая система (кластер) приобретет свойства, характерные для пространственно-инвариантных (scaling) структур.

Масштабная (scaling) картина дает начало степенной зависимости частоты от спектра шума, что, в свою очередь, приводит к возникновению фракталов (структур с дробной размерностью), которые, собственно, и представляются как минимально-стабильные состояния, образующиеся в динамических процессах и останавливающиеся в SOC-точке. Отсутствие характерной длины фрактала равносильно отсутствию характеристического времени развития флуктуаций t. Распределение времен жизни фрактала $D(t) \sim t^{-a}$ приводит к спектру частот $S(\omega) \sim \omega^{-2+a}$.

Для того чтобы наглядно представить физическую систему, которая может обнаружить свойства SOC, БТВ рассматривают процесс осыпания кучи песка. Если склон кучи слишком велик, то куча далека от состояния равновесия. Песок будет осыпаться до тех пор, пока средний наклон песка в куче не достигнет критического значения, когда система почти стабильна по отношению к малым возмущениям. Фликкер “1/f”-шум, это динамический отклик осыпающейся кучи песка на малые случайные возмущения.

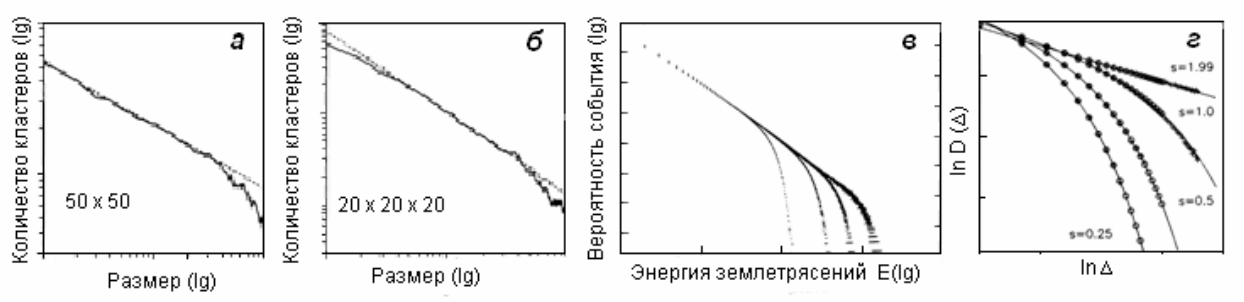


Рис. П4-3. График распределения количества кластеров определенных размеров (log-log), образующихся в двумерной решетке маятников (а, б). в - эффект резкого изменения функции распределения энергии ("обрезания" – cut off) в зависимости от размера структуры: ~ $L^{2.2}$, г - вероятность $D(\Delta)$ как функция размера Δ для различных значений s.

Вернемся к модели с маятниками. На рис. П4-2 темные области показывают кластеры, которые возникают благодаря наличию домино-процесса, начинающегося с перемещения только одного маятника. На рис. П4-3-а, -б показан log-log график распределения количества кластеров определенных размеров, образующихся в двумерной решетке маятников, полученный подсчетом площади кластера, равной числу маятников, испытавших влияние единичного воздействия. Тот факт, что прямая линейна на протяжении двух десятков отсчётов, показывает, что система находится в SOC с scaling-распределением кластеров.

Собственно, после выхода работы БТВ, у физиков и геофизиков возник повышенный интерес к модели БК. Действительно, идея БТВ относительно маятников была предвосхищена значительно раньше, еще в spring-block модели БК. Двое из БТВ (Бак и Танг), по-видимому, одними из первых объяснили закон Гутенберга-Рихтера как SOC. БТ для простой ячеистой stick-slip модели получили зависимость $D(E) \approx E^{-\tau}$, с $\tau = 1.0$ и $\tau = 1.35$ для двумерной и трехмерной матриц, соответственно. В расчетной модели у БТ возникали явления scaling и cutoff.

Проблемы scaling и cut off. Идея самоорганизующейся системы получила дальнейшее развитие в работе (Olami et al., 1992). В отличие от предыдущих моделей, здесь авторы Олами, Федер и Кристинсен (ОФК) применили ячеистую неконсервативную модель процессов, что единственно правильно применительно к такой диссипативной системе как Земля. В основу этой двумерной модели, как и во всех других, была положена spring-block идея Б-К. Авторы определили L×L массив блоков посредством i, j- элементов (в интервале от 1 до L). Смещение каждого блока от его предыдущего положения определяется как $dx_{i,j}$. Общая сила, оказывающая влияние со стороны пружин на данный блок (i j) выражается следующим образом:

$$F_{ij} = K_1[2dx_{i,j} - dx_{i-1,j} - dx_{i+1,j}] + K_2[2dx_{i,j} - dx_{i,j-1} - dx_{i,j+1}] + K_L\, dx_{ij}, \qquad (П4.10)$$

где: K_1, K_2 и K_L - упругие константы (см. рис. П4-1).

Когда две жесткие пластины движутся относительно друг друга, общая сила, действующая на каждый блок, увеличивается (пропорционально $K_L V$, где V-относительная скорость двух пластин) до тех пор, пока не будет достигнуто пороговое значение и не начнется процесс релаксации - запуска землетрясения. Авторы показывают, что после локального скольжения, силы, оказывающие влияние на блок, изменились:

$$F_{i+1,j} \rightarrow F_{i+1,j} + \delta F_{i+1,j}, \qquad (П4.11)$$
$$F_{i,j+1} \rightarrow F_{i,j+1} + \delta F_{i,j+1},$$
$$F_{i,j} \rightarrow 0,$$

где увеличение сил, действующих на ближайших соседей, равно:

$$\delta F_{i+1,j} = [K_1/(2K_1 + 2K_2 + K_L)]\ F_{i,j} = \alpha_1 F_{i,j} \qquad (П4.12)$$
$$\delta F_{i,,j+1} = [K_2/(2K_1 + 2K_2 + K_L)]\ F_{i,j} = \alpha_2 F_{i,j.}$$

Если $K_L > 0$, то система неконсервативна, если $K_1 \neq K_2$, ($\alpha_1 \neq \alpha_2$), то модель анизотропна, если $\alpha_1 \neq 0$, $\alpha_2 = 0$, - одномерный вариант spring-block модели.

Авторы ограничились рассмотрением изотропного случая:

$$K_1 = K_2, (\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha).$$

В этом случае: $\alpha \approx 0.2$. В результате численного моделирования была получена зависимость показателя степени "B" в законе Гутенберга-Рихтера от α: при изменении L = 15, 25, 35 и 50 и $\alpha = 0.2$, величина $B \approx 0.91$. Исследование зависимости резкого изменения функции распределения энергии обрезания – cutoff, как функции размера, показало, что она действительно определяется размером системы как: $\sim L^{2.2}$ (см. рис. 16-3-в).

При $\alpha = 0$ движение блоков из-за отсутствия взаимодействия будет не связанным. Следовательно, должен наблюдаться переход системы к локализованному поведению блоков системы. Это явление действительно наблюдалось при $\alpha \approx 0.05$. При исследовании динамических диапазонов параметров, авторам удалось показать, что в spring-block модели существует огромное фазовое пространство метастабильных состояний. Эти состояния теряют стабильность при превышении определенных порогов значений. Этим модель авторов отличается от других аналогичных ей, основанных на диффузионных уравнениях. Авторы полагают, что им удалось выявить одно из фундаментальных свойств моделирования землетрясения.

Работа ОФК не осталась незамеченной, сразу после ее выхода последовали комментарии (Klein, Rundle, 1993). Его авторы выразили сомнение в том, что cutoff (обрезание) энергии землетрясений может иметь зависимость $\sim L^{2.2}$, а так же в том, что при граничном размере L = 50, система способна достичь масштабного предела (scaling). На это замечание Кристенсен (один из авторов ОФК) ответил (Christensen, 1993), что он согласен с тем, что зависимость $\sim L^{2.2}$ не может, по-видимому, распространяться на системы с очень большим размером L, однако отметив при этом, что главный вывод из их работы (Olami et al., 1992) состоит в том, что именно неконсервативная spring-block модель описывает критическое состояние со степенным законом распределения, зависящее от уровня консервативности, хотя, подчеркивает автор, в модели до сих пор не получено значение области масштабирования, т.е., иначе, - "scaling"-а.

Исследования, аналогичные ОФК, были проведены Дингом и Лу (Ding, Lu, 1993), где была предпринята попытка аналитически решить задачу spring-block модели. Авторам удалось вычислить размер области скольжения блока Δ, а так же показать, что существует пропорциональность между Δ и его вероятностью $D(\Delta)$ с универсальным показателем степени $\xi = -3/2$:

$$D(\Delta) \sim \Delta^{\xi} \exp(-\Delta/\Delta_o) \qquad (П4.13)$$

(см. рис. П4-3-г, на котором параметр $s \approx \alpha$, где α - примерно та же величина, что и в ОФК-модели). Размер скольжения, в этой работе, определяется как число блоков, движущихся ("прыгающих") одновременно. Основным преимуществом (по мнению авторов) этой системы является то, что вероятность $D(\Delta)$ скольжения с размером Δ может быть точно вычислена при термодинамическом пределе и масштабирующее соотношение (scaling) может быть получено аналитически. Сравнивая рис. 3-в и -г, видно, что компьютерное моделирование spring-block модели качественно соответствует ее аналитическому решению. При более внимательном сравнении этих работ, можно выяснить, что в первой $\alpha^1 = 1/5$ (для $K_1 = K_2 = K_L$), а во второй, - $\alpha^{11} = 1/2$ (для $K_1 = K_2$, $N = 1$). Полагая $s = 2\alpha^{11}$, получим: $s = \alpha^1$. Учитывая полученное, видно, что эти рисунки практически идентичны.

Выводы:

1) изменение наклона кривой частоты (вероятности) появления землетрясения с энергией E от величины этой энергии (cut off, обрезание и т.п.) определяется реологией среды: чем меньше $\alpha(s)$, тем на больших энергиях происходит cut off;
2) это явление зависит от линейного размера L: cut off ~ $L^{2.2}$.

Фликкер* 1/*f* *шум. Шум мерцаний, или 1/*f*-шум, является наиболее распространенным в природе типом флуктуаций. Он обнаруживается в неравновесных явлениях самой различной природы. По-видимому, первыми обратили внимание на это свойство еще в древнем Египте, когда обнаружили, что большие разливы Нила происходят очень редко и чем меньше величина разлива, тем чаще он происходит. С появлением телескопов астрономы фиксировали мерцания звезд, статистика мерцаний подчинялась этой формуле, поэтому фликкер шум иначе называется шумом мерцаний (flicker - мерцать). Несмотря на столь почтенный возраст, физика этого явления остается недостаточно ясной. Понятно, что фликкер шум отличается от т.н. белого шума тем, что здесь флуктуирующая система "помнит" о своих предшествующих "шагах".

Рядом авторов было обнаружено возникновение интенсивного широкополосного 1/*f*-шума в области критического неравновесного фазового перехода между различными режимами теплообмена в системе. Эксперименты проводились на сверхпроводящей структуре, помещенной в жидкий азот. При пропускании критического тока происходило локальное повышение температуры, и азот начинал кипеть (собственно - фазовый переход). Кипение азота сопровождалось усилением амплитуды флуктуаций напряжения и тока в структуре. Спектр колебаний становился подобным $1/f^{1.02}$. Авторы произвели цифровой эксперимент флуктуации температуры δT, используя формулу Хакена (1980):

$$\delta T = -\alpha\delta T - \beta\delta T^3 + \Gamma(t), \qquad (П4.14)$$

где α и β - коэффициенты, а $\Gamma(t)$ - начальный шум. При численном моделировании, подбирая величины коэффициентов и шума, авторы получили зависимость, спектр которой находился между $1/f$ и $1/f^2$. Они полагают, что такой подход открывает путь для объяснения явления самоорганизованного критического состояния.

4. Фрактальные свойства систем.

Геометрия встречающихся в природе объектов различных размеров - от атомных масштабов, до Вселенной - занимает важное место в моделях, которые мы строим, чтобы понять природу. Геометрия траекторий частиц; линий тока в гидродинамике, гор, рек, геометрическая структура кристаллов и т.п. также представляется весьма значительной в различных областях естествознания. В природе происходят как детерминированные движения, так и (что значительно чаще встречается) хаотические. Простейшие динамические системы обладают свойством резко менять характер своего движения от регулярного к случайному, хаотическому при малейших изменениях какого-либо параметра. В случае хаотического движения фазовые траектории частиц, обладающих близкими начальными параметрами, быстро расходятся и потом хаотически перемешиваются, так как они способны удаляться друг от друга до какого-то предела. Притягивающее множество неустойчивых траекторий в пространстве состояний диссипативной системы принято называть стохастическим, странным аттрактором. Важнейшим свойством странного аттрактора является фрактальность. Понятие фракталы введено Мандельбротом (Mandelbrot, 1983) для более достоверного описания большого класса природных объектов. Фракталы - это объекты, проявляющие по мере увеличения масштаба, все большее и большее количество деталей, сохраняя при этом свои основные свойства.

Природа слишком разнообразна для того, чтобы её можно было описать с помощью математических множеств, обладающих целой, топологической размерностью: линиями, квадратами, кубами и т.п. Преобладающее большинство объектов, присущих природе, обладает дробной размерностью, - это фракталы. Фракталы могут быть как

регулярными (например, кривая Коха), так и стохастическими (траектория броуновского движения). Фрактал принято считать мгновенным “срезом” самоорганизующихся критических процессов. Фрактальные структуры и шум мерцания - пространственные и временные “отпечатки” самоорганизованной критичности.

Фрактальная размерность. Топологическая размерность D_T , с которой мы имеем обычно дело, приписывает счетному множеству размерность нуль (D_T = 0), кривым - размерность (D_T = 1), поверхностям размерность (D_T = 2) и т.д. Однако в природе встречаются объекты, размерность которых не всегда можно определить заранее. В качестве примера обычно приводят траекторию броуновской частицы: Она имеет размерность (D_T = 1), однако, чем больше время наблюдения, тем плотнее траектория заполняет плоскость и через какое-то время будет от неё неотличима. Размерность множества в промежутке времени между началом и концом процесса: $1 \le D_T \le 2$. Для описания таких случаев используется размерность Хаусдорфа (D_H). Эта характеристика системы, позволяет получить более тонкую информацию об исследуемом множестве, чем обычная топологическая размерность D_T. Хаусдорфова размерность множества:

$$D_H = \lim \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}, \qquad (П4.15)$$

позволяет различать (до известных пределов) степень сложности траекторий. Для отрезка прямой (или гладкой кривой) $D_H = D_T = 1$, для плоскости $D_H = D_T = 2$ и т.д. Это означает, что для простых случаев топологическая и хаусдорфова размерности совпадают.

Приведем несколько примеров:

Кривая Коха. Длина отрезка ломаной $r_n = 1/3^n$. Этими отрезками, “как кубиками”, покрывается кривая Коха. Число таких “кубов” $N(r_n) = 4^n$, отсюда $D_H = \ln 4/\ln 3 \approx 1.26$. Как мы отмечали для кривой $D_T = 1$ и поэтому, в данном случае: $D_H > D_T$.

Канторово множество. Из единичного отрезка выбрасывается средняя треть. Эта процедура повторяется с каждым из двух образовавшихся отрезков. Хаусдорфова размерность $D_H = \ln 2/\ln 3$, т.е. $0 < D_H < 1$.

Ковер Серпинского. Единичный квадрат делится на 9 равных частей, и средний квадрат выкидывается, затем процедура повторяется. Здесь: $N = 8$, $r_n = 1/3$, отсюда $D_H = \ln 8/\ln 3$, и $1 < D_H < 2$.

Определение фрактала, данное Мандельбротом (2002): Фрактал, это множество, хаусдорфова размерность которого строго больше топологической. Размерность D_H отражает свойство масштабной инвариантности, скейлинга (scaling) рассматриваемого множества.

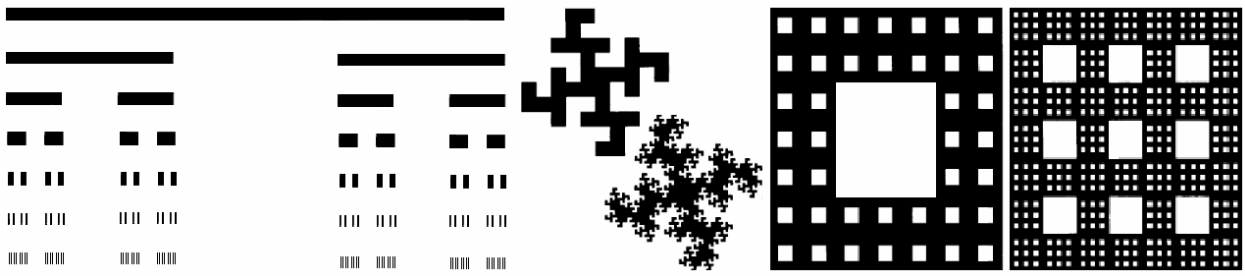


Рис. П4-4. Фрактальные структуры.

Скейлинг. Из термодинамического определения теплоемкости $c = -T\partial F/\partial t$ следует, что при $t \to 0$, удельная теплоемкость ведет себя как $c \sim t^{-\alpha}$ (Это типичная скейлинговая зависимость). Здесь $F(t) \sim t^{2-\alpha}$ - свободная энергия (удовлетворяет скейлинговому отношению). Аналогичная скейлинговая зависимость описывает статистические свойства протекания, или перколяции (Федер, 1991).

Протекание и "вязкие пальцы". Примеры протекания (перколяции) многообразны. Простейший пример, это поведение воды в перколяторе (кофеварке). Сюда можно отнести процессы диффузии в растворителе или электронов в полупроводнике, просачивание воды в трещины или вытеснение одной жидкости другой и т.п. Все задачи протекания связаны с геометрией. Во многих задачах, оказывается, достаточно рассмотреть двумерное протекание на квадратной решетке размером L^2. Масса кластера $M(L)$ зависит от размеров решетки:

$$M(L) \sim lnL\ (p < p_c);\ M(L) \sim L^{D}\ (p = p_c);\ M(L) \sim L^{E}\ (p > p_c); \qquad (П4.16)$$

где p_c - критическая вероятность. Величина кластеров при перколяции может варьироваться в очень широких пределах. Порог протекания определяется распределением кластеров по величине. Для того чтобы более точно определить размер кластера, состоящего из s-узлов, вводится понятие радиуса гирации (гирорадиус) $R_g(s)$:

$$R^2_g(s) = (1/2s^2)\Sigma(r_i - r_j)^2. \qquad (П4.17)$$

Несколько отличается от (13), выражение для радиуса гирации кластера на пороге протекания: $R_g(s) \sim L^{2-(E-D)}$.

Существенным аспектом подхода к образованию кластеров на пороге протекания является образование *самоподобной* структуры процесса. Самоподобие приводит к степенным зависимостям различных величин. Однако не каждый показатель степенного ряда можно считать фрактальной размерностью. Выражения для $R_g(s)$, это типичный пример *скейлинга* конечных масштабов.

Представляет интерес динамическая *перколяция с вытеснением* для двух несмешивающихся жидкостей, между которыми сохраняется разность давлений $\Delta p = 2\sigma cos\theta/r$, где σ - межфазное натяжение на границе жидкостей, θ - краевой угол, r - радиус кривизны поры. Если одна из жидкостей вода, а другая масло, то вода спонтанно вытесняет масло из пористой среды, если давление воды специально не поддерживается на более низком уровне, чем давление масла. Масса вытесняемого кластера $M(L) = AL^D$, где $D = 1.89$. Аналогичная ситуация происходит и при перколяции с захватом, однако, здесь величина D несколько меньше.

Стоит остановиться на т.н. *диффузионном фронте*, возникающим при диффузии от источника. Он имеет фрактальную структуру, которая связана со *скорлупой* перколяционного кластера. Коэффициент диффузии D определяется формулой Эйнштейна:

$$D = a^2/2\tau, \qquad (П4.18)$$

где a - расстояние между ближайшими узлами решетки, τ - время столкновения. Диффузионная длина l определяется как среднеквадратичное смещение частицы от начального положения:

$$l^2 = 2a^2t/\tau. \qquad (П4.19)$$

Масса перколяционного кластера:

$$M(L, l) = l^{\alpha}\ l^{\nu/1+\nu}. \qquad (П4.20)$$

Показатель α определяет изменение ширины скорлупы с диффузионной длиной l, ν - показатель размерности решетки, для двумерной $\nu = 4/3$.

В двумерных пористых средах с вытеснением, перколяционный фронт образует структуры, получившие название *вязких пальцев*. Это фрактальные структуры играют важную роль при вытеснении нефти водой (Федер, 1991).

Временные ряды. Мониторинг геофизических параметров состоит в непрерывной регистрации их с помощью однотипной аппаратуры в течение длительного времени. Временные ряды, кроме этого, воссоздаются и по палео- и архео- данным. Как правило, временные ряды демонстрируют случайность и хаотичность процессов, происходящих и происходивших ранее (если, конечно, не наблюдается суточная или годовая цикличность). Обычный способ сопоставления двух процессов, это вычисление функции взаимной корреляции. В последние годы популярность приобрел метод исследования

фрактальных временных рядов Херста (Федер, 1991). Суть его состоит в том, чтобы оценить величину *нормированного размаха* (метод *R/S*). Разность между максимальными и минимальными величинами ряда:

$$R(\tau) = max\ X(t,\tau) - min\ X(t,\tau), \qquad (П4.21)$$

где t - дискретное время, а τ - длительность рассматриваемого промежутка времени. S - стандартное отклонение:

$$S = \{1/\tau\ \Sigma[\xi(t) - <\xi>_\tau]^2\}^{1/2}\ . \qquad (П4.22)$$

Как обнаружил Херст, для многих временных рядов наблюдаемый нормированный размах *R/S* очень хорошо описывается эмпирическим соотношением: $R/S = (\tau/2)^H$.

Показатель Херста H принимает для земных процессов величину, равную примерно $H = 0.73$ со стандартным отклонением равным примерно 0.09. Очевидно, что исследуемые этим методом временные ряды были очищены от сезонных вариаций.

Самоподобие и самоаффинность (affinis - смежный, аффинные преобразования - преобразования подобия, параллельного переноса, вращения). Фрактальное множество L точек *самоподобно и статистически автомодельно,* если оно является объединением непересекающихся подмножеств, каждое из которых получено путем преобразования с коэффициентом r ($0 < r < 1$), обладающих в точности теми же статистическими свойствами, что и r.

Аффинное преобразование переводит точку $x = (x_1, ..., x_E)$ в новую точку с координатами $x' = (r_1 x_E, ..., r_E x_E)$. Множество L самоаффинно по отношению к вектору подобия r, если L является объединением N непересекающихся подмножеств, каждое из которых получено из исходного множества аффинным преобразованием с помощью $r(L)$.

Фрактальная размерность самоаффинных фракталов не определяется однозначно. Размерность по покрытию графика функции можно определить формально по числу клеток $N(b; a, \tau)$, необходимых для покрытия кривой:

$$N(b; a, \tau) \sim b^{-D},$$

здесь: $b\tau$ - ширина и ba - длина клетки, D - фрактальная размерность.

С другой стороны, для покрытия кривой длительностью T, необходимо иметь $T/b\tau$ отрезков. В пределах каждого отрезка, диапазон изменения функции имеет порядок величины: $\Delta B_H(b\tau) = b^H\ \Delta B_H(\tau)$. Для того, чтобы покрыть такой размах, необходимо взять: $b^H \Delta B_H(\tau)]/ba$ рядов клеток высотой ba каждая. Для покрытия кривой необходимо:

$$N(b; a, \tau) = [b^H\ \Delta B_H(\tau)]/ba \times T/b\tau \sim b^{H-2} \sim b^{-D}. \qquad (П4.23)$$

Отсюда следует соотношение: $D = 2 - H$ для *самоаффинных кривых*.

Для гауссова броуновского движения с независимыми шагами $H = 1/2$. H имеет тот же смысл, что и показатель Херста. При $H = 1/2$ имеет место случайный процесс с независимыми приращениями. Однако при $H \neq 1/2$ система сохраняет свойство поддерживать тенденцию (персистентность). Для $H > 1/2$, если приращения были положительными, они будут таковыми и в будущем, если $H < 1/2$, то тенденция изменится на противоположную. Это свойство проявляется системой для сколь угодно большого интервала времени.

Фрактальные периметры и поверхности. Исследование облаков показало, что изменяя размер облаков в широком интервале (площадь изменялась на 6 десятичных порядков), периметр облака P связан с его площадью A соотношением: $P = A^D$. Это приводит к выводу, что в атмосфере отсутствуют пространственные масштабы, а облака самоаффинные фракталы. Фрактальная размерность $D = 1.35$ (по другим данным: $1.37 < D < 1.41$).

Приведем некоторые теоретические модели, объясняющие этот экспериментальный факт (Федер, 1991). Из всего многообразия значимых для описания

атмосферы параметров, выбирается один, например, локальная температура θ (x, y, z). Точку (θ, x, y, z) можно рассматривать в 4-х мерном пространстве. Множество точек L_o = {(θ, x, y, z)} в четырехмерном пространстве фрактально и его размерность равна $D = 4 - H$, где H - коразмерность. Поверхность облака представляет собой множество точек L в обычном трехмерном пространстве, фрактальная размерность его $D = 3 - H$. Формально мы имеем $L \cap L_o$.

Пересекая в трехмерном пространстве поверхность облака плоскостью, параллельной поверхности Земли, получаем множество точек, описывающих границу облака, размерность которой $D = 2 - H$. Экспериментальные наблюдения с помощью радиолокаторов позволяют оценить $H \approx 0.6$ для облаков и зон дождя.

Атмосфера стратифицирована, а это означает, что вертикальное направление неравноправно с горизонтальным, следовательно, облака не могут быть самоподобны, а, скорее, они самоаффинны. Облака являются примером мультифрактальности.

Мультифрактальная конвекция. Эксперименты, проведенные с изменением устойчивости конвективных валов в ячейке с изменяющимися параметрами, показали, что при увеличении температуры, валы теряли устойчивость и начинали совершать поперечные колебания с частотой, близкой к частоте Ω, численно равной иррациональному числу (золотому сечению) $\Omega = (\sqrt{5} - 1)/2$. Обоснование такого выбора дает теория динамических систем.

Флуктуация колебаний конвективных валов, оказавшихся в состоянии неустойчивости, приводит к образованию странного аттрактора в фазовом пространстве для движений этой системы. Пространственно-временной анализ кривой аттрактора позволил получить численное множество и его меру $M_d(q, \delta)$:

$$M_d(q, \delta) \sim \delta^d \Sigma (m_t(\delta))^{1-q}. \qquad (П4.24)$$

Здесь δ - минимальный размер между отсчетами на кривой аттрактора (“ребро гиперкуба”), m_t - число точек в ячейке. Критическая размерность определяется по графику соотношения: $\Sigma (m_t(\delta))^{(1-q)} \sim \delta^{\tau(d)}$, построенному в log-log координатах.

Для тепловой конвекции строится кривая $f(a)$ фрактальной размерности, по формулам:

$$\alpha(q) = - d/dq[\tau(q)],$$
$$f[\alpha(q)] = q\ \alpha(q) + \tau(q) \qquad (П4.25)$$

Эти два уравнения задают параметрическое представление кривой $f(\alpha)$ - фрактальной размерности кривой отображения окружности на себя с числом вращения, равным золотому сечению. Неустойчивая тепловая конвекция и критическое отображение окружности на себя обладают одинаковой фрактальной структурой и поэтому принадлежат к одному и тому же классу универсальности.

Волновые процессы во фрактальных структурах. Эти процессы условно делятся на два типа (Зосимов, Лямшев, 1995). Во-первых, - распространение волн во фрактальных структурах, когда фрактал является средой распространения и, во-вторых, рассеяние и излучение волн фрактальными структурами, когда волны распространяются в однородной среде с погруженными в неё фрактальными неоднородностями.

5. Идеи Тсаллиса.

В 1988 бразильским ученым Константино Тсаллисом была предпринята очень нетривиальная попытка, расширить область применения термодинамики и статистической механики (Tsallis, 1988). Поначалу она казалась лишь неким математическим трюком, но затем предложение Тсаллиса начало находить применение во многих физических и

геофизических задачах, в задачах, которые касались термодинамически аномальных систем.

***Обычная термодинамика**:* Пусть у нас есть макроскопический "кусок" какого-то вещества, например, капля воды. Нам известны такие его непосредственно измеряемые параметры, как объем, количество вещества и внутренняя энергия. Однако ничего о том, *как энергия распределена* по объему, мы сказать не можем.

В принципе, существует огромное количество возможностей распределить энергию по всему объему. Однако из опыта мы знаем, что практически все системы вокруг нас, если их изолировать от внешнего воздействия, рано или поздно приходят в определенное, вполне конкретное состояние, которое мы называем состоянием равновесия. Отсюда возникает вопрос: как научиться предсказывать распределение энергии, вещества и т.д. в состоянии равновесия?

На этот вопрос и отвечает термодинамика посредством введения понятия энтропии.

Если не указывать конкретную функциональную зависимость энтропии от энергии, объема и количества вещества, то отсюда мало что можно получить. Однако если предположить, что энтропия является экстенсивной величиной, то сразу возникает целый ряд нетривиальных и полезных утверждений. Экстенсивная величина - эта такая характеристика системы, которая растет с увеличением размеров системы. Более строгое определение: если наша система состоит из двух *независимых* подсистем A и B, то энтропию всей системы можно получить сложением энтропий подсистем:

$$S(A+B) = S(A) + S(B)$$

Именно это свойство и означает экстенсивность (аддитивность) энтропии.

В статистической физике энтропия уже трактуется через число микросостояний системы. Стараясь, тем не менее, определить энтропию так, чтобы она оставалась экстенсивной величиной, статистическая физика (а точнее, кинетика) вынуждена привлекать недоказуемую гипотезу молекулярного хаоса. Эта гипотеза состоит в том, что любые сталкивающиеся молекулы были *до столкновения* никак не скоррелированы, то есть, никак не чувствовали друг друга. Для многих (но не для всех!) систем это, конечно, вполне здравая аксиома. И именно из нее следует знаменитое выражение для энтропии для замкнутой системы (выгравированное, кстати, на надгробной плите Больцмана):

$$S = - k \Sigma_i p_i \ln(p_i)$$

Здесь i — это номер микросостояния системы, p_i — это вероятность нахождения системы в этом микросостоянии, Σ_i означает суммирование по всем таким микросостояниям, а k — это константа Больцмана, которую мы в дальнейшем положим равной единице. В статистической физике показывается, что так определенная энтропия, в самом деле, является аддитивной величиной и принимает максимальное значение в состоянии равновесия. То есть, она подходит на роль той "непонятной" энтропии, которая аксиоматически появилась в феноменологической термодинамике.

Термодинамика "обычных" систем. Термодинамика построена по Больцману. Все бы хорошо, только возникает вопрос: а насколько весь этот метод универсален? Годится ли он для всех возможных макроскопических систем?

Для того чтобы ответить на него, давайте взглянем еще раз на свойство аддитивности энтропии. Это свойство строго выполняется для независимых подсистем, а в реальности - части одной системы всегда взаимодействуют друг с другом. Будет ли это приводить к нарушению аддитивности? Если да, то насколько важны эти неаддитивные добавки?

Здесь начинаются нетривиальные вещи. Действительно, взаимодействие между частями системы есть практически всегда. Но только насколько оно важно для макроскопических систем? Давайте разберемся. Возьмем две капли воды и объединим их

вместе. Благодаря тому, что площадь свободной поверхности воды при этом уменьшится, некоторая часть энергии поверхностного натяжения (что есть ничто иное, как взаимодействие между молекулами) выделится и перейдет в тепло. Однако насколько эта энергия важна для термического состояния системы? Сделаем численную оценку, для слияния двух капель диаметром 1 см при температуре 300 К. Выделившаяся поверхностная энергия равна 36 мкДж. Так как теплоемкость образовавшейся капли равна 35 Дж/К, то выделившаяся энергия приведет к нагреву капли на 1 мкК, что составляет $0{,}3\cdot10^{-8}$ от начальной температуры. Полученная величина $\sim10^{-8}$ служит показателем того, с какой точностью сохраняется свойство термодинамической аддитивности (в том числе, и аддитивность энтропии) в нашем примере.

Выясним, почему энергия поверхностного натяжения так мала по сравнению с тепловой энергией? Ответ прост: тепловая энергия запасена *во всех молекулах вещества*, а поверхностная энергия, очевидно, только *в приповерхностных молекулах*. И полученное нами сильное различие энергий происходит просто из-за того, что доля приповерхностных молекул очень мала в макроскопических системах. Нетрудно оценить, что точность, с которой сохраняется аддитивность, приблизительно равна размеру атома, деленному на размер системы. Отсюда, кстати, можно было бы сразу получить характерную оценку $\sim 10^{-8}$ для нашей задачи, не делая никаких вычислений.

Остался последний шаг для полного понимания, почему в большинстве систем энтропия аддитивна с очень хорошей точностью. Зачем в предыдущем абзаце мы подсчитывали число приповерхностных атомов? Да потому что межмолекулярные силы по природе своей *короткодействующие*. Каждая молекула эффективно чувствует лишь несколько своих ближайших соседей. Поэтому те молекулы, которые находятся уже на глубине в несколько атомных радиусов, попросту "не знают" о существовании свободной поверхности, а значит, и не вносят свой вклад в энергию поверхностного натяжения.

В большинстве систем силы между частями системы короткодействующие: каждая молекула чувствует лишь несколько ближайших соседей. Именно отсюда следует то, что термодинамика таких макроскопических систем — экстенсивна. Именно такие системы окружают нас в повседневной жизни, и потому мы будем называть такие системы обычными.

Что такое термодинамически аномальные системы? В предыдущем утверждении на самом деле спрятано некое "а может быть...". В самом деле, а могут ли существовать "необычные" системы? То есть, как мы уже понимаем, это можно перефразировать так: существуют системы с *дальнодействующим взаимодействием*? Оказывается, да.

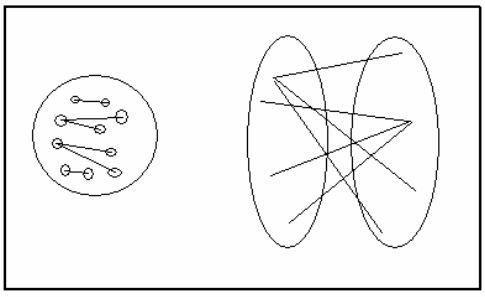


Рис. П4-5. Взаимодействие между разными частями системы: слева – близкодействие в случае капли воды, справа – дальнодействие гравитационных сил.

Примером такой системы может являться холодное облако межзвездной пыли достаточно больших размеров. Как мы знаем, сила гравитационного притяжения между любыми телами падает с расстоянием достаточно медленно, обратно пропорционально квадрату расстояния между телами. Поэтому в самогравитирующих системах каждая

частица чувствует не несколько ближайших соседей, *а всю систему целиком, все другие частицы*. И теперь, если мы мысленно разобьем облако на две части, то эти части будут взаимодействовать не по границе соприкосновения, а полностью всеми объемами.

Эта ситуация проиллюстрирована на рисунке 16-5. Слева показано, как взаимодействуют две части капельки воды; справа — как взаимодействуют две части пылевого облака. Видно, что во втором случае *две гравитирующие системы, помещенные рядом, никогда не могут быть независимыми*. Таким образом, в гравитирующих системах очень сильно нарушается термодинамическая аддитивность: такую систему нельзя разбить на приблизительно независимые подсистемы. Энтропия в таких системах не будет экстенсивной величиной. Такие системы не могут быть описаны обычной, больцмановской термодинамикой.

Оказывается, это еще не все. Существуют и другие системы, которые не могут быть описаны больцмановской термодинамикой. Только причина такого "неповиновения" может быть разной. Это могут быть, например, "эффекты памяти", когда система в некотором смысле помнит свое прошлое. То же самое более аккуратными словами: когда эволюция системы в данный момент времени зависит не только от параметров системы в этот конкретный момент времени, но и от ее параметров некоторое время назад.
Эффекты памяти могут легко привести к нарушению гипотезы молекулярного хаоса. Действительно, они могут означать, что отдельные частицы перед столкновением "помнят" друг друга, их движение не является полностью нескоррелированным. А как мы помним, предположение молекулярного хаоса лежит в основе больцмановского выражения для энтропии. Значит, это выражение не годится для систем с памятью.

Есть и иные системы, в которых то или иное утверждение, приводившее к эффектам памяти, нарушается. Перечислять все типы таких систем нет смысла. Главный вывод для нас состоит в следующем утверждении.

Существуют системы, в которых есть сильные корреляции, сильное взаимодействие между всеми частями системы. Это приводит к нарушению термодинамической аддитивности системы, потому их не удается описать больцмановской статистикой и термодинамикой. Значит, необходим иной подход, который каким-либо образом сумел бы справиться с режимом сильной связи между всеми частицами системы.

Режим сильной связи в конденсированном веществе. Возникшая ситуация, на самом деле, не нова. Физика уже сталкивалась с системами, в которых взаимодействие между частицами насколько важно, что оно полностью меняет картину поведения вещества. И, несмотря на то, что в общем случае теоретическая физика пока бессильна описать произвольную систему в режиме сильной связи, в некоторых конкретных случаях решение все-таки было найдено.

Самый известный случай — это, пожалуй, квазичастицы. Рассмотрим обыкновенный идеальный кристалл. В нем атомы или ионы расположены в строгом порядке, в узлах некой кристаллической решетки. Взаимодействие между соседними атомами настолько значительно, что если мы как-нибудь заставим один атом колебаться, то это моментально приведет к колебанию его соседей, затем более удаленных атомов и так далее. В результате мы получаем, что описывать "жизнь" кристалла на языке колебаний отдельных атомов крайне неудобно: мы не можем заставить один атом колебаться, а другой - нет. Другими словами, отдельные атомы - это не есть настоящие степени свободы "жизни" кристалла.

Как же справиться с этой проблемой? Какое описание наиболее удобно для работы с кристаллом? Оказывается, благодаря высокой симметрии кристалла "жизнь" кристалла можно описать на совершенно ином языке - на языке особых квазичастиц: фононов.
Дело в том, что если мы начинаем колебать один атом, то все атомы тоже рано или поздно начинают колебаться, причем не произвольно, а совершенно определенным способом —

синхронно. То есть, вместо того, чтобы говорить "мы заставили все атомы колебаться по такому-то сложному закону", можно сказать: "мы возбудили в кристалле одно единственное синхронное колебание, один фонон". Оба утверждения эквивалентны, в них содержится одна и та же информация, но второе утверждение намного проще. В результате оказывается, что многие задачи, которые теоретически "не пробивались" на языке колебаний отдельных атомов, относительно легко решаются на языке фононов.

Итог: в нашем конкретном примере мы взглянули на проблему совершенно с другой стороны: вместо сложной задачи о колебании связанных друг с другом атомов мы получили более простую задачу о практически невзаимодействующих фононах:
отдельные атомы + сильное взаимодействие => практически свободные фононы.
К сожалению, введение квазичастиц типа фононов полезно только в том случае, когда атомы образуют некое подобие кристалла. В случае же нашего гравитирующего облака никакого кристалла нет, и значит, фононы нам не помогут. Но тогда возникает предположение: а может быть, с задачей можно справиться, если как-то совершенно по-другому взглянуть на проблему?

Идея Тсаллиса. Попытка такого пересмотра содержится в термодинамике Тсаллиса. Подход базируется на одной смелой идее, на одной гипотезе:
вполне возможно, что сильное взаимодействие в термодинамически аномальных системах настолько меняет картину, что приводит к совершенно новым степеням свободы, к совершенно иной статистической физике небольцмановского типа:
отдельные частицы с больцмановской статистикой + сильное взаимодействие => новые степени свободы с небольцмановской статистикой + отсутствие взаимодействия.

Эта гипотеза не доказана. Более того, совершенно непонятно, что это за новые степени свободы. Нет ни одного примера, когда этот переход был бы явно наблюден, доказан. Поэтому это утверждение остается пока лишь гипотезой. Но с другой стороны, физическая интуиция подсказывает, что такой переход в том или ином виде, в самом деле, может иметь место. Поэтому в таких случаях физик на время оставляет попытки строго доказать этот переход и вместо этого пытается понять, к чему это может привести.
Если почти ничего неизвестно про эти новые степени свободы, то, как же тогда можно получить что-то конструктивное? Тсаллис предложил следующее. Наша единственная зацепка заключается в том, что статистика будет небольцмановская. Это значит, что выражение для энтропии будет уже иное. Надо придумать какую-нибудь формулу для энтропии, которая, во-первых, переходила бы в стандартную формулу в пределе слабой связи, а во-вторых, смогла бы описать неэкстенсивные системы.

Тсаллис взял стандартное выражение для энтропии, и вместо логарифма ввел новую функцию - степенную:

$$ln(x) \dashrightarrow ln_q(x) = (x^{1-q} - 1)/(1-q)$$

с неким числовым параметром q. При q, стремящемся к 1, $ln_q(x)$ переходит в обычный логарифм, в чем можно убедиться простым дифференцированием. Новая формула для q-энтропии выглядит так:

$$S_q = -\Sigma_i \left(p_i^q \, ln_q(p_i) \right) = (1 - \Sigma_i \, p_i^q)/(q-1).$$

Если $q > 1$, то q - энтропия переходит в стандартную больцмановскую энтропию.

Главное следствие такой замены: q-энтропия является уже не экстенсивной функцией. Если всю систему разбить на две независимых подсистемы A и B (напомним, что мы уже перешли к новым *невзаимодействующим*, а значит, и *независимым* степеням свободы), то мы получим:

$$S_q(A+B) = S_q(A) + S_q(B) + (1-q)S_q(A)S_q(B)$$

Итак, параметр q - это мера неэкстенсивности системы. Как видно, величина q пока ничем не ограничена и может принимать значения: $-\infty \div +\infty$, однако некоторые ограничения могут возникнуть в той или иной конкретной задаче.

Может возникнуть резонный вопрос: ну хорошо, построили мы новую энтропию. Но откуда мы знаем, что эта энтропия обладает свойством увеличиваться при эволюции системы? Ведь, казалось бы, кинетическое уравнение Больцмана однозначно говорит, что неубывающей функцией является именно стандартное, больцмановское выражение для энтропии. Ответ на этот вопрос прост: кинетическое уравнение Больцмана не универсально, а базируется на гипотезе молекулярного хаоса. Если же эта гипотеза нарушается, то нарушится и закон не убывания больцмановской энтропии. Более того, удается показать, что гипотезу молекулярного хаоса можно видоизменить таким способом, чтобы неубывающей функцией оказалась именно q-энтропия. Таким образом, предложение Тсаллиса влечет за собой не только обобщение термодинамики и статистической физики, но и обобщение физической кинетики. Однако надо четко понимать, что это — не есть вывод термостатистики Тсаллиса, не есть доказательство того, что форма энтропии должна быть именно такая. Опять же, это лишь игра с формулами, исследование того, что *в принципе* может быть реализовано в природе.

Крайне важно понимать, что выбранная функциональная форма q-энтропии достаточно произвольна. Ее самый главный плюс: она может ***промоделировать*** *неэкстенсивность. Однако доказательства того, что именно такая форма и должна возникать, нет.*

Тсаллис предложил некоторое обобщение термодинамического подхода. Действительно, обычная термодинамика получается из нашего общего подхода при вполне конкретном значении параметра $q = 1$. Если же q отлично от 1, то мы имеем уже иную теорию, со своими законами, которые нам еще предстоит исследовать. Таким образом, мы построили целый класс различных термодинамик! И теперь наша задача — понять, каким физическим системам будет соответствовать та или иная термодинамика.

Развитие теории. Итак, имеется новое выражение для энтропии. На основе его мы теперь можем строить здание новой статистической физики. Прежде, следует упомянуть здесь два интересных явления, возникающих в термостатистике Тсаллиса.
Первое — это последствия перехода от логарифмической к степенной функции. Если рассмотреть в рамках новой теории канонический ансамбль и получить, скажем, распределение частиц по энергии, то вместо известного распределения Гиббса:

$$p(E) \sim exp(-E/kT)$$

мы получим:

$$p(E) \sim [1 + (1-q)*(-E/kT)]^{q/(1-q)}$$

Самым важным здесь является поведение этого распределения при больших значениях энергии. При $q>1$ мы имеем *степенное*, а не экспоненциальное падение с ростом энергии, а при $q<1$ мы получаем, что существует максимально возможная энергия, то есть, распределение обрезается на некотором значении E. Все три типа кривых ($q<1$, $q=1$, $q>1$) схематически показаны на рис.П4 -6-а.

Второе явление, более экзотическое, но, тем не менее, очень интересное. При переходе от статистической физики к термодинамике обычно используется термодинамический предел: количество частиц стремится к бесконечности и время, прошедшее между "приготовлением" системы и наблюдением за ней, стремится к бесконечности (для того, чтобы избавиться от зависимости от начальных условий). В случае обычной термодинамики было неважным, какой из этих двух пределов брать первым. Теперь же, в случае термодинамики Тсаллиса эти два предела могут отвечать различным физическим ситуациям (рис. П4-6-б).

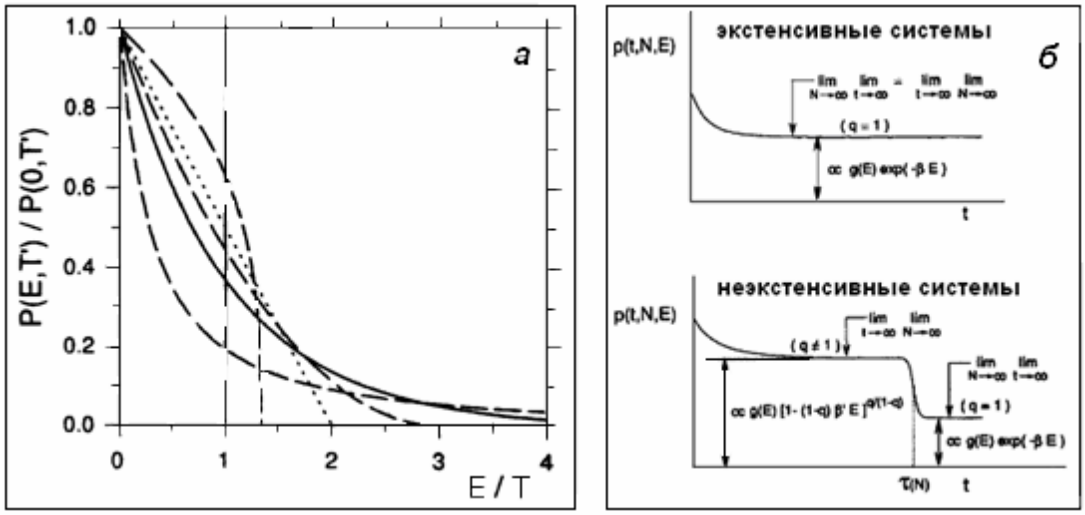


Рис. П4-6. Распределение частиц по энергии в термостатистике Тсаллиса (а). Эволюция системы с памятью во времени. На нижнем рисунке количество частиц, большее, нежели на верхнем (б).

Итак, рассмотрим некую термодинамически аномальную систему и проследим, как меняется во времени некая характеристика этой системы. В первые моменты после приготовления система эволюционировала, пока не пришла в некое термодинамически метастабильное состояние. Через некоторое достаточно большое время система, наконец, "сваливается" в стабильное состояние.

В силу некоторых причин (см. ниже) время "удержания" системы в метастабильном состоянии может расти с увеличением числа частиц в системе. Это показано на рис. П4-6-б: видно, что на нижнем графике число частиц больше, чем на верхнем, и значит, время жизни метастабильного состояния также больше.

Что отсюда следует? Если мы держим число частиц конечным, и стремим время наблюдения к бесконечности, мы движемся по одному из графиков вдоль оси времени (горизонтальная стрелка на рисунке). Для любого конечного N мы в пределе больших времен получаем стабильное состояние. Если же мы зафиксируем время наблюдения, и будем неограниченно увеличивать число частиц, мы будем двигаться вниз по рисунку, и для любого конечного времени мы получим, в конце концов, метастабильное состояние. Если же мы имеем дело с реальной системой - то есть, количество частиц и время велики, но конечны, то могут реализоваться обе ситуации. Отсюда следует нетривиальный вывод:
В рамках термостатистики Тсаллиса, даже для одной и той же физической системы мы можем получить совершенно разные термодинамические картины!

И теперь несколько слов о том, как в системе может возникнуть большой масштаб времени. Возможностей здесь, по-видимому, может быть несколько, но одна из них такова. Взаимодействие между частицами может обладать такими свойствами, что после приготовления системы частицы начинают не хаотично двигаться по всему доступному фазовому объему, а "крутиться" около некоторых метастабильных траекторий (нечто типа аттрактора). Это, кстати, будет одним из примеров системы с памятью. Для того чтобы частицы "вылетели" из этой западни и начали блуждать по всему фазовому пространству (для того, чтобы система термализовалась), требуется некоторое значительное время, которое вполне можно представить зависящим от числа частиц. И в то время, пока частицы блуждают по своему ограниченному подпространству, вся система целиком и находится в метастабильном состоянии.

Что же есть в реальном мире? Как же нам искать системы, описываемые той или иной неэкстенсивной термодинамикой? Прежде всего, сразу же можно попытаться

применить термостатистику Тсаллиса к тем системам, в которых мы уже подозревали неэкстенсивность (наш пример — облако самогравитирующего газа). Например, есть проблема с распределением по скоростям спиральных галактик в скоплениях, а именно, экспериментальные данные указывают на то, что это распределение резко обрывается на значении ~ 500 км/сек. Подход, основанный на термостатистике Тсаллиса, дал намного лучшее описание распределения по скоростям галактик, нежели все предыдущие попытки.

Другой пример систем, в которых можно заранее подозревать неэкстенсивность, является плазма, где были исследованы продольные (электростатические) волны в бесстолкновительной плазме в рамках термостатистики Тсаллиса. Идея ее применения к плазменным волнам базируется на двух основных аргументах. Во-первых, кулоновское взаимодействие - это все-таки дальнодействующие силы, и потому могут приводить к неэкстенсивности плазмы. Кроме того, существуют и экспериментальные указания на то, что распределение ионов по скоростям в плазме отлично от максвелловского. Развита теория электростатических плазменных волн в рамках термостатистики Тсаллиса и сделан ряд предсказаний, отличных от стандартных, которые можно было бы непосредственно проверить на опыте. Это касается, в частности, коэффициента затухания Ландау, а именно, его зависимости от длины волны.

Кроме этого, была предпринята попытка, привлечь термостатистику Тсаллиса к описанию развитой турбулентности. Рассматривались две точки, разделенные неким расстоянием r, и будем измерять относительную скорость u жидкости в этих точках. Поскольку мы имеем дело с турбулентностью, то, делая измерения в разных местах жидкости, мы будем получать различные значения u. Таким образом, у нас получится некое распределение по скорости u. Экспериментальный факт: это распределение имеет не максвелловский вид, а спадает при больших u, по степенному закону.

Применение термостатистики Тсаллиса к этому распределению оказалось успешным. Авторы этой работы смогли даже дать интерпретацию параметру q и получили формулу, дающую значение q как функцию расстояния r. Предсказания хорошо согласуются с экспериментом, что позволяет надеяться, что мы, используя новую обобщенную статистику, в самом деле "ухватили" что-то важное в физике турбулентности.

Наконец, термостатистика Тсаллиса находит свое применение и при изучении эволюции так называемых *сложных сетей*. Сложная сеть — это система, состоящая из большого числа узлов, которые могут определенным образом взаимодействовать друг с другом. Сюда относятся многие социальные сообщества (например, фондовые биржи), компьютерные сети (Интернет) и т.д. Во всех этих случаях есть важное явление "дальнодействия" — каждый узел сети может взаимодействовать не только с несколькими ближайшими соседями, но и со многими удаленными узлами, число которых, к тому же, может меняться со временем. Применение термостатистики Тсаллиса и здесь выглядит вполне оправданным.

6. Примеры фрактальности и самоорганизации параметров Земли.

Явления самоорганизации происходят в природе повсеместно. Например, кусок горной породы сжимается на гидравлическом прессе. В нем по всему объему ($D = 3$) образуются трещины, которые, раскрываясь, генерируют акустические импульсы, регистрируемые аппаратурой. По мере увеличения нагрузки, трещины, за счет взаимодействия друг с другом, стягиваются к плоскости Кулона-Мора ($D = 2$), по которой, в дальнейшем, произойдет разрушение образца. Вероятно, самоорганизацию в Природе можно считать одним из законов ФЗ.

Фрактальная Пангея.

На поверхности «далекой планеты», изображенной на рис. 16-7, показаны очертания воображаемой фрактальной Пангеи (Мандельброт, 2002). Картина получена

посредством компьютерной реализации случайной поверхности броуновской функции из точек на сфере. Уровень океана был выбран таким образом, чтобы три четверти общей площади оказались под водой. Береговая линия получена интерполяцией. Размерность D береговой линии модельной Пангеи составляет 3/2, в то время как гипотетические рисунки в учебниках геологии приписывают реальной Пангее то же значение D, что наблюдается в очертаниях современных континентов, т.е. $D \approx 1.2$.

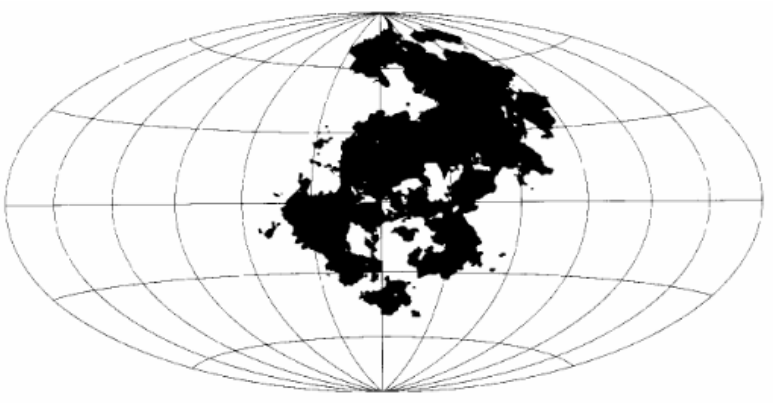


Рис. П4-7. Фрактальная Пангея Мандельброта (2002).

Фрактальность инверсий и экскурсов геомагнитного поля.

Информация о периодах инверсий неоднократно привлекала внимание исследователей, которых интересовал, в частности, такой вопрос: можно ли сказать что-либо определенное о характере эволюции Земли? Например, развивалась Земля случайным образом, или в природе ее эволюции заложены какие-то принципы? Надо сказать, что анализ данных по инверсиям (Харланд и др., 1985) приводил авторов к различным выводам: от полного отрицания каких-либо закономерностей, до выделения четкой периодичности. В течение последних примерно 80 млн. лет инверсии на Земле случались в среднем примерно 2-3 раза в миллион лет. В течение предыдущих 40 млн. лет (120 – 80) инверсий не было вовсе, а во время предыдущих 40 (от 160 до 120 млн. лет назад) - характер инверсий был примерно тот же, что и в течение последних 80 млн. лет (см. рис. П4-8-а). Период 120 - 80 млн. лет назад, в течение которого инверсий вообще не было, получил название меловой суперхрон. По некоторым данным, ещё ранее 160 млн. лет тому назад, тоже происходил суперхрон - юрский, еще раньше (250-300) - карбонский и т.п. В истории магнитного поля Земли суперхроны случались довольно регулярно, они перемежались периодами частых инверсий. Замечено, что длительность периодов суперхронов со временем постепенно увеличивалась таким образом, что последний из них был самым длинным.

На рис. П4-8-а изображен ряд инверсий (I) геомагнитного поля, случившихся за время последних 160 млн. лет (Харланд и др., 1985). Ниже, на этом рисунке, приведена оценка клеточной фрактальной размерности ряда периодов времени между инверсиями, полученная методом покрытий (Федер, 1991). Она выражается зависимостью: $N(\delta) = \alpha\delta^{D}$, здесь δ - имеет смысл длительности периода (dT) между инверсиями, $\alpha \sim p(t)$ вероятность того, что произвольно выбранный интервал будет иметь продолжительность t, величина фрактальной размерности D = 1,59, а $N(\delta)$ означает число интервалов. Зависимости подобного типа принято считать скейлинговыми соотношениями. В нашем случае, это выражение характеризует масштабную инвариантность процесса для продолжительностей интервалов одинаковой полярности поля (Иванов, 1996; Федер, 1991). Полученная зависимость показывает, что количество интервалов, например, длительностью в 10 млн.

лет в три раза больше, чем периодов в 20 млн. лет и т.п. Это соотношение справедливо для периодов, больших одного млн. лет (Иванов, 1996).

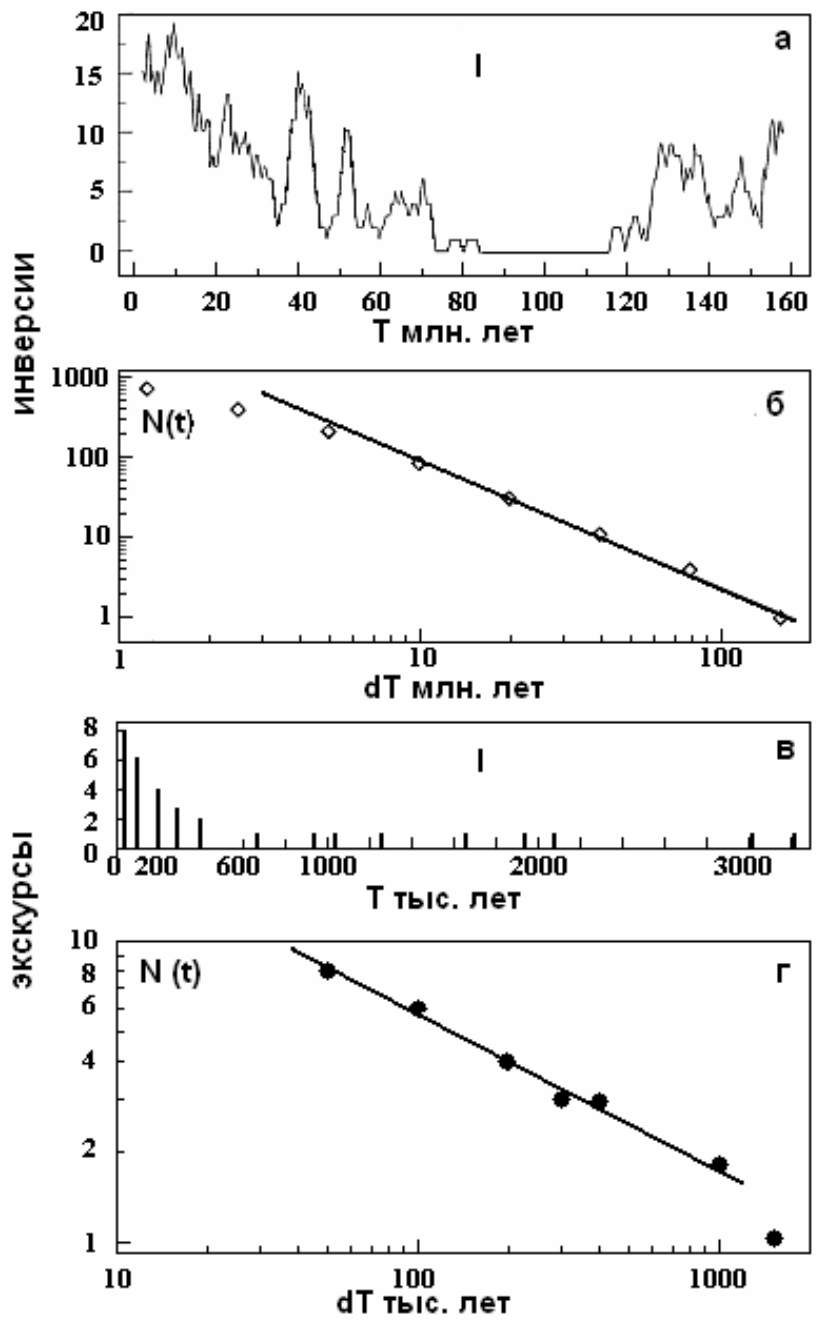


Рис. П4- 8. Распределение количества инверсий *I*, произошедших в течение трех млн. лет, за *T* = 160 млн. лет эволюции геомагнитного поля (Харланд, 1985) - (а); б - оценка величины клеточной фрактальной размерности ($D = lgN(t)/lgdT$); Количество экскурсов *I* в течение 3 млн. лет - в; клеточная фрактальная размерность экскурсов - г.

Аналогичным образом исследована последовательность экскурсов, Как оказалось, - обе последовательности: фрактальны, идентичны и обладают скейлингом (при изменении временного масштаба на два порядка характер зависимостей не меняется). Полученный результат свидетельствует, что геомагнитное поле фрактально на различных временах. Это означает, что в области генерации поля происходят процессы самоорганизации различного временного масштаба, что необходимо учитывать при построении модели генерации геомагнитного поля.

Фрактальность землетрясений, извержений вулканов и энергии излучения звезд.

При раскрытии трещины излучается звуковой импульс акустической эмиссии (АЭ). Этот импульс "несет" определенную долю энергии и, взаимодействуя с дилатоном (микротрещиной), передает ему энергию, "помогая" раскрыться. Трещина начинает расти и излучает при этом "свой" импульс, который взаимодействует со следующей трещиной и т.д. При этом может наблюдаться эффект лавинного образования трещин, звуковые импульсы которых когерентно складываются, обеспечивая при этом явление усиления звуковой волны (Ishido, Nishizawa, 1984) и возникновение фрактальных структур (рис. П4-9).

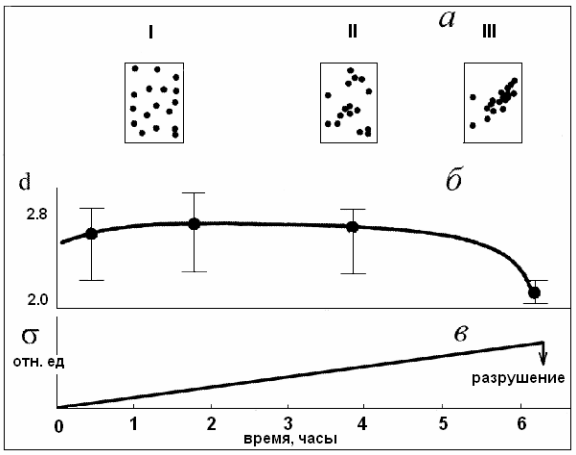


Рис. П4-9. *а* - Распределение гипоцентров акустической эмиссии по мере увеличения сжатия образцов гранита и возникновение фрактальных структур. *б* - изменение фрактальной размерности *d*. *в*– нагрузка образца до его разрушения (Lei et al., 1992).

В качестве примера природного фликкер-шума, обычно приводят известный закон повторяемости землетрясений и извержений вулканов. Похожий закон характеризует, например, зависимость полной энергии излучения вспышек на звездах, в том числе и на Солнце (рис. П4-10), аналогичные зависимости характерны для спектров галактических космических лучей и т.п. По-видимому, первыми, кто обратил внимание на этот закон, были египтяне, которые обнаружили, что интенсивность разливов Нила, - обратно пропорциональна их частоте. Всё это говорит об универсальности в Природе такого явления, как фликкер-шум.

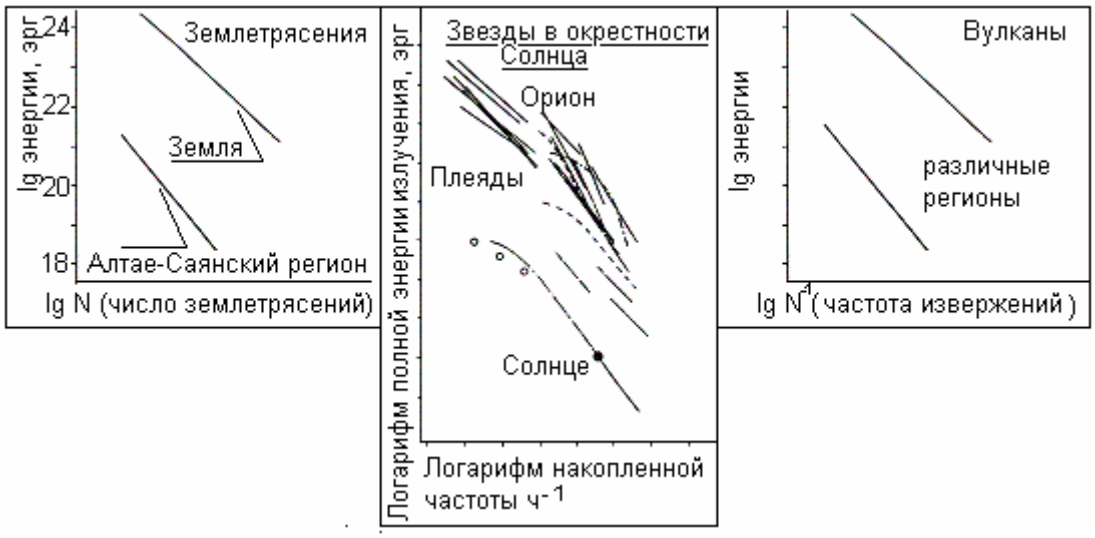


Рис. П4-10. Повторяемость землетрясений, энергетические спектры вспышек, частота извержений вулканов (Кузнецов, 1992).

Фрактальность климата.

Выясним, можно ли считать климат фрактальным и, соответственно, структуру, образующую климат на Земле, - открытой самоорганизующейся структурой? Основания к положительному ответу на этот вопрос, конечно, есть. Начнем с того, что пилообразный характер вариации температуры говорит о том, что такая возможность имеет место. Приведем пример, где зависимость, полученная при наблюдении за высотой падения оползня в течение 20 тыс. лет наблюдений (Hergarten, Neugebauer, 1998), внешне очень похожа на график, приведенный на верхней панели рис. П4-11. В этой работе авторы утверждают, что для объяснения характера движения оползней с проскальзыванием можно эффективно использовать идею самоорганизованной критичности, впервые высказанную в работе (Bak et al, 1987).

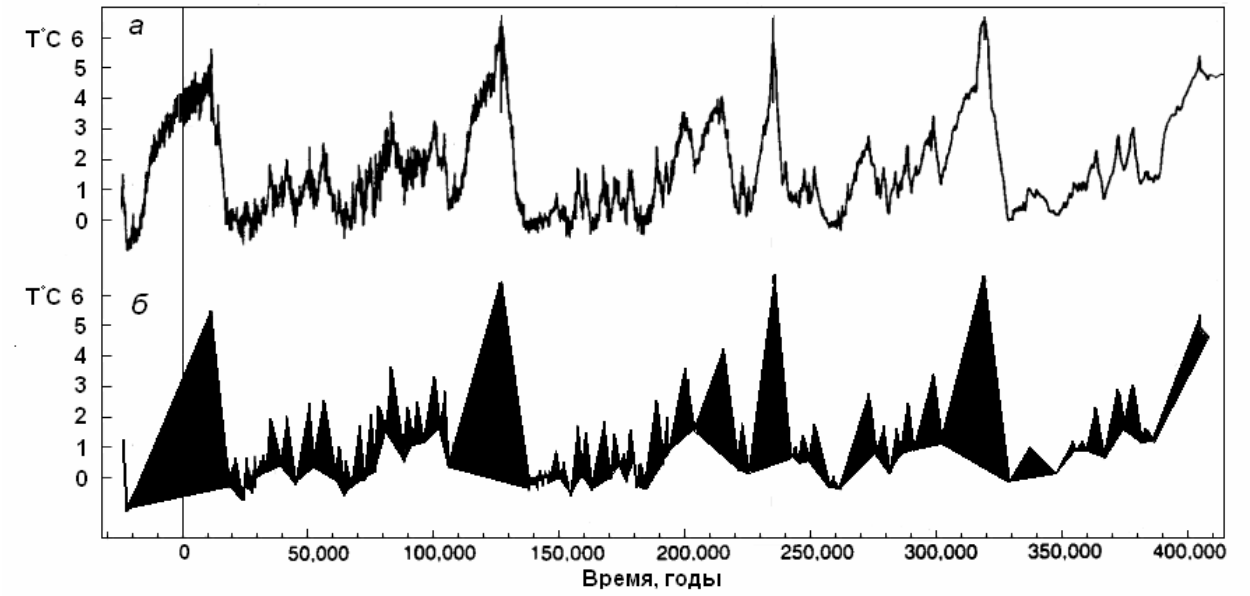


Рис. П4-11. Вариация температуры в течение 400 тыс. лет. Верхняя панель – по данным (Petit et. Al., 1999; Vimeux et al., 2002), нижняя – эта же кривая после преобразования.

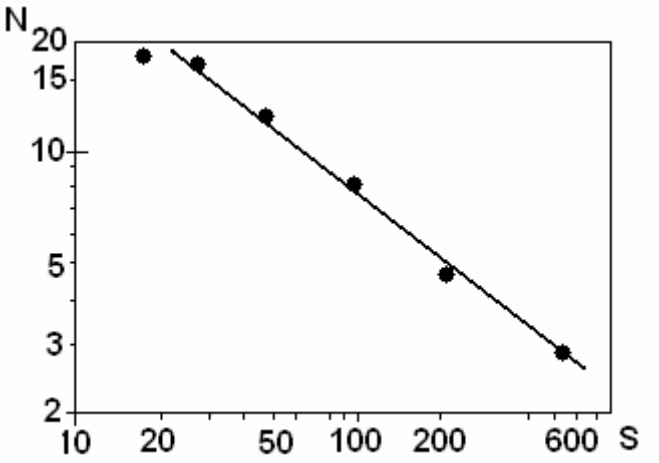


Рис. П4-12. График lg$N$ – lg S , где S – «пик» повышения температуры (в отн. ед.), N – число пиков в интервале величин S. В течение 400 тыс. лет выделено 45 «пиков».

На нижней панели рис. П4-11 приведен график $T(t)$, преобразованный таким образом, чтобы пик температуры можно было бы выразить как площадь затемненного

треугольника *S*. Подсчитав количество пиков данной площади *N*, построим график: lg*N* – lg *S*. Как и предполагалось, этот график можно аппроксимировать линией, наклон которой к горизонту определяет фрактальную размерность климата (рис. П4-12). Наличие подобной зависимости, как принято считать, характеризует систему, способную к самоорганизации. Отсюда следует фундаментальный вывод о том, что климат может быть фрактальным, по крайней мере, в течение последних 400 тыс. лет.

Анализируя далеко не полный перечень примеров фрактальности Земли, - приходим к выводу о том, что Земля, это открытая самоорганизующаяся структура, в которой происходят диссипативные процессы, приводящие, в конечном счете, к уменьшению фрактальной размерности, иначе, к минимизации таких параметров как гравитационный потенциал планеты,

Литература

Зосимов В.В., Лямшев Л.М. Фракталы в волновых процессах. УФН. 1995. Т. 165. № 4. С. 361-402.

Иванов С.С. Самоподобие последовательности инверсий геомагнитного поля. Геомагнетизм и Аэрономия. 1993. Т. 33. № 5. С. 181-186.

Иванов С.С. Мультифрактальные свойства и размерность аттрактора обращений геомагнитного поля. Геомагнетизм и Аэрономия. 1996. Т. 36. № 4. С. 149.

Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. 2002, М.: ИКИ. 656 с.

Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.

Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.

Харланд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г. и др. Шкала геологического времени. М.: Мир. 1985. 188 с

Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality. An explanation of 1/f noise // Phys. Rev. Lett. 1987. 59. P, 381-384.

Christensen K. Replies. Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. N. 8. P. 1289-1292

Ding E.J., Lu Y.N. Analytical treatment for a spring-block model. Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. N. 23. P. 3627-3630.

Hergarten S., Neugebauer H.J. Self-organized criticality in landslide model // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. No. 6. P. 801-804.

Ishido T., Nishizawa O. Effect of zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression. J. Geophys. Res. 1984. V. 89. N. B6. P. 4153-4159.

Klein W., Rundle J. Comment on “Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes”. Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. N. 8. P. 1288.

Lei X., Nishizawa O., Kusunose K., Satoh T. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes. J. Phys. Earth. 1992. V. 40. P. 617-634.

Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman.: N.Y.1983. 272p.

Olami Z., Feder H.J.S., Christensen K. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. N. 8. P. 1244-1247.

Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D., et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature V. 399, P. 429-436, 1999.

Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. J. Stat. Phys. 1988. V. 52. P. 479-487.

Vimeux F., Cuffey K. M., Jouzel J. New insights into Southern hemisphere temperature changes from Vostok ice cores using deuterium excess correction. Earth Plan. Sci. Lett. V. 203, P. 829-843, 2002.

Приложение 5. Модели гравитации.

В Приложении 5 приведен обзор различных моделей гравитации. Даются общие сведения о гравитации и Вселенной. Обсуждаются вопросы: гравитация как важнейший фактор структуры Вселенной, Вселенная с точки зрения Ньютоновской теории тяготения. Гравитация Ньютона и Лесажа. ОТО, Релятивистская теория гравитации. ОТО и квантовая механика. Квантовая гравитация Янчилина. Принцип наименьшего действия. Скорость распространяется гравитации. Гипотеза о нелокальной природе гравитационного поля. Черные дыры. Самогравитация.

5. 1. Классификация альтернативных теорий гравитации.

В физике XVII-XIX столетий доминирующей теорией гравитации была теория Ньютона. В настоящее время большинство физиков основной теорией гравитации считают общую теорию относительности (ОТО), поскольку, принято считать, что существующий массив экспериментов и наблюдений, - с ней согласуется. Однако ОТО имеет ряд существенных проблем, что приводит к попыткам модификации ОТО или к представлению новых теорий. Современные теории гравитации можно разбить на следующие основные классы:

1) Метрические теории. Сюда относятся ОТО, релятивистская теория гравитация (РТГ) Логунова, и другие.
2) Неметрические теории наподобие теории Эйнштейна-Картана.
3) Векторные теории.
4) Скалярные теории. Примером является теория Нордстрема.
5) Скалярно-тензорные теории. Такова, в частности, теория Йордана-Бранса-Дике.
6) Теории, альтернативные классической теории Ньютона. Известными теориями являются гравитация Ле-Сажа и модифицированная ньютоновская динамика (МОНД).
7) Теории квантовой гравитации, представленные целой серией разновидностей.
8) Теории объединения различных физических взаимодействий. Здесь можно указать теорию супергравитации и теорию струн.

Вселенная.

- ***Основные характеристики Вселенной*:** Размер ~10^{28}см. Масса ~10^{55}г.
- *Образование*: время t ~10^{-43}с, размер r ~10^{-33}см, температура $T = 10^{28}$ К, размер области, из которой образовалась наблюдаемая часть Вселенной, был порядка ~10^{-4}см.
- ***Вселенная расширяется.*** Этот фундаментальный научный факт, установленный теоретически А.А. Фридманом (1922) и экспериментально Э.Хабблом (1929), является общепризнанным. Под расширением Вселенной подразумевается, что радиус её кривизны, по крайней мере на современном этапе, - растет. Проявляется это в том, что расстояния между далекими галактиками увеличивается и тем быстрее, чем дальше они находятся друг от друга. При наблюдении с Земли далекие галактики «разбегаются» от Земли, что подтверждается красным смещением в спектрах этих галактик.
- ***Расширение Вселенной*** сопровождалось охлаждением её вещества и изменением его состава:

$T = 10^{12}$ К - материя во Вселенной: электрон-позитронные пары (е-, е+); мюоны и антимюоны (м-, м+); нейтрино и антинейтрино, нуклоны (протоны и нейтроны) и электромагнитное излучение.

$T = 10^{10}$ К - время этих реакций близко к возрасту Метагалактики.

$T = 5\ 10^{7}$ К - первичный химический состав вещества: 26% 4He; 74% - водород 0,01 - 0,0001% - дейтерий, гелий - 3 и тритий.

$T = 10^{4}$ К - взаимодействие электронов с протонами сопровождалось образованием атомов водорода.

Таблица П5.1.

Теории гравитации			
Стандартные	**Альтернативные ОТО**	**Объединённые теории поля**	**Другие**
Классическая теория тяготения Ньютона **Общая теория относительности (ОТО)** **Принцип Маха**	Релятивистская теория гравитации Классические теории гравитации Конформная гравитация **Скалярные теории** Теория Нордстрема Теория Илмаза **Скалярно-тензорные теории** Теория Йордана-Бранса-Дике Космология самотворения массы **Биметрические теории** **Другие альтернативы** Теория Эйнштейна-Картана Теория гравитации Уайтхеда Несимметричные теории гравитации Скаляр-тензор-векторная гравитация Тензор-вектор-скалярная гравитация	Телепараллелизм Геометродинамика **Квантовая гравитация** Полуклассическая гравитация Дискретная лоренцевская квантовая гравитация Евклидовая квантовая гравитация Индуцированная гравитация Петлевая квантовая гравитация Условие Уилера-де Витта **Теории всего** Супергравитация М-теория Теория струн Перечень терминов и имён, связанных с теорией струн Исключительно простая теория всего	**ОТО, модифицированная дополнительными размерностями** Теория Калуцы-Клейна Модель гравитации DGP **Альтернативы теории Ньютона** Гравитация по Аристотелю Гравитация Фатио-Лесажа Модифицированная ньютоновская динамика (MOND) **Теории без классификации** Составная гравитация Гравитация с массивным гравитоном Электрогравитация Гравитомагнетизм Антигравитация Левитация

- *Плотность вещества.* Современная плотность вещества ρ_o = 1,4 10^{-31} г/см^3. Хаббл определил, что чем дальше от нас находится галактика, тем больше величина красного смещения в её спектре. Коэффициент пропорциональности между расстоянием до галактики и скоростью её удаления (постоянная Хаббла H): $H \approx 20$ км/с на каждый миллион световых лет. Скорость удаления галактики, вызванная расширением Вселенной: $V = HR$, где R – расстояние до галактики. Величина обратная постоянной Хаббла – максимальный возраст Вселенной t: $t = 1/H = 16$ млрд. лет. Реально, величина t меньше ~ 10 млрд. лет. Критическая плотность вещества Вселенной $= 3H^2/8\pi G$. Если плотность Вселенной больше критической – Вселенная замкнута, если меньше, то открыта. По современным астрономическим данным средняя плотность Вселенной близка к критической, а точнее, больше её на несколько процентов. Погрешность составляет тоже несколько процентов. Поэтому вопрос о дальнейшей судьбе Вселенной остается открытым.

- *Реликтовое излучение* было обнаружено в 1964 радиоастрономами Пензиасом и Вильсоном. Интенсивность радиошумов нашей Галактики на длине волны 7.35 см оказалась независимой от направления. Спектр шума соответствует спектру электромагнитного излучения абсолютно черного тела с температурой 2.7 К. Излучение возникло в ранней Вселенной, когда её температура была 3000 К, было названо реликтовым. Изучение реликтового излучения показало, что Вселенная однородна, изотропна, структурирована и, в отличие от галактик, - в ней отсутствует вращение.

Гравитация как важнейший фактор структуры Вселенной.

В структуре окружающего нас мира гравитация (тяготение) играет чрезвычайно важную, фундаментальную роль. По сравнению с электрическими силами притяжения и отталкивания между двумя заряженными элементарными частицами тяготение очень слабо. Причина, по которой столь большой разрыв по величине не обнаруживается на каждом шагу в повседневной жизни, заключается в том, что преобладающая часть вещества в своей обычной форме электрически почти нейтральна, поскольку число положительных и отрицательных зарядов в его объеме одинаково. Поэтому огромные электрические силы объема просто не имеют возможности полностью развиться. Сила гравитационного притяжения настолько невелика, что измерить ее действие между телами обычных размеров, в лабораторных условиях, удается только при соблюдении особых предосторожностей. Например, сила гравитационного притяжения между двумя людьми массой по 80 кг, стоящих вплотную спиной друг к другу, менее 10^{-5} Н (= 1 дине). Измерения столь слабых сил затрудняются необходимостью их выделения на фоне разного рода посторонних сил.

Вселенная с точки зрения Ньютоновской теории тяготения.

Будем следовать автору (Мясников, 2004), считая Вселенную сферической. M – масса Вселенной. Тогда радиус Вселенной (гравитационный радиус) $R = GM/c^2$.

Из закона тяготения для $r << R$, находим квадрат скорости свободного падения на гравитационную сферу:

$$V^2 = [2GM/(R^2 - r^2)^{1/2} - 2c^2 = c^2r^2/R^2,$$

откуда:

$$V = cr/R = rH, \quad H = c/R = c^3/GM,$$

- закон Хаббла с постоянной Хаббла H (не зависящей от r). Таким образом, удаленные галактики находятся в состоянии свободного падения под действием гравитационных сил, Отсюда, в частности, автор (Мясников, 2004) делает вывод, что космологическое и гравитационное красные смещения должны быть одной природы.

Общее уравнение для законов Ньютона и Хаббла.

У. Кэрри (1991) соединил законы Ньютона и Хаббла в общее уравнение подобно тому, как Максвелл объединил законы упругой и вязкой деформации:

$$F = G\, m_1 m_2 (1/d^2 - a d^2 H^4/c^4),$$

где G – гравитационная постоянная, m_1, m_2 - массы двух тел, H - скорость разбегания галактик – постоянная Хаббла, c – скорость света, a – безразмерный коэффициент, определяемый эмпирически. В этом уравнении, если опустить последний член, получим уравнение Ньютона, если первый, - получим закон разбегания галактик Хаббла. H – величина очень малая и когда d – ограничено размерами Солнечной системы, обнаружить присутствие эффекта разбегания – невозможно. Расстояние d, на котором силы ньютоновской гравитации становятся сравнимы с силами хаббловского разбегания («нуль» Ньютона-Хаббла, на рис. П5-1.) определяют, по мнению Кэрри, расстояние между галактиками. Подстановка реальных величин в формулу Кэрри (при равенстве коэффициента a единице) величина d оказывается равной радиусу познаваемой Вселенной. Чтобы из этого уравнения получить наблюдаемые скорости разбегания галактик, a следует принять равным 10^{20}: тогда ньютоновское притяжение и хаббловское отталкивание сравняются при расстоянии d равном 10^5 световых лет.

Уравнение Кэрри позволяет оценить расстояние, при котором уравновешиваются две силы. Оказывается, что это точно начальное расстояние между галактиками. Действительно, известно, что триллионы галактик примерно одинаковы по размерам – точнее, их размеры образуют гауссово распределение около некоторого среднего, в то время как расстояние между галактиками, – возрастает. Ближе всех к нашей Галактике (Млечному Пути) находится галактика Большого Магелланова Облака: она лишь немного дальше минимума Ньютона-Хаббла, а наш ближайший спиральный сосед – большая туманность М31 в созвездии Андромеды – располагается на расстоянии около 2 млн. св. лет.

Рис. П5-1. Модифицированный закон тяготения (Кэрри, 1991).

Бременский физик Генрих Вильгельм Ольберст в 1826 году обратил внимание на то, что если бы звезды были бы распределены в бесконечной Вселенной равномерно, то луч зрения в любом направлении обязательно встретился со звездой, и всё небо было бы залито ослепительным ярким светом. На этот парадокс Ольберсту ответил лорд Кельвин.

Он полагал, что звезды испускают свет за счет гравитационного сжатия (так он считал), которое ограничивает продолжительность их жизни величиной в 100 млн. лет. Время распространения света от звезд гораздо больше, чем длится их светимость. Даже если звезды встречаются во всем окружающем нас пространстве до бесконечности, мы в любое данное время можем видеть свет только от малой их доли. Сегодня мы понимаем, что Кельвин ошибался. Смысл парадокса Ольберста состоит в следующем. В расширяющейся Вселенной скорости разбегания далеких галактик составляют не такую малую долю от скорости света и доплеровское смещение цвета в красную область спектра весьма значительно, и вполне измеримо. Свет сдвигается в инфракрасную и, далее, в длинноволновую область радиочастот. На таком удалении звезды становятся тусклыми и не различаются и ни оптическими, ни радио телескопами, – Вселенная как бы исчезает. Галактики на таких расстояниях уже телескопами не разрешимы, они представляют собой некое фоновое излучение с температурой 3К. Однако это совсем не означает, что это мы имеем границу Вселенной, совсем нет. Так же как, моряк в открытом океане наблюдает только некий горизонт, но океан продолжается значительно дальше. Фоновое радиоизлучение черного тела температурой 3 К, позволяющее «заглянуть» в самые отдаленные области Вселенной, Кэрри назвал «окном Ольберста».

Масса и сила гравитации.

По мере увеличения масс гравитационные эффекты становятся все более заметными и, в конце концов, начинают доминировать над всеми остальными. Представим себе условия, царящие на одном из малых астероидов Солнечной системы – на шаровидной каменной глыбе радиусом 1 км. Сила тяжести на поверхности такого астероида составляет 1/15 000 силы тяжести на поверхности Земли, где ускорение свободного падения равно 9,81 м/с^2. Масса, имеющая вес на поверхности Земли одну тонну, - на поверхности такого астероида весила бы около 50 г. Скорость отрыва (при которой тело, двигаясь по радиусу от центра астероида, преодолевает созданное последним гравитационное поле) составила бы всего лишь 1,2 м/с, или 4 км/ч (скорость не очень быстро идущего пешехода). Таким образом, гуляя по поверхности астероида, приходилось бы избегать резких движений и не превышать указанную скорость, чтобы не улететь навсегда в космическое пространство. Роль самогравитации растет по мере перехода ко все более крупным телам – Земле, большим планетам, вроде Юпитера, и, наконец, к звездам, например Солнцу. Так, самогравитация поддерживает сферическую форму жидкого ядра Земли и окружающей это ядро ее твердой мантии, как и земную атмосферу. Межмолекулярные силы сцепления, удерживающие вместе частицы твердых тел и жидкостей, в космических масштабах уже не эффективны, и только самогравитация позволяет существовать как единому целому таким гигантским газовым шарам, как звезды. Без гравитации этих тел просто не было бы, как не было бы и миров, пригодных для жизни.

При переходе к еще большим масштабам гравитация организует отдельные небесные тела в системы. Размеры таких систем разные, – от сравнительно небольших (с астрономической точки зрения) и простых систем, как, например, система Земля – Луна, Солнечная система, и двойные, или кратные звезды, до - насчитывающих сотни тысяч звезд, - больших звездных скоплений. «Жизнь», или эволюцию, отдельного звездного скопления можно рассматривать как балансирование между взаимным расхождением звезд и тяготением, которое стремится удержать скопление как единое целое. Время от времени, какая-нибудь звезда, двигаясь в направлении других звезд, приобретает от них импульс и скорость, позволяющие ей вылететь из скопления, - и навсегда покинуть его. Оставшиеся звезды образуют еще более тесное скопление, и тяготение связывает их еще сильнее, чем прежде. Тяготение помогает также удерживаться вместе в космическом пространстве газовым и пылевым облакам, а иногда даже сжимает их в компактные и более или менее шарообразные сгустки материи. Темные силуэты многих таких объектов

можно наблюдать на более ярком фоне Млечного Пути. Согласно принятой сегодня теории формирования звезд, если масса такого объекта достаточно велика, то давление в его недрах достигает уровня, при котором становятся возможными ядерные реакции, и плотный сгусток материи превращается в звезду. Астрономам удалось получить снимки, подтверждающие образование звезд в тех местах космического пространства, где ранее наблюдались только облака материи, что свидетельствует в пользу существующей теории. Тяготение играет важнейшую роль во всех теориях происхождения, развития и строения Вселенной в целом. Почти все они опираются на общую теорию относительности. В этой теории, созданной Эйнштейном в начале 20 в., тяготение рассматривается как свойство четырехмерной геометрии пространства-времени, как нечто подобное кривизне сферической поверхности, обобщенной на большее число измерений. «Искривленность» пространства-времени тесно связана с распределением находящейся в нем материи.

Во всех космологических теориях принимается, что тяготение – свойство любого вида материи, проявляющееся повсюду во Вселенной, хотя отнюдь не предполагается, что создаваемые тяготением эффекты везде одни и те же. Гравитационная постоянная G – одна из физических констант нашего мира, равно как скорость света либо электрический заряд электрона или протона. С той точностью, с которой позволяют измерить эту постоянную современные экспериментальные методы, ее значение не зависит от того, какой разновидностью материи создано тяготение. Существенна только масса. Массу можно понимать двояко: как меру способности притягивать другие тела, – это свойство имеют в виду, когда говорят о тяжелой (гравитационной) массе, – или как меру сопротивления тела попыткам его ускорить (привести в движение, - если тело покоится, остановить, - если тело движется, или изменить его траекторию). Это свойство массы имеют в виду, когда говорят об инертной массе. Интуитивно эти две разновидности массы не кажутся одним и тем же свойством материи, однако общая теория относительности постулирует их тождество и строит картину мира, исходя из этого постулата.

Тяготение имеет и еще одну особенность; по-видимому, не существует никакого мыслимого способа избавиться от эффектов гравитации, кроме как удалиться на бесконечно большое расстояние от всякой материи. Ни одно известное вещество не обладает отрицательной массой, т.е. свойством быть отталкиваемым полем тяготения. Даже антиматерия (позитроны, антипротоны и т.п.) имеет положительную массу. От гравитации невозможно избавиться с помощью некоего экрана, как от электрического поля. Во время лунных затмений Луна «заслоняется» Землей от притяжения Солнца, и эффект от такой экранировки накапливался бы от одного затмения к другому, но этого нет.

Гравитация является самым слабым из четырех типов фундаментальных взаимодействий. В настоящее время попытки описать гравитацию в рамках квантовой физики, т.е. создание квантовой теории гравитации, пока успехом не увенчались. В такой ситуации, мало кому известная идея квантовой гравитации, разрабатываемая В. Янчилиным, - представляет несомненный интерес. Согласно модели горячей Земли, её образование в едином процессе рождения звезды – Солнца, обязано самогравитации. В этой связи здесь излагаются общепринятые представления о физике самогравитации.

5. 2. Гравитация Ньютона.

Гравитационное поле, создаваемое массой M на расстоянии r, можно охарактеризовать тремя физическими величинами.

Во-первых, это ускорение g, с которым будет двигаться любое тело в этом поле. Это векторная величина, и именно она обычно называется гравитационным полем.
Во-вторых, это скорость распространения гравитационного поля V_g. Например, мы сдвинули массу M. Через какое время тело, находящееся на расстоянии r от этой массы, "почувствует" изменение гравитационного поля? В теории тяготения Ньютона

предполагается, что гравитационное взаимодействие распространяется мгновенно. А в своей теории тяготения Эйнштейн показал, что скорость распространения гравитационного поля всегда и везде одинакова и равна скорости света: $V_g = c \approx 300\ 000$ км/с.

И, наконец, третьей величиной, которая характеризует гравитационное взаимодействие, является гравитационный потенциал φ. Гравитационный потенциал имеет следующий физический смысл. Это работа, которую нужно совершить над единичной массой, чтобы удалить её из данного поля тяготения. Знак минус говорит о том, что работу придётся совершать нам, а не полю, то есть потенциальная энергия тела U в гравитационном поле всегда отрицательна. Для тела массы m она равна: $U = m\,\varphi$. В теории тяготения Ньютона гравитационный потенциал φ удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\triangle\varphi = 4\pi G\,\rho, \qquad (П5.1)$$

где G – гравитационная постоянная ($G = 6.67 \cdot 10^{-8}$ см^{3}г$^{-1}$с$^{-2}$), ρ - плотность вещества. Решение уравнения (1) записывается в виде:

$$\varphi = G \int \rho\, dV/r + C, \qquad (П5.2)$$

где r – расстояние между элементом объема dV и точкой, в которой определяется потенциал φ, С – производная постоянная. Если при $r \to \infty$ ρ убывает быстрее, чем r^{-2}, то интеграл (2) сходится и потенциал определим. Если с увеличением расстояния ρ спадает медленнее, чем r^{-2} (например, для однородного распределения материи ρ = const), интеграл (2) расходится. Гравитационное ускорение, создаваемое тяготением вещества g = grad φ, неопределенно и может принимать любые, в т.ч. и бесконечные, значения в зависимости от способа интегрирования, в том числе, если при $r \to \infty$ ρ спадает медленнее, чем r^{-1}, а относительные гравитационные ускорения частиц dg неопределенны для распределений ρ, не убывающих при $r \to \infty$.

***Состоится ли ревизия закона Ньютона* (*о пятой силе*)**

http://n-t.ru/tp/iz/pps.htm Е. Б. Александров.

При изучении гравитации теория давно опережает эксперимент, который пока не справляется с ее заданиями. Наиболее популярное из них – обнаружение гравитационных волн. Задача эта необычайной трудности, и попытки решить ее продолжаются уже десятки лет. Но вот как будто появился шанс, что инициативу открытия нового в вопросах тяготения перехватит эксперимент: с 6 января 1986 года в научной литературе энергично обсуждаются некоторые свидетельства в пользу существования неизвестной ранее составляющей силы тяготения. Фактически вопрос сегодня ставится так: существует ли в природе пятая сила?

Начало положила публикация группы американских физиков в ведущем физическом журнале "The Physical Review Letters", оперативно печатающем наиболее важные новости физики.

Закон Ньютона с огромной точностью (до 10^{-8}) подтверждается астрономическими наблюдениями. Количественная мера притяжения, то есть гравитационная постоянная, измеряется в лаборатории, но с гораздо меньшей точностью – уже третий знак за запятой под сомнением. Но сегодня тень сомнения легла уже на первый знак и даже на безупречную зависимость силы от расстояния!

Умозрительные неклассические модели тяготения обсуждались теоретиками уже давно. В попытках уличить тяготение в отклонении от закона Ньютона во многих странах проводились тщательные измерения зависимости силы от расстояния. Оказалось, что в

диапазоне от сантиметра до 10 метров величина гравитационной постоянной остается неизменной с точностью до десятой доли процента. Однако на расстояниях менее 1 см и от 10 метров до десятков тысяч километров сохраняется принципиальная возможность того, что существуют отклонения от закона Ньютона.

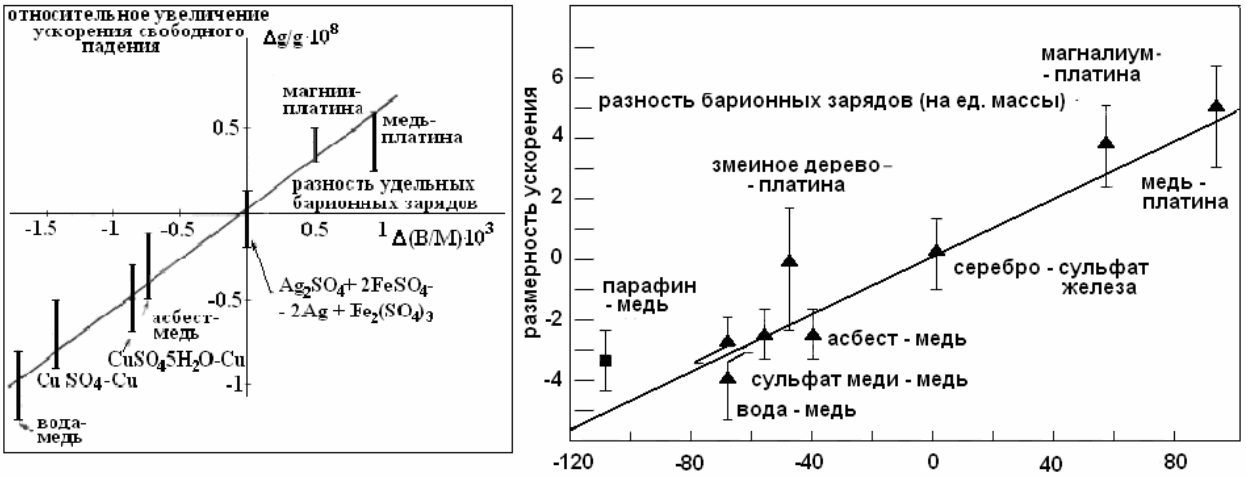


Рис. П5-2. Относительные разности ускорения свободного падения для разных пар веществ в зависимости от различия их удельных барионных зарядов (Александров, http).

При отсутствии экспериментальных фактов все эти построения вокруг не ньютонового тяготения были, по существу, беспредметными. Но после упомянутой публикации вопрос перешел в ранг актуальной физической проблемы. Исходным материалом для авторов статьи в "Phys. Rev Letters" послужили недавно опубликованные результаты многолетних измерений ускорения свободного падения тел в шахтах на разных глубинах. Такие измерения при условии хорошего знания геологических структур в окрестности шахты дают возможность независимого определения гравитационной константы, которая оказалась примерно на 1% больше, чем измеренная в лаборатории с помощью весов Кавендиша. На этой основе авторы статьи выдвинули гипотезу о существовании силы отталкивания с радиусом действия около 200 метров, пропорциональной барионному заряду вещества. Далее авторы подвергли свою гипотезу проверке, сопоставив ее с данными классических экспериментальных работ. Обнаруженное при этом эффектное согласие предсказаний гипотезы с опытом произвело в научном мире сенсацию и вызвало живейший отклик: уже через полгода по следам первой статьи было опубликовано около десяти статей и заметок. Большая часть из них посвящена предложениям новых путей проверки гипотезы. Но прежде, чем говорить о проверках гипотезы, нужно сказать хоть чуть-чуть о природе предполагаемой новой силы.

По существующим представлениям, все известные в природе силы вызваны обменом некоторыми частицами между взаимодействующими объектами. Потенциальная энергия взаимодействия при этом представляет собой так называемый «потенциал Юкавы», а радиус действия сил обратно пропорционален массе покоя частицы, переносящей взаимодействие. Электромагнитные и гравитационные силы передаются частицами с нулевой массой покоя – фотонами и гравитонами, что соответствует бесконечно большому радиусу действия. Другими словами, экспоненциального падения сил с расстоянием в этом случае нет: электромагнитные и гравитационные поля – дальнодействующие. В отличие от них ядерные силы, удерживающие нуклоны в ядре, и силы, ответственные за бета-распад ядер (слабое взаимодействие), вызваны обменом массивными частицами – адронами и векторными бозонами, что делает такие силы чрезвычайно короткодействующими: они проявляют себя лишь в пределах ядра и наружу, в мир макрообъектов, не «высовываются». «Пятая сила», вводимая обсуждаемой

гипотезой по этой же схеме, предполагает существование частиц с исключительно малой, но все-таки отличной от нуля массой покоя. Чтобы радиус взаимодействия измерялся сотнями метров, масса частицы должна быть на 15 порядков меньше массы электрона! Таких частиц физика не знает, но обнаружение пятой силы как раз и означало бы их открытие. Таким образом, закон тяготения оказывается в тесной связи с физикой элементарных частиц.

Искомое отталкивание составляет – даже в бытовом понимании – заметную часть от ньютонового притяжения (около 1%), измеряемая при изучении добавочного отталкивания величина окажется много меньше. В самом деле, мы собираемся сравнивать не отталкивание с притяжением, а различие в отталкивании тел разного состава. Это различие оказывается в несколько раз меньше самого отталкивания. Чтобы в этом убедиться, нужно подсчитать отношения барионного заряда к массе атома для разных элементов и их сопоставить (см. рис. П5-2).

Гравитация Лесажа.

В 1690 году швейцарский математик Николас Фатио де Дуилье, и в 1756 Жорж-Луи Ле-Саж в Женеве, - предложили простую кинетическую теорию гравитации, которая дала механическое объяснение уравнению силы Ньютона. Из-за того, что работа Фатио не была широко известна и оставалась неопубликованной длительное время, именно описание теории Ле-Сажем стало темой повышенного интереса в конце 19 века, когда данная теория была изучена в контексте только что открытой кинетической теории газов. К началу 20 века теория в целом считается опровергнутой, в основном из-за проблем поднятых Максвеллом и Пуанкаре. Хотя теория Ле-Сажа всё ещё изучается некоторыми исследователями, она не рассматривается основным научным сообществом как жизнеспособная теория.

Теория утверждает, что сила гравитации это результат движения крошечных частиц, двигающихся на высокой скорости во всех направлениях во Вселенной. Интенсивность потока частиц предполагается одинаковой во всех направлениях, таким образом, изолированный объект А ударяется частицами со всех сторон, в результате чего он подвергается давлению вовнутрь объекта, но не подвергается направленной силе Р1.

Однако, в случае присутствия второго объекта В, часть частиц, которые иначе бы ударили по объекту А со стороны В, перехватывается, таким образом В работает как экран, т.е. с направления В, объект А ударит меньше частиц, чем с противоположного направления. Аналогично, объект В будет ударен меньшим количеством частиц со стороны А, по сравнению с противоположной стороной. То есть, можно сказать, что объекты А и В «экранируют» друг друга, и оба тела прижимаются друг к другу результирующим дисбалансом сил (Р2). Таким образом, кажущееся притяжение между телами в данной теории на самом деле является уменьшенным давлением на тело со стороны других тел. По этой причине данную теорию иногда называют «push гравитация» или «теневая гравитация», хотя наиболее часто встречается название «гравитация Лесажа».

5. 3. Теория относительности.

Специальная теория относительности.

А.Эйнштейн в статье «К электродинамике движущихся тел» (1905) предложил два, казалось бы, противоречащих постулата:

1. Законы, по которым изменяются состояния физических систем, не зависят от того, к которой из двух координатных систем, движущихся относительно друг друга равномерно и прямолинейно, - эти состояния относятся.
2. Каждый луч света движется в «покоящейся» системе координат с определенной скоростью *c*, независимо от того, испускается ли этот луч света покоящимся или движущимся телом.

Т.о., основой специальной теории относительности является принцип постоянства скорости света. Смысл его состоит в том, что величина скорости света не зависит от движения наблюдателя. *Мы можем двигаться с любой скоростью навстречу свету или, наоборот, в противоположном направлении - в любом случае свет будет проноситься мимо нас с одной и той же скоростью* - 300 000 км/с! И это - экспериментальный факт. Эйнштейн догадался, что время в движущейся системе отсчёта будет течь по-другому. Причём, скорость течения времени изменится таким образом, чтобы скорость света в ней оставалась той же самой! Поэтому Эйнштейн принял в качестве нового закона то, что скорость света одинакова во всех системах отсчёта. И, исходя из этого, рассчитал, как будет преобразовываться время и расстояние при переходе из одной системы отсчёта в другую. *Итак, масштаб времени и расстояния в движущейся системе отсчёта изменяется всегда таким образом, чтобы свет двигался относительно неё со скоростью* 300 000 км/с.

Эйнштейн догадался, что при переходе из одной системы отсчёта в другую будет меняться пространственно-временной масштаб, а скорость света - оставаться неизменной. Но он не объяснил, *почему* так происходит. Почему именно скорость света (скорость в ~ 300 000 км/с) имеет такую привилегию в физическом мире, что *она не зависит* от скорости движения системы отсчёта.

Закон, по которому преобразуется время и расстояние при переходе из одной системы отсчёта в другую, называется преобразованиями Лоренца. Преобразования названы в честь Лоренца, так как он их открыл раньше Эйнштейна, исследуя совершенно другой раздел физики (он нашёл преобразования, при которых уравнения Максвелла остаются инвариантными). Суть их в том, что с точки зрения неподвижной системы отсчёта, время в движущейся системе отсчёта течёт медленнее в γ раз, а длины всех тел сокращаются в направлении движения также в γ раз, где γ - следующая величина:

$$\gamma = (1 - V^2/c^2)^{-1/2} \qquad (П5.3)$$

Здесь V- скорость движения системы отсчёта, а c - скорость света.

С физической точки зрения обе системы отсчёта (и "неподвижная" и "движущаяся") абсолютно равноправны. И если мы будем находиться в движущейся системе отсчёта, то с нашей точки зрения будет двигаться "неподвижная" система отсчёта, и мы обнаружим, что уже в ней время замедляется в γ раз, а длины всех тел сокращаются в γ раз. Как видно из уравнения, если $V << c$, то значение γ практически равно единице. А все релятивистские эффекты (сокращение длины, замедление времени) существенны лишь при околосветовых скоростях.

Итак, в теории относительности (в отличие от классической механики) и время, и расстояние изменяются при переходе из одной системы отсчёта в другую. Тем не менее, в теории относительности всё-таки существует величина, которая остаётся одной и той же во всех инерциальных системах отсчёта. Это интервал s между событиями. По определению квадрат интервала между событием, имевшим место в точке (x_1, y_1, z_1) в момент времени t_1, и событием, имевшим место в точке (x_2, y_2, z_2) в момент времени t_2, равен: $s^2 = c^2(t_2 - t_1) - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2$.

Исходя из того, что величина скорости света будет одной и той же во всех инерциальных системах отсчёта, нетрудно показать, что и величина квадрата интервала будет одной и той же во всех инерциальных системах отсчёта. С математической точки зрения интервал можно рассматривать как расстояние между двумя точками в воображаемом четырёхмерном пространстве (которое представляет собой обычное трёхмерное пространство, дополненное временной координатой, умноженной на скорость света ct). Геометрия такого четырёхмерного пространства называется

псевдоевклидовой, так как она похожа на обычную евклидову геометрию, в которой квадрат расстояния r между двумя точками равен: $r^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$.

В течение последних примерно 20 лет в СМИ неоднократно появлялись сообщения о том, что какой-нибудь группе физиков удалось превысить скорость света. С течением времени эти результаты оказывались либо ложными, либо ошибочными. Тем не менее в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) был получен результат, который привел физиков в замешательство. Ученые посылали пучок нейтрино с ускорителя ЦЕРНА в подземную лабораторию, которая расположена в Италии в районе горы Гран-Сассо. Расстояние между этими объектами составляет 732 км. Частицы нейтрино пребывали в пункт назначения на 60 наносекунд быстрее, чем свет. Физики произвели 15 тыс. измерений скорости движения этих частиц, прежде чем обнародовать свое исследование (Brumfiel, 2011).

Несмотря на публикацию результата в NATURE, многие ученые осторожно отзываются о возможном сенсационном открытии и заявляют, что его предстоит изучить и перепроверить. Если результаты эксперимента подтвердятся, то вся физика, построенная на теории относительности Альберта Эйнштейна, окажется под вопросом, т.к. по современным представлениям, скорость света является предельной во Вселенной.

Как известно, обоснование специальной теории относительности потребовало создание теории тяготения (ОТО), в которой присутствовало бы время, а скорость распространения гравитационного поля оказалась бы равной скорости света.

***Общая теория относительности* (*ОТО*).**

Общая теория относительности – теория пространства, времени и тяготения предложена Эйнштейном в 1916. В основе ОТО положен экспериментальный факт равенства инертной и гравитационной массы – принцип эквивалентности. Он проявляется в том, что движение тела в поле тяготения не зависит от его массы. Это позволяет ОТО трактовать тяготение, как искривление пространственно-временного континуума, которое описывается уравнениями Эйнштейна. Задача сводится к нахождению метрического тензора $g_{\mu\upsilon}$. Уравнения тяготения Эйнштейна связывают величины $g_{\mu\upsilon}$ с величинами, характеризующими материю, создающую поле: плотностью, потоками импульса и т.п. Эти уравнения записываются в виде:

$$R_{\mu\upsilon} - 1/2\ g_{\mu\upsilon}R = 8\pi G/c^4 \cdot\ T_{\mu\upsilon}. \qquad (П5.\ 4)$$

Уравнения тяготения Эйнштейна – это тензорные уравнения, связывающие распределение тензора материи (энергии) с кривизной пространства-времени. Здесь $R_{\mu\upsilon}$ – т.н. тензор Ричи, $T_{\mu\upsilon}$ – тензор энергии-импульса материи, который, в частном случае записывается в виде $T_{\mu\upsilon} = \Lambda g_{\mu\upsilon}$, где $\Lambda = 8\pi G\rho/c^2$ – космологическая постоянная. Она была введена Эйнштейном с целью построения модели Вселенной, которая не изменяется с течением времени. Космологическую постоянную можно рассматривать как величину, описывающую плотность энергии и давление (натяжение) вакуума. Согласно современным представлениям Λ либо $\Lambda = 0$, либо она чрезвычайно мала: $\Lambda < 10^{-55}$ см$^{-2}$. Согласно теории ранней Вселенной эта величина была очень большой, и гравитация физического вакуума - определяла динамику расширения Вселенной.

Уравнение (4) подобно уравнению (1) для ньютонова потенциала. В обоих случаях слева стоят величины, характеризующие поля, а справа – величины, характеризующие материю, создающую поле. Однако уравнения (4) имеют ряд существенных особенностей. Уравнение (1) линейно и поэтому удовлетворяет принципу суперпозиции. Оно позволяет вычислить гравитационный потенциал φ для любого распределения произвольно движущихся масс. Ньютоново поле тяготения не зависит от движения масс, поэтому уравнение (1) само не определяет непосредственно их движение. Движение масс определяется из второго закона механики Ньютона. Иная ситуация в теории Эйнштейна.

Уравнения (4) не линейны, не удовлетворяют принципу суперпозиции. В теории Эйнштейна нельзя произвольным образом задать правую часть уравнения (4), зависящую от движения материи, а затем вычислить гравитационное поле $g_{\mu\upsilon}$. Решение уравнений Эйнштейна приводит к совместному определению и движения материи, создающей поле, и к вычислению самого поля. Существенно при этом, что уравнения поля тяготения содержат в себе и уравнения движения масс в поле тяготения. С физической точки зрения это соответствует тому, что в теории Эйнштейна материя создает искривление пространства-времени, а это искривление, в свою очередь, влияет на движение материи, создающей искривление.

Релятивистская теория гравитации.

В основу релятивистской теории гравитации (РТГ) положены следующие физические требования.

- В теории должны строго выполняться законы сохранения энергии-импульса и момента количества движения для вещества и гравитационного поля, вместе взятых. Под веществом мы понимаем все формы материи (включая и электромагнитное поле) за исключением гравитационной. Законы сохранения отражают общие динамические свойства материи и позволяют ввести единые характеристики для различных ее форм. Общие динамические свойства материи находят воплощение в структуре геометрии пространства-времени. Она с необходимостью оказывается псевдоевклидовой (иными словами, теория строится в пространстве Минковского). Таким образом, геометрия задается не соглашением, как считал Пуанкаре, а однозначно определяется законами сохранения. Пространство Минковского, как уже сказано, обладает четырехпараметрической группой трансляций и шестипараметрической группой вращений. Данное положение кардинальным образом отличает РТГ от общей теории относительности и полностью выводит нас из римановой геометрии.

- Гравитационное поле описывается симметрическим тензором и является реальным физическим полем, обладающим плотностью энергии и импульса. Если этому полю сопоставить частицы (кванты поля), то они должны иметь нулевую массу покоя, поскольку гравитационное взаимодействие дальнодействующее. При этом у реальных и виртуальных квантов гравитационного поля могут быть состояния со спинами 2 и 0.

- Такое определение гравитационного поля возвращает ему физическую реальность, поскольку его уже даже локально нельзя уничтожить выбором системы отсчета, а следовательно, нет никакой (даже локальной) эквивалентности между гравитационным полем и силами инерции. Данное физическое требование в корне отличает РТГ от ОТО.

Эйнштейн в ОТО отождествил гравитацию с метрическим тензором риманова пространства, но этот путь и привел к утрате понятия гравитационного поля как физического поля, а также к потере законов сохранения. Отказ от этого положения ОТО продиктован в первую очередь стремлением сохранить в теории гравитации эти фундаментальные физические понятия.

Физические следствия РТГ.

Остановимся теперь на некоторых физических следствиях РТГ. В начале 20-х годов А. А. Фридман, решая уравнения Гильберта — Эйнштейна в предположении, что плотность вещества в каждой точке пространства одинакова и зависит только от времени (фридмановская однородная и изотропная Вселенная), обнаружил, что возможны три модели нестационарной Вселенной (**фридмановские модели Вселенной**). Каждый тип Вселенной определяется соотношением между плотностью вещества в данный момент и так называемой критической плотностью, определяемой на основании измерения **постоянной Хаббла**. Если плотность вещества больше критической, - то Вселенная замкнута и имеет конечный объем, но не имеет границ. Если плотность вещества меньше

или равна критической, - то Вселенная бесконечна. На вопрос о том, какая из этих моделей реализуется в природе, ОТО, в принципе, не может дать определенного ответа.

Согласно РТГ фридмановская однородная и изотропная Вселенная бесконечна, и она может быть только плоской — ее трехмерная геометрия евклидова. В этом случае плотность вещества во Вселенной точно равняется критической плотности. Таким образом, РТГ предсказывает, что во Вселенной должна существовать **“скрытая масса”**, плотность которой почти в 40 раз превышает плотность вещества, наблюдаемого сегодня. Другим важным следствием РТГ является утверждение, что суммарная плотность энергии вещества и гравитационного поля во Вселенной должна равняться нулю.

Мы видим, что предсказание РТГ для развития фридмановской однородной и изотропной Вселенной существенно отличается от выводов ОТО.

Далее, из ОТО следует, что объекты с массой, превышающей три массы Солнца, за конечный промежуток собственного времени должны неограниченно сжиматься гравитационными силами (коллапсировать), достигая при этом бесконечной плотности. Объекты такого типа получили название черных дыр. Они не имеют материальной поверхности, и поэтому тело, падающее в черную дыру, при пересечении ее границы не встретит ничего, кроме пустого пространства. Из внутренней области черной дыры через ее границу не может вырваться наружу даже свет. Иными словами, все, что происходит внутри черной дыры, в принципе не познаваемо для внешнего наблюдателя. Дж. Уилер (*J. Wheeler*) рассматривал гравитационный коллапс и возникающую при этом сингулярность (бесконечную плотность) как один из величайших кризисов всех времен для фундаментальной физики. С этим невозможно не согласиться.

Релятивистская теория гравитации в корне изменяет представления о характере гравитационного коллапса. Она приводит к явлению гравитационного замедления времени, благодаря которому сжатие массивного тела в сопутствующей системе отсчета происходит за конечное собственное время. При этом, что самое главное, плотность вещества остается конечной и не превышает 10^{16} г/см^3, яркость тела экспоненциально уменьшается, объект “чернеет”, но в отличие от черных дыр всегда имеет материальную поверхность. Такие объекты, если они возникают, имеют сложное строение, при этом никакого гравитационного “самозамыкания” не происходит, а потому вещество не исчезает из нашего пространства. В РТГ собственное время для падающего пробного тела зависит как от координат пространства Минковского, так и от гравитационной постоянной G, а, следовательно, ход собственного времени определяется характером гравитационного поля. Именно это обстоятельство и приводит к тому, что собственное время для падающего пробного тела неограниченно замедляется по мере приближения к так называемому **шварцшильдовскому радиусу**.

Таким образом, согласно РТГ, никаких черных дыр — объектов, в которых происходит катастрофически сильное сжатие вещества до бесконечной плотности и которые не имеют материальной поверхности, — в принципе не может быть в природе. Релятивистская теория гравитации, построенная на основании законов сохранения и представлений о гравитационном поле как физическом поле, обладающем плотностью энергии-импульса, в соединении с принципами геометризации и локальной калибровочной инвариантности объясняет все известные наблюдательные и экспериментальные данные о гравитации и дает новые предсказания о развитии фридмановской Вселенной и гравитационном коллапсе.

ОТО и принцип Маха.

Ещё Ньютон обратил внимание на тот факт, что существует два вида движений: относительное и абсолютное. Прямолинейное движение тела является относительным движением, а вращательное – абсолютным. Мы не сможем сказать, с какой скоростью мы движемся (например, с какой скоростью движется планета Земля), если не укажем другое тело, относительно которого будем рассматривать наше движение. Но мы всегда сможем

узнать, с какой скоростью мы вращаемся (например, с какой скоростью вращается Земля). Это возможно потому, что во вращающемся теле возникают центробежные силы, которые деформируют тело. По величине центробежных сил или по вызванной ими деформации всегда можно определить скорость вращения тела. При этом возникает вопрос: а относительно чего, собственно говоря, тело вращается?

В конце 19-го века австрийский физик Эрнст Мах выдвинул следующую гипотезу (названную впоследствии принципом Маха). Инерциальные системы отсчёта существуют только благодаря неподвижным звёздам – удалённым массам Вселенной. При этом центр масс Вселенной является естественной инерциальной системой отсчёта. А свободно движущееся тело движется с постоянной скоростью относительно центра масс Вселенной – относительно удалённых массивных объектов. В этом случае тело оказывает сопротивление ускорению только потому, что ускоряется относительно неподвижных звёзд.

Тело в отсутствие действующих на него сил движется равномерно и прямолинейно. Для того чтобы оно отклонилось от своего пути, нужно приложить силу. Чем более массивным является тело, тем труднее изменить его движение. Звёзды своей огромной массой как бы создают поле инерциальных сил. Физики спрашивали Маха: выходит, если убрать звёзды, то тело уже не будет оказывать сопротивление ускорению и потеряет свою инерцию? Но Мах уходил от прямого ответа.

Гораздо последовательней в этом вопросе был Альберт Эйнштейн, относившийся к принципу Маха с большой симпатией. В период создания общей теории относительности он надеялся, что принцип Маха найдёт своё воплощение в его теории. Вот что он писал в то время: «...в последовательной теории относительности нельзя определять инерцию по отношению к “пространству”, но можно определять инерцию масс относительно друг друга. Поэтому если я удалю какую-нибудь массу на достаточно большое расстояние от всех других масс Вселенной, то инерция этой массы должна стремиться к нулю. Попытаемся сформулировать это условие математически». Для того, чтобы сообщить ускорение а, нужно приложить силу: $F = ma$. Так утверждает второй закон Ньютона. Таким образом, любая масса оказывает сопротивление ускорению. Опять возникает вопрос: ускорению относительно чего?

Правильный ответ можно прочитать в любом учебнике физики: относительно инерциальной системы отсчёта. Но как уже отмечалось, инерциальная система отсчёта - это всего лишь удобное понятие. Какая физическая связь может быть между телом и инерциальной системой отсчёта?

Существуют поля, действующие на тело независимо от того, движется оно или нет. Это, например, гравитационные и электрические поля. Но, скажем, магнитное поле действует только на движущийся заряд. Силы инерции можно в каком-то смысле сравнить с магнитными силами. Они возникают только в том случае, когда масса движется с ускорением. Нельзя определять инерцию по отношению к "пространству", но можно определять инерцию масс относительно друг друга. Поэтому если я удалю какую-нибудь массу на достаточно большое расстояние от всех других масс Вселенной, то инерция этой массы должна стремиться к нулю. Эйнштейн утверждал, что на достаточно большом удалении от всех масс Вселенной тело не будет обладать инерцией. С этой позицией Эйнштейна был вполне солидарен и Паули, полагая, что Мах ясно осознавал именно этот недостаток механики Ньютона и заменил абсолютное ускорение ускорением относительно остальных масс Вселенной.

Эйнштейн назвал этот постулат принципом Маха. Согласно принципа, инерция материи определялась только окружающими его массами и исчезала если все остальные массы будут устранены, так как с релятивистской точки зрения не имеет никакого смысла говорить о сопротивлении абсолютному ускорению {относительность инерции).

Тем не менее, когда общая теория относительности была построена, оказалось, что она не удовлетворяет принципу Маха. И на протяжении всего двадцатого века различными учёными предпринимались попытки построить физическую теорию на основе принципа Маха. Но эти попытки не увенчались успехом. Создаётся впечатление, что принцип Маха просто не вписывается в современную физику.

Существует ли какой-либо известный факт, подтверждающий справедливость принципа Маха? Да, действительно, существует одно экспериментальное свидетельство в пользу принципа Маха. Это факт равенства нулю угловой скорости вращения Вселенной, который установлен с высокой степенью точности (по крайней мере, период вращения Вселенной больше чем 10^{17} лет) в опытах по измерению анизотропии реликтового излучения.

С точки зрения теории гравитации Ньютона (также как и с точки зрения общей теории относительности) этот факт является невероятной случайностью. А из принципа Маха сразу следует, что Вселенная не может вращаться относительно инерциальной системы отсчёта, потому что в этом случае инерциальные системы отсчёта вращались бы вместе с ней. Следует также отметить, что принцип Маха выдвинут в конце девятнадцатого века и поэтому сформулирован в рамках классической механики Ньютона. А в двадцатом веке появились такие фундаментальные разделы физики, как теория относительности и квантовая механика. Поэтому чтобы найти место принципу Маха в современной физике, нужно учесть достижения, как теории относительности, так и квантовой механики.

В 1979 году в Берлине состоялась международная научная конференция, посвящённая 100-летию со дня рождения Альберта Эйнштейна. На ней обсуждались наиболее фундаментальные проблемы современной физики. В том числе говорилось и об отношении принципа Маха к общей теории относительности. Вот несколько строк из резюме по данному вопросу: “Известно, что Эйнштейн не только принимал этот неортодоксальный принцип и восхищался им, но и надеялся привести свою теорию в согласие с системой идей Маха. Эйнштейн пытался включить общую теорию относительности в принцип Маха, или наоборот. Поэтому он видоизменил первую классическую формулировку ОТО. В этом направлении и по сей день, предпринимаются попытки, – неустанно, порой с обескураживающими результатами, часто с помощью весьма остроумных манипуляций, – достичь цели, к которой стремился Эйнштейн”.

В. Л. Янчилин, предложивший принципиально новую модель квантовой генерации («Неопределенность, гравитация, космос». М.:УРСС. 2003), о которой пойдет речь ниже, считает, что проблему, связанную с принципом Маха, решить можно. Но для этого нужно проделать следующее: Во-первых, раскрыть его физическое содержание (которое пока не ясно). Во-вторых, построить новую физическую теорию, которая содержала бы в себе, кроме известных физических законов, также и принцип Маха. До настоящего времени такой теории не было. В-третьих, рассчитать (а значит, и предсказать) принципиально новые следствия, которые вытекают из новой теории и которые можно экспериментально проверить в земных условиях (естественно, не трогая неподвижные звёзды). И в результате определить, верен или нет принцип Маха.

ОТО и квантовая механика.

Теория относительности внесла существенные изменения в классическую картину мира. Но всё-таки подлинную революцию в физике произвела именно квантовая механика. К концу XX столетия в физике назрели нерешенные проблемы, среди них: загадка квантовой гравитации, сверхсветовые квантовые корреляции, малость космологической постоянный, загадка темной энергии, составляющей 70 % физической Вселенной, небарионная холодная темная материя, составляющая до 26 % и очень маленькая начальная энтропия Вселенной. Наиболее досаждающим моментом современной физики

остался вопрос, сформулированный Эйнштейном: "Может ли квантовая механика быть получена из общей теории относительности?", или: как квантовать гравитационные полевые уравнения Эйнштейна?

Из четырех фундаментальных сил природы: электромагнитных, слабых, сильных и гравитационных, только первые три могут быть математически последовательно квантованы. Это оказывается невозможным для гравитации. Проблема, казалось, была разрешима только путем таких диковинных догадок, как, например, предположением более чем трех измерений для пространства, и точечно-подобной структуры элементарных частиц, (требуемой постулатами специальной теории относительности). Они должны быть заменены струнами или поверхностями (мембранами) высших размерностей.

В 1927 году Вернер Гейзенберг, пытаясь устранить противоречие “волна-частица”, сформулировал принцип неопределённости (соотношение неопределённостей). Этот принцип выражает фундаментальный предел возможности одновременного измерения положения частицы и её импульса:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2. \qquad (П5.5)$$

Здесь Δx – неопределённость в положении частицы, а Δp_x – неопределённость в проекции её импульса вдоль оси x. Не сразу стало ясно, что именно выражает это соотношение. Только ли принципиальную невозможность получить более полное знание о движении частицы или же объективную неопределённость в её движении. Аналогично соотношению (П5.5) Гейзенберг установил соотношение для неопределённости в измерении энергии частицы ΔE и промежутка времени Δt, в течение которого производится данное измерение: $\Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar/2$

Квантовая механика основана на представлениях о движении, принципиально отличных от представлений классической механики. В квантовой механике не существует понятия траектории частиц. Это обстоятельство составляет содержание так называемого принципа неопределённости - одного из основных принципов квантовой механики, открытого Гейзенбергом. Электрон (или любой другой квантовый объект) движется не по непрерывной линии (траектории), а как-то иначе. В каждый момент времени электрон не имеет ни определённого местоположения, ни определённой скорости. Если в результате измерения электрон получил определённые координаты, то при этом он вообще не обладает никакой определённой скоростью. Наоборот, обладая определённой скоростью, электрон не может иметь определённого местоположения в пространстве.

Движение электрона (как и движение любого другого квантового объекта) описывается комплексной волновой Ψ-функцией. В общем случае для одного электрона волновая Ψ-функция зависит от четырёх переменных - это три пространственные координаты и время. Допустим, мы хотим узнать, находится ли электрон в данный момент времени t_0 в данной точке пространства (x_0; y_0; z_0). Если известна волновая функция электрона, то ответ такой: в момент времени t_0 плотность вероятности p_w обнаружить электрон в точке (x_0; y_0; z_0) равна квадрату модуля волновой функции:

$$p_w = |\Psi(t_0; x_0; y_0; z_0)|^2$$

Таким образом, квантовая механика, в отличие от классической, - даёт только вероятностное описание движения.

В общем случае неопределённость в движении электрона можно охарактеризовать, во-первых, неопределённостью в его местоположении ($\triangle x$; $\triangle y$; $\triangle z$), а во-вторых, неопределённостью в его импульсе ($\triangle p_x$; $\triangle p_y$; $\triangle p_z$). Для электрона (или любого другого квантового объекта) всегда выполняются следующие неравенства:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2, \ \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar/2, \ \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar/2,$$

где $\hbar = 1{,}055 \cdot 10^{-34}$Дж-с - постоянная Планка. Эти неравенства, или как их иначе называют "соотношения неопределённостей", были установлены Гейзенбергом.

В обычной физике принято считать, что электрон движется по вполне определённой траектории, и в каждый момент времени находится в определённой точке пространства. Просто мы не знаем, где он находится. А когда мы хотим узнать его местоположение при помощи какого-нибудь физического прибора, то тем самым воздействуем на электрон, и в результате теряем возможность предсказать его дальнейшее движение. С этой точки зрения соотношения неопределённостей Гейзенберга отражают лишь наше незнание истинной траектории движения.

Это не так. Совершенно не важно, знаем ли мы, где находится электрон или не знаем. В любом случае движение электрона принципиально отличается от движения, скажем, камня. Дифракция электронов на кристалле - хорошо известный экспериментальный факт.

Можно сколько угодно кидать камни случайным образом через открытые окна - никакой интерференционной картины при этом не будет. Очевидно, что наше незнание местонахождения электрона не может быть причиной его необычного поведения. Вот, например, что писал о необычном поведении квантовых объектов Ричард Фейнман: "Поведение тела очень малого размера не похоже ни на что, с чем вы повседневно сталкиваетесь. Эти тела не ведут себя ни как волны, ни как частицы, ни как облака, или бильярдные шары, или грузы, подвешенные на пружинах, - словом, они не похожи ни на что из того, что вам хоть когда-нибудь приходилось видеть". И далее: "Раз поведение атомов так не похоже на наш обыденный опыт, то к нему очень трудно привыкнуть. И новичку в науке, и опытному физику - всем оно кажется своеобразным и туманным. Даже большие учёные не понимают его настолько, как им хотелось бы, и совершенно естественно, потому что весь непосредственный опыт человека, вся его интуиция - всё это обращено к крупным телам. Мы знаем, что будет с большим предметом; но именно так мельчайшие тельца и не поступают".

Итак, движение частиц в микромире принципиально отличается от движения макроскопических тел. В микромире частицы движутся не по непрерывной траектории. В их движении есть неопределённость, из-за которой движение частиц носит случайный и непредсказуемый характер.

Главный недостаток ОТО с точки зрения квантовой механики.

С точки зрения общей теории относительности предполагается, что в гравитационном поле изменяется пространственно-временной масштаб (соответственно, изменяется и выражение для квадрата интервала). Например, вблизи большой массы замедляется течение времени, а также изменяются расстояния между точками.

В общей теории относительности предполагается, что фундаментальные физические постоянные (*c, h, m, e* ...) вблизи большой массы не изменяются. И здесь возникает следующее противоречие с квантовой механикой. С точки зрения квантовой механики частота излучения атома полностью определяется величинами c, h, e, m_e, m_p, m_n (здесь m_e, m_p, m_n - соответственно массы покоя электрона, протона и нейтрона). А если все эти величины остаются в гравитационном поле теми же самыми, то, следовательно, частоты излучения атомов также должны оставаться теми же самыми. Почему же тогда время вблизи большой массы замедляется?

Таким образом, главный недостаток общей теории относительности с точки зрения квантовой механики состоит в следующем. В рамках общей теории относительности время рассматривается как самостоятельная физическая величина, полностью независимая от протекания конкретных физических процессов. Хотя, с другой стороны,

современный эталон времени определяется через период излучения определённой спектральной линии.

Идея В.Л. Янчилина заключается в том, что вблизи большой массы изменяются скорость света, постоянная Планка, а также массы покоя элементарных частиц. И именно это, в свою очередь, приводит к изменению пространственно-временного масштаба. Именно в этом случае гравитация согласуется с квантовой механикой.

5. 4. Квантовая гравитация Янчилина.

Гравитационный потенциал Вселенной

Оценим массу Вселенной: $M_U \approx 4/3\pi\rho_U R_U^3$, где $\rho_U \approx 10^{-26}$ кг/м^3 – средняя плотность материи во Вселенной, $R_U = cT_U \approx 10^{26}$ м - радиус Вселенной. Здесь с – скорость света, T_U - время существования Вселенной $T_U \approx 15$ млрд. лет $= 5 \cdot 10^{17}$ с. Масса Вселенной $M_U \approx 4 \cdot 10^{52}$ кг, что составляет почти триллион галактик.

Гравитационный потенциал, создаваемый всей массой Вселенной: $\Phi_U \approx -G\,M_U / R_U \approx 3 \cdot 10^{16}$м^2/с^2, примерно равен квадрату скорости света ($c^2 \approx 10^{17}$ м^2/с^2, G – гравитационная постоянная).

Янчилин принимает, что точность наших данных о плотности вещества Вселенной ρ_U и её размере R_U позволяет принять в качестве закона: $\boldsymbol{-\Phi_U = c^2}$, где $\boldsymbol{c}$ – скорость света. Отсюда следуют два очевидных вывода: 1) За пределами Вселенной, где отсутствует её вещество, скорость света $c \to 0$, и 2) На ранних этапах эволюции Вселенной, когда её размер R_U - был меньше современного, скорость света c ($c \sim 1/R_U$) - была больше современной.

Эта, казалось бы, простая и более или менее очевидная формула положена В. Янчилиным в основание разработанной им принципиально новой теории квантовой гравитации.

Далее, Янчилин находит изменение величин e, m, c в гравитационном поле:

1. Исходя из закона сохранения электрического заряда, он делает вполне правдоподобный вывод, что *величина заряда электрона вблизи массивного тела не изменяется*.
2. Исходя из закона сохранения массы, можно сделать вывод, что масса покоя любого тела, в том числе и *масса покоя электрона, должна уменьшаться вблизи массивного тела*. Это так называемый дефект массы, равный гравитационной энергии связи, деленной на квадрат скорости света.
3. Исходя из закона Всемирного тяготения, в первом приближении, можно рассчитать, *как* вблизи массивного тела изменяется любой эталон длины и, следовательно, *узнать*, *как изменяется размер атома водорода*.
4. Исходя из анализа особенностей спектральных линий излучения атомов в лаборатории и космосе, можно прийти к заключению, что постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2/ch = 1/137$ -const - не зависит от гравитационного потенциала.

(Постоянная тонкой структуры α - является фундаментальной физической постоянной, характеризующей силу электромагнитного взаимодействия. Впервые она была описана в 1916 г. немецким физиком Арнольдом Зоммерфельдом в качестве меры релятивистских поправок при описании атомных спектральных линий в рамках модели атома Бора).

После всего этого находим, как изменяется в гравитационном поле постоянная Планка.

Такой подход к гравитационному взаимодействию позволяет получить все известные релятивистские гравитационные эффекты. Кроме того, (и это самое главное!) он позволяет предсказать *принципиально новый эффект*, который *противоречит* общей теории относительности. Более того, уже в настоящее время можно провести относительно простой эксперимент, который позволит однозначно определить, какая из двух теорий гравитации (общая теория относительности или новая теория, основанная на уравнениях квантовой механики) является правильной.

Что такое квантовая теория гравитации по Янчилину.

Известно, что все тела притягивают друг друга, но не известно, почему это происходит. Закон Всемирного тяготения Ньютона (или его модификация, сделанная Эйнштейном в общей теории относительности) позволяет рассчитать, как будет двигаться то или иное тело в гравитационном поле. Этот закон очень хорошо описывает, как происходит гравитационное взаимодействие. Но он ни слова не говорит о том, почему тела притягивают друг друга. Иначе говоря, какой физический "механизм" имеет гравитационное притяжение?

Вот что писал об этом, например, Ричард Фейнман в своих лекциях по физике: "До сих пор мы только описывали, как Земля обращается вокруг Солнца, но ни слова не сказали о том, что заставляет её двигаться. Ньютон не строил догадок об этом; ему было достаточно открыть, что происходит, не входя в механизм происходящего. Но и никто другой с тех пор никакого механизма не открыл".

В рамках теории Янчилина можно дать простое и наглядное объяснение механизму гравитационного взаимодействия. Рассмотрим поведение электрона (или другого квантового объекта) в гравитационном поле. Допустим, он локализован в окрестности точки А. Существует вероятность, что через некоторое время он окажется в окрестности точки В. Существует также вероятность обратного перехода. В пространстве с постоянным гравитационным потенциалом эти вероятности равны. Если же величина гравитационного потенциала в точке В меньше, чем в точке А ($\Phi_в < \Phi_А$, а $|\Phi_л|>|\Phi и|$), то, согласно формуле $c\hbar = e^2/\alpha = \text{const}$, $\hbar = e^2/\alpha(-\Phi)^{1/2}$, значение постоянной Планка в точке В меньше, чем в точке А. Это, в свою очередь, означает, что и неопределённость движения электрона в точке В меньше, чем в точке А. Следовательно, вероятность перехода электрона из окрестности точки А в окрестность точки В больше, чем обратно. Поэтому с точки зрения теории Янчилина гравитационное взаимодействие можно рассматривать как квантовый эффект. Вблизи большой массы неопределённость в движении электрона (или другой частицы) уменьшается, вследствие чего электрон движется в сторону большой массы.

Предложенный механизм гравитационного взаимодействия не только позволяет объяснить, почему все тела притягивают друг друга. Он также позволяет объяснить, почему гравитационное взаимодействие такое слабое. Это есть следствие того, что неопределённость в движении электрона (или любой другой частицы) ограничена, в основном, удалёнными массами Вселенной. А близко расположенные тела уменьшают неопределённость в его движении на очень незначительную в процентном отношении величину.

Обычно считается, что между теорией гравитации и квантовой механикой нет ничего общего. А в рамках теории Янчилина гравитационное взаимодействие - это исключительно квантовый эффект!

Квантовый механизм гравитационного взаимодействия можно рассмотреть и с другой точки зрения. В качестве примера опять рассмотрим движущийся электрон. Из-за того, что в движении электрона есть неопределённость, он обладает волновыми свойствами. То есть движущийся электрон представляет собой движущуюся волну, которая может быть описана с помощью волновой Ψ-функции. В однородном пространстве (в пространстве с одинаковым гравитационным потенциалом) волна будет распространяться по прямой линии. Но вблизи большой массы неопределённость в движении электрона уменьшится, и, следовательно, уменьшится его длина волны. В результате траектория движения электрона будет искривлена.

Принцип наименьшего действия.

Фундаментальные законы движения выражаются в виде принципа наименьшего действия (принципа Гамильтона). Суть принципа состоит в том, что тело будет двигаться

из точка a в точку b по такой траектории, вдоль которой будет иметь минимум величина S – называемая действием: $S = \int L\,dt = \min$, где L лагранжиан: $L = mV^2/2 - U(x, y, z)$.

Физический смысл принципа наименьшего действия раскрывает квантовая механика. Движение частицы представляет собой движение волны, описываемое волновой Ψ-функцией. Волна движется так, чтобы разность фаз в конце и начале пути была бы минимальна. Частица движется по траектории, которая соответствует наименьшему действию. Иначе, частица движется из точки в точку таким образом, чтобы затратить на пройденный путь наименьшее количество «шагов». А так же по такому пути, где «шаг» частицы - будет максимален (шаг, иначе, – длина волны).

Согласно теории Янчилина постоянная Планка меняется в гравитационном поле. Следовательно, частица будет двигаться по такой траектории, вдоль которой имеет минимум действие, измеренное в единицах $\hbar$, которая имеет размерность действия. Янчилин получает формулу, описывающую движение частицы в гравитационном поле, созданном точечной массой M. А вблизи массы M ее шаг уменьшается, и поэтому частица огибает массу, чтобы затратить на пройденный путь меньшее число шагов.

Возможность экспериментальной проверки закона квантовой гравитации (КГ).

Из закона КГ следует, что свет будет не только ускоряться в гравитационном поле, но и то, что величина скорости света будет изменяться вместе с изменением величины гравитационного потенциала. Расширение Вселенной должно найти отражение в уменьшении скорости света. Земля движется вокруг Солнца по эллипсу. Вследствие этого гравитационный потенциал, создаваемый Солнцем на поверхности Земли, изменяется в течение года. Экспериментально установлено, что скорость света постоянна с точностью примерно 1 м/с.

Используя формулы, полученные в КГ, можно оценить на какую максимальную величину $\triangle c$ должна изменяться скорость света в течение года. Гравитационный потенциал на поверхности Земли изменится на величину $\triangle \Phi = (GM/L^2)\,\triangle L$, где M – масса Солнца, L – расстояние от Солнца до Земли, $\triangle L$ – изменение этого расстояния в течение года (510^9 м). Изменение скорости света составит величину $\triangle c = -\triangle \Phi/2c$, что составляет 0.05 м/с. Следовательно, закон КГ не противоречит современным данным по точности измерения величины скорости света. Проверка теории квантовой гравитации сопряжена, в этом случае, с решением технической задачи, связанной с повышением точности измерения скорости света на два порядка, что вполне осуществимо.

Янчилин предлагает ещё один весьма простой эксперимент по проверке квантовой теории гравитации. Суть его состоит в следующем. Двое очень точных и идентичных часов следует установить на различных высотах: одни – на равнине, другие – в горах. Если верна ОТО, то отставать будут часы, находящиеся на равнине. Относительное отставание часов составит $gh/c^2 = 510^{-13}$. За 12 дней они отстанут на 0.5 микросекунды. Если верна квантовая теория гравитации, то отставание будет примерно в два раза больше: за 12 дней часы отстанут на одну микросекунду. При этом часы на равнине уйдут вперед.

Следует учесть, что не все процессы будут ускоряться в гравитационном поле, Например, процессы, связанные с распадом ядра, будут, наоборот, замедляться. Поэтому в общем случае, чтобы выяснить, как изменяется скорость протекания какого-либо процесса в гравитационном поле, нужно хорошо представлять физику процесса.

Хаос – граница пространства и времени.

В современной физике принято считать, что окружающее нас пространство-время обладает совокупностью разнообразных свойств: 1) Макроскопические тела движутся в пространстве-времени по определенным траекториям. 2) В пространстве существуют инерциальные системы отсчета. 3) Существует предельная скорость распространения взаимодействий, одинаковая для всех наблюдателей. 4) Существует неопределенность в

движении субатомных частиц. 5) Пространство-время обладает геометрическими свойствами. 6) Любое тело, находящееся в пространстве-времени обладает энергией. Все свойства пространства-времени рассматриваются как неизменные и не зависимые от распределения масс во Вселенной.

Янчилин предлагает альтернативную точку зрения. Все свойства пространства-времени являются результатом взаимодействия находящихся в нем частиц и полей. Любое тело, существующее в пространстве-времени, обладает энергией покоя: $E_o = m_o c^2 = - m_o \Phi$. Вне гравитационного поля Вселенной тело не будет обладать энергией, а значит, и не может существовать там.

Наблюдаемое движение тела есть результат гравитационного взаимодействия этого тела со всеми остальными массами Вселенной. Тогда движение тела будет зависеть от его гравитационной энергии, то есть зависеть от величины гравитационного потенциала Вселенной в данной точке пространства. А это в свою очередь будет означать, что и законы физики зависят от величины гравитационного потенциала.

Все массы Вселенной, взаимодействуя друг с другом посредством единого гравитационного поля, ограничивают неопределенность в движении тел. Существующие физические законы отображают эти ограничения. По мере удаления от всех масс Вселенной из-за уменьшения абсолютной величины гравитационного потенциала законы движения будут становиться всё менее определенными. А свойства пространства-времени будут постепенно вырождаться. Предельная степень вырождения пространства-времени и есть Хаос. Из-за того, что при приближении к Хаосу скорость света будет уменьшаться вплоть до нуля, будет разрушаться и причинно-следственная и пространственно-временная связь между различными событиями.

Из-за неограниченного возрастания неопределенности в движении, - понятие точки или местоположения в Хаосе теряет физический смысл. Понятия расстояния и времени имеют смысл только для тел, движение которых подчиняется определенным законам. Поэтому, при приближении к Хаосу понятия расстояния и времени теряют физический смысл. Хаос существует вне времени и за пределами пространства, а также является естественным вместилищем Вселенной. Пространство и время есть результат наложения гравитационного поля Вселенной на Хаос. Наблюдаемое движение физических объектов в пространстве и во времени есть результат ограничения их хаотического движения огромным гравитационным потенциалом Вселенной. Именно благодаря этому ограничению Хаос преобразуется в окружающее нас пространство и время.

Дискретное движение

Янчилин предложил принципиально новый тип движения, который позволяет найти объяснение многим парадоксам квантовой механики. Суть его состоит в том, что квантовые объекты, например электрон, движутся дискретно. Электрон движется в виде виртуального облака. Объем облака – это объем области пространства, в котором волновая Ψ-функция отлична от нуля. Янчилин предположил, что внутри этого облака электрон движется дискретно, а именно: в момент времени t электрон находится в некоторой точке облака, затем он исчезает из этой точки и через бесконечно малое время dt появляется в другой, совершенно произвольной точке, также находящейся в этом облаке. Т.о. электрон за бесконечно малое время побывает во всех точках облака. Более того, в каждой точке облака электрон побывает бесчисленное количество раз. Хаотическое движение электрона внутри облака является разрывным в каждой точке. Янчилин утверждает, что введение такого понятия позволяет описать происходящие в микромире процессы. Например, непрерывное движение можно описать как дискретное.

Соотношение неопределенностей. Неопределенность в местоположении электрона внутри облака приводит к неопределенности в силе электромагнитного взаимодействия электрона со своим полем. А неопределенность электромагнитной силы, с которой

электрон взаимодействует со своим полем, приводит к неопределенности в импульсе электрона. С другой стороны, чем больше область, в которой размазан электрон, тем слабее электромагнитное поле, создаваемое им, и, значит, тем слабее сила, с которой электрон взаимодействует со своим полем. Это, в свою очередь приводит к уменьшению неопределенности в импульсе электрона. Получается, что неопределенность в импульсе электрона обратно пропорциональна неопределенности в его местоположении. Это качественное объяснение соотношению неопределенностей Гейзенберга: $\triangle x \triangle p_x \geq \hbar/2$.

Редукция волновой Ψ-функции. В классической электродинамике не существует удовлетворительной модели электрона, он считается точечным. Полная энергия электромагнитного поля, создаваемая точечным зарядом, равна бесконечности. Поэтому, согласно классической электродинамике электрон должен обладать бесконечной массой. В квантовой электродинамике электрон также считается точечным, проблема бесконечной энергии точечного заряда остается не решенной.

В теории Янчилина электрон представлен в виде облака, имеющего конечный размер. Полная энергия такого электромагнитного поля конечна, проблема бесконечно большой энергии отпадает. Редукция волновой Ψ-функции является ключевым моментом к пониманию квантового парадокса «действие на расстоянии». Редукция, это схлопывание волнового пакета. Может ли она происходить быстрее скорости света? Действительно, это так. Противоречит ли это теории относительности? Янчилин показывает, что нет, т.к. ни заряд, ни масса, ни энергия не перемещаются.

Расщепление волнового пакета. Предположим, что электрон совершает хаотическое движение в ограниченной области, например, в комнате. В каждый сколь угодно малый, но конечный промежуток времени электрон успевает побывать (исчезнуть и появиться) во всех точках комнаты.

Разделим комнату пополам непроницаемой для электрона оболочкой. Перегородка, так же как и стены комнаты не взаимодействуют с электроном. Что в этом случае изменится в движении электрона? Ничего не изменится. Перегородка не будет мешать движению электрона, т.к. он движется не по непрерывной траектории, а дискретно: исчезает из одной области и появляется в другой. Итак, получилось две изолированные друг от друга комнаты, в которых движется дискретно *только один* электрон. Начнем отодвигать комнаты одна от другой. Расстояние между комнатами можно сделать сколь угодно большим. Электрон будет продолжать двигаться одновременно в двух комнатах. Примером такого дискретного движения в двух изолированных друг от друга областях может служить движение электрона в атоме.

Волновой пакет (виртуальное облако), в котором электрон совершает хаотическое дискретное движение, имеет возможность расщепиться на две половинки – два волновых пакета. Электрон может двигаться в двух различных направлениях. Например, он может пройти через два отверстия одновременно. Если при дальнейшем движении эти волновые пакеты соединятся на детекторе, то произойдет их интерференция. Хотя при этом электрон всего один.

Нелокальность квантовой механики позволяет коррелированно, одновременно взаимодействовать двум волновым пакетам, полученным из одной единой волновой *Ψ-функции* на сколь угодно больших расстояниях до тех пор пока не произойдет редукция, распад этой *Ψ-функции*.

Время необратимо именно потому, что происходит редукция *Ψ-функции.* Новая модель дискретного движения дает объяснение этому процессу на самом фундаментальном уровне. Скорость перемещения и скорость расплывания волнового пакета ограничена скоростью света, поэтому движение волнового пакета является непрерывным. При

расщеплении волновой *Ψ-функции* на два пакета и при редукции одного из них, например за счет взаимодействия с классическим объектом, обнаружить электрон во втором пакете невозможно. Этот пример иллюстрирует корпускулярно-волновой дуализм.
Таким образом, подход, развиваемый Янчилиным, позволяет рассматривать движение квантового объекта как комбинацию двух движений: непрерывного движения волновых пакетов и дискретного движения внутри этих пакетов.

Новая интерпретация квантовой механики позволяет объяснить: Откуда берется неопределенность в микромире, как электрон ухитряется пройти через два отверстия одновременно, как физически осуществляется механизм дальнодействия, что описывает *Ψ-функция* и как происходит её редукция, почему квантовый объект ведет себя то как частица, то как волна и, наконец, как объяснить необратимость времени.

5. 5. С какой скоростью распространяется гравитация?

Электромагнитное взаимодействие распространяется со скоростью света, и его переносчиками являются фотоны – кванты электромагнитного поля. Рассуждая по аналогии, можно предположить, что существуют гравитационные волны – возмущения гравитационного поля, распространяющиеся с конечной скоростью и несущие с собой энергию, а, следовательно, и массу. В этом случае возможно существование частиц, являющихся квантами гравитационного поля.

Впервые существование гравитационных волн было предсказано Эйнштейном на основе ОТО ещё в 1916. Начиная с 60-х годов XX века, в различных странах ведутся поиски гравитационных волн. Однако, несмотря на затраченные полувековые усилия, гравитационные волны не обнаружены.
Возможны три варианта:

1. $V = c$. Наиболее «естественная» возможность. Эйнштейн принял этот вариант без каких-либо экспериментальных доказательств.
2. $V > c$. Этот вариант противоречит специальной теории относительности. Представим себе, что V = 500 000 км/с. Так как c – остается одной и той же в различных системах отсчета, V - должна быть различной в этих системах. Однако существует некоторая надежда, что гравитация выходит за рамки той области, где применима СТО. В пространстве, где есть поле тяготения, симметрия полностью исчезает, поэтому в нем не выполняется принцип относительности. Нет сохранения относительной или внутренней структуры цепочек событий при действии группы симметрии.
3. $V \leq c$. Вариант не противоречит специальной теории относительности, но V – должно быть близко к c, иначе, - наблюдались бы отклонения от закона Всемирного тяготения, в котором предполагается, что гравитация распространяется мгновенно.

Если гравитация распространяется мгновенно, то сила притяжения, действующая на Луну со стороны Земли, направлена в центр Земли. Если гравитация распространяется со скоростью света, то эта сила направлена в точку, которая находится в 40 км от центра Земли. Пьер Лаплас провел анализ данных наблюдений за движением Луны, накопленных за сотни лет и сделал определенный вывод.

Скорость гравитации и Лаплас.

Пьер Симон Лаплас (1749 -1827), основываясь на научных данных своего времени, ясно осознал, что Солнечная система очень чувствительна к возмущениям. В его время уже было известно, что скорость света конечна. А это означает, что видимые и истинные положения светил могут не совпадать. Рассмотрим простейший случай: два объекта А и В равной массы вращаются вокруг общего центра масс С по часовой стрелке. Пускай в момент времени $t = 0$ они лежат на одной линии:

A.....C.....B

Учитывая конечную скорость распространения света, наблюдатель в точке А видит точку В не в её истинном положении сейчас, а там где она была некоторое время назад (обозначим её В'), то есть под некоторым углом по отношению к направлению на центр масс. То же самое справедливо для наблюдателя В: он видит объект А в точке А'.

.....B'
A.....C.....B
A'.....

Оба наблюдателя видят друг друга чуть-чуть впереди по сравнению с центром масс. Если гравитационное взаимодействие распространяется с такой же скоростью, что и свет, то на каждый из этих двух объектов будет действовать ускоряющая сила. Значит, система должна постоянно раскручиваться и разлететься.

Поэтому Лаплас пришел к выводу о мгновенном распространении гравитации. Вот что он писал:

"...Расчет показал мне, что из этой разницы следует возрастание средних движений планет вокруг Солнца и спутников вокруг своих планет. Я вообразил, что таким способом можно объяснить вековое уравнение Луны, поскольку думал, так же как и все геометры, что оно необъяснимо при принятых представлениях о действии тяготения. Я нашел, что если бы вековое уравнение Луны происходило по этой причине, то чтобы полностью заменить ею тяготение Луны к Земле, надо было бы приписать Луне скорость, направленную к центру этой планеты, по крайней мере, в 7000000 раз большую, чем скорость света. Поскольку истинная причина векового уравнения Луны сегодня хорошо известна, мы уверены, что скорость распространения тяготения еще гораздо больше. Значит, эта сила действует со скоростью, которую мы можем рассматривать как бесконечную; и мы можем заключить, что притяжение Солнца передается за почти неделимое мгновенье до крайних пределов солнечной системы".

Пьер Симон Лаплас, "Изложение Системы Мира", Ленинград, "Наука", 1982, стр. 224.

Итак, уже двести лет назад, для спасения устойчивости Солнечной системы Лаплас был вынужден указать на бесконечную скорость распространения гравитации.

Объяснение парадокса с точки зрения ОТО.

В начале двадцатого века было доказано, что никакие взаимодействия не могут распространяться быстрее скорости света, поскольку при этом нарушается принцип причинности. На смену ньютоновской теории гравитации пришла эйнштейновская теория относительности. А вопрос устойчивости Солнечной системы теперь должен был решаться по-другому. Откроем сборник задач по теории относительности и гравитации. (А.Лайтман, В. Пресс, Р. Прайс, С. Тюкольски. Москва, Мир, 1979, стр. 80.)

Задача 12.4. *Положение Солнца на небе в принципе можно определить с помощью чувствительного приливного гравиметра. На какой угол отличается положение, определенное этим способом, от измеренного оптическими средствами? Далее если бы истинное положение Солнца соответствовало его оптически наблюдаемому положению, то на Землю вдоль направления её движения должна была бы действовать некая сила. Почему? Как бы в этом случае менялся со временем радиус земной орбиты?*

Уже из условия задачи ясно, что в нынешней теории гравитации направление на видимое положение Солнца и направление его гравитационного взаимодействия не лежат на одной линии. На странице 322 читаем решение этой задачи:

Лаплас был первым, кто осознал тот факт, что эти два положения должны отличаться друг от друга. Оптически наблюдаемое положение Солнца на небосводе смещено за счет конечности скорости света; другими словами, приходящий от Солнца свет испытывает аберрацию на угол y = v/c, где v - скорость движения Земли по орбите. Далее поскольку кулоновское гравитационное поле аберрации не испытывает, то если бы сила тяготения была направлена в сторону смещенного положения Солнца,

существовала бы компонента солнечного ускорения, равная $(GM_{Sun}/r^2)*(v/c)$ *и направленная вдоль движения Земли. В этом случае энергия Земли должна была бы возрастать со скоростью*

$$d(E/M_{Earth}) / dt = GM_{Sun}/r^2 * v^2/c$$

Однако, поскольку $E/M_{Earth} = -(1/2)GM_{Sun}/r$ *мы фактически имели бы дело с потерей энергии* [Я бы уточнил: с потерей кинетической энергии, ростом потенциальной энергии, и в итоге - ростом общей энергии. И.Г.], *соответствующей увеличению радиуса земной орбиты со скоростью* $dr/dt = 2v^2/c$. *Если учесть, что* $v^2 = GM_{Sun}/r$, *это уравнение легко интегрируется:*

$t-t_0 = c/(4GM_{Sun})*(r^2-r_0^2)$.

Для земной орбиты $r=1.5*10^{13}$ см, v = 30 км/с, *так что* $y=10^{-4}$. [То есть, авторы здесь несколько нарушили последовательность изложения, взяли отношение v/c = 30(км/с) /300000(км/с)=10^{-4}, и указали нам первый ответ: угол между направлением силы гравитационного и видимого положений Солнца. А далее они продолжают решение, и стартуют Землю с поверхности Солнца по касательной.] *Если теперь положить* r_0 *равным, например, радиусу Солнца* $r_0 = 7*10^{10}$ см, *то* $t-t_0 \sim 1{,}3*10^{10}$ с ~ 400 лет. *Это значительно меньше, чем длительность геологического периода, в течение которого, как известно, радиус земной орбиты не менялся.*

Следовательно, если бы Земля находилась у поверхности Солнца, то ускоряющая сила вывела бы Землю на её нынешнюю траекторию за 400 лет. А почему бы и нет? Поверхность Солнца не есть положение равновесия для нас. Положением равновесия для нас должна быть наша нынешняя орбита, по которой Земля уже летает миллиарды лет. Но описанная ускоряющая сила должна толкать Землю и дальше от этой орбиты. Чтобы вытолкать Землю не на одну астрономическую единицу, а на две а.е., то понадобилось бы 1600 лет; на три а.е. - 3600 лет; на четыре - 6400 лет. Но Земля не смещается со своей траектории. Следовательно, либо оптическое и гравитационное изображение Солнца отличаются, причем так, что можно было бы даже полагать скорость распространения гравитации бесконечной, либо должна существовать сила, направленная в противоположную сторону, и противоборствующая этому ускорению, так чтобы для планет существовали области, где они находятся в положении устойчивого равновесия.

Гипотеза о нелокальной природе гравитационного поля.

Рассмотрим ситуацию, когда скорость распространения гравитации бесконечна: $V = \infty$. Как известно, такого взгляда придерживался Ньютон. В сформулированном им законе Всемирного тяготения гравитационное взаимодействие распространяется мгновенно. Конечно, даже во времена Ньютона бесконечная скорость распространения вызывала недоверие. После создания специальной теории относительности, когда стало ясно, что ничто материальное не может перемещаться в пространстве быстрее света, недоверие к бесконечности скорости возросло.

Однако после создания квантовой механики ситуация существенно изменилась. Квантовая механика – это нелокальная теория, которая предсказывает существование мгновенной корреляции в движении пространственно разнесенных объектов. В том случае, если эти объекты описываются общей волновой Ψ-функцией. Многочисленные эксперименты подтвердили одно из самых странных свойств квантового мира – нелокальность. Квантовая механика предсказывает существование нелокальной связи между пространственно разделенными объектами. Суть нелокального взаимодействия состоит в том, что система, состоящая из нескольких элементарных частиц, ведет себя как единое целое и взаимодействует с окружающим миром как единое целое. Если, например, одна из частиц этой системы взаимодействует с классическим объектом, то одновременно с изменением её состояния изменяется состояние всех остальных частиц.

Для того чтобы между различными частицами возникла нелокальная связь, достаточно, чтобы они в течение некоторого времени взаимодействовали друг с другом.

Для того чтобы разрушить нелокальную связь между двумя частицами, достаточно одну из них локализовать в некотором месте пространства.

Нелокальность существует между квантовыми объектами, и это экспериментально доказанный факт, однако почему бы не допустить, как это делает Янчилин, наличие нелокальной связи между гравитационными полями, создаваемыми различными массами Вселенной? В этом случае:

Гравитационное взаимодействие передаётся мгновенно на громадные расстояния не потому, что оно распространяется с бесконечной скоростью, а потому, что существует нелокальная связь между гравитационными полями, создаваемыми всеми массами, заполняющими Вселенную.

Например, движение нашей Галактики мгновенно влияет на движение соседней галактики, и наоборот. И при этом ничто материальное не распространяется от одной галактики к другой. То есть, гравитационных волн просто нет! Эта идея открывает возможность найти объяснение известным в солнечной системе резонансам и соизмеримостям во вращении планет и спутников.

5. 6. Черные дыры.

Черная дыра в гравитации Ньютона. Для того чтобы вылететь из поля притяжения тела массой M радиусом R, тело массы m должно иметь скорость V: $mV^2/2 = GmM/R$, $V = (2GM/R)^{1/2}$. Вторая космическая скорость на поверхности тела массы M равняется скорости света c при радиусе тела $r_g = 2GM/c^2$. Величина r_g называется гравитационным радиусом массы M. Если радиус некоторой массы меньше гравитационного, то означает ли это то, что свет не может покинуть её поле притяжения? В рамках модели Янчилина такой подход не правомерен, т.к. неизвестна скорость света вблизи массы M.

Черная дыра в ОТО. Решение уравнения Эйнштейна для случая точечной массы получено Шварцшильдом. Суть его в следующем. Если на большом удалении от массы пройдет интервал времени T: $T = T_o(1 - 2GM/rc^2)^{1/2}$. Получается, что на расстоянии $r_g = 2GM/c^2$ все физические процессы полностью останавливаются! Гипотетический массивный объект с радиусом меньше гравитационного, получил название «черная дыра».

Черная дыра в рамках ньютоновской гравитации, это огромная масса, вблизи которой вторая космическая скорость больше чем 300 000 км/с. Такие объекты могут существовать в природе. В черной дыре согласно ОТО, время замедляется и останавливается, сила гравитационного притяжения возрастает до бесконечности. С точки зрения стороннего наблюдателя он никогда не достигнет черной дыры, т.к. ему потребуется бесконечное время для достижения гравитационного радиуса.

Как ответить на вопрос: является ли Вселенная черной дырой, т.к. в течение её эволюции размер Вселенной, очевидно, был меньше гравитационного радиуса. Опыт изучения Вселенной противоречит идее черной дыры. Иначе получается, что, наблюдая Вселенную, - мы видим, что происходит внутри неё.

Черная дыра.

Имеется предел для массы звезды, которая может удерживаться в равновесии плотно упакованными нейтронами. Этот предел невозможно вычислить точно, так как поведение вещества при плотностях, существенно превышающих плотность ядерной материи, недостаточно изучено. Оценки массы звезды, которая уже не может стабилизироваться за счет вырожденных нейтронов, дают значение ~ 3M⊙.

Таким образом, если при взрыве сверхновой сохраняется остаток массы $M > 3M_\odot$, то он не может существовать в виде устойчивой нейтронной звезды. Ядерные силы отталкивания на малых расстояниях не в состоянии противостоять дальнейшему гравитационному сжатию звезды. Возникает необычный объект - черная дыра. Основное свойство черной дыры состоит в том, что никакие сигналы, испускаемые ею, не могут

выйти за её пределы и достигнуть внешнего наблюдателя. Звезда массы M, коллапсируя в черную дыру, достигает сферы радиуса r_g (сферы Шварцшильда):

$$r_g = 2GM/c^2,$$

(Формально к этому соотношению можно прийти, полагая в известной формуле для второй космической скорости $v_{k2} = (2GM/R)^{1/2}$ предельное значение этой скорости, равное скорости света).

При достижении объектом размера сферы Шварцшильда, его гравитационное поле становится столь сильным, что покинуть этот объект не может даже электромагнитное излучение. Шварцшильдовский радиус Солнца равен 3 км, Земли - 1 см.

Черная дыра Шварцшильда относится к не вращающимся объектам и является остатком массивной не вращающейся звезды. Вращающаяся массивная звезда коллапсирует во вращающуюся черную дыру (черную дыру Керра).

Черную дыру можно обнаружить только по косвенным признакам, в частности, если она входит в состав двойной звездной системы с видимой звездой. В этом случае черная дыра будет затягивать газ звезды. Этот газ будет нагреваться, становясь источником интенсивного рентгеновского излучения, которое может быть зарегистрировано.

В настоящее время нет прямых экспериментальных подтверждений существования черных дыр. Есть несколько космических объектов, поведение которых можно объяснить присутствием черных дыр. Так имеется объект Лебедь XI, представляющий собой двойную систему с периодом вращения 5.6 суток. В состав системы входят голубой гигант с массой $22M_\odot$ и невидимый источник пульсирующего рентгеновского излучения с массой $8M_\odot$, который возможно является черной дырой (объект такой большой массы не может быть нейтронной звездой).

Наряду с черными дырами, образовавшимися при коллапсе звезд, во Вселенной могут быть черные дыры, возникшие задолго до появления первых звезд вследствие неоднородности Большого Взрыва. Появившиеся при этом сгустки вещества могли сжиматься до состояния черных дыр, тогда как остальная часть вещества расширялась. Черные дыры, образовавшиеся на самом раннем этапе Вселенной, называют реликтовыми. Предполагают, что размер некоторых из них может быть значительно меньше размера протона.

В 1974 г. Хокинг показал, что черные дыры должны испускать частицы. Источником этих частиц является процесс образования виртуальных пар частица-античастица в вакууме. В обычных полях эти пары аннигилируют столь быстро, что их не удается наблюдать. Однако в очень сильных полях виртуальные частица и античастица могут разделиться и стать реальными. На границе черной дыры действуют мощные приливные силы. Под действием этих сил некоторые из частиц (античастиц), входивших в состав виртуальных пар, могут вылететь за пределы черной дыры. Так как многие из них аннигилируют, черная дыра должна становиться источником излучения. Энергия, излучаемая в пространство черной дырой, поступает из её недр. Поэтому в процессе такого испускания частиц, масса и размеры черной дыры должны уменьшаться. Таков механизм “испарения” черной дыры. Оценки показывают, что темп “испарения” очень медленный. Черная дыра массой в 10 солнечных масс испарится за 10^{69} лет. Время испарения сверхмассивных (миллиарды масс Солнца) черных дыр, которые могут быть в центре больших галактик, может составлять 10^{96} лет.

5. 7. Темная энергия.

Дифференциальные скорости вращения галактик (то есть зависимость скорости вращения $v(r)$ галактических объектов от расстояния r до центра галактики) определяются распределением массы в данной галактике и для сферического объёма с радиусом r, в котором заключена масса $M(r)$, задаются соотношением:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}},$$

т. е. за пределами объёма $M(r)$, в котором сосредоточена основная масса галактики скорость вращения $v(r) \sim r^{-1/2}$. Однако для многих спиральных галактик скорость $v(r)$ остаётся почти постоянной на весьма значительном удалении от центра (20—25 килопарсек), что противоречит быстрому убыванию плотности наблюдаемой материи от центра галактик к их периферии (см. рис. П5-3).

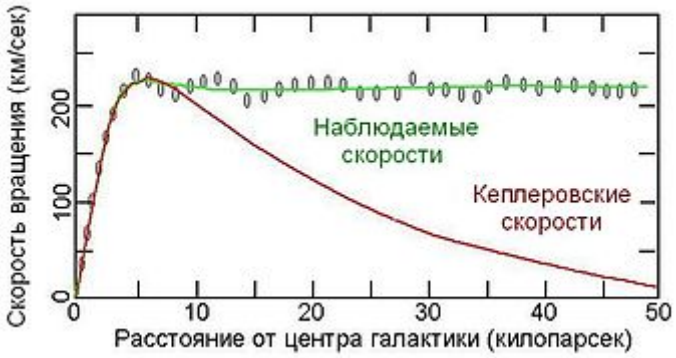


Рис. П5-3. Кривые дифференциального вращения галактик: отклонение от кеплеровского закона вращения объясняются, предположительно, наличием скрытой массы.

Таким образом, для объяснения наблюдаемых значений $v(r)$ необходимо допустить существование ненаблюдаемой (несветящейся) материи, простирающейся на расстояния, превышающие в десятки раз видимые границы галактик и с массой, на порядок выше совокупной массы наблюдаемой светящейся материи галактики.

Рис. П5-4. Состав Вселенной по данным WMAP.

Тёмная материя в астрономии и космологии - это гипотетическая форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и не взаимодействует с ним. Это свойство данной формы вещества делает невозможным её прямое наблюдение. Однако возможно обнаружить присутствие тёмной материи по создаваемым ею гравитационным эффектам. Обнаружение тёмной материи поможет решить проблему скрытой массы, которая, в частности, заключается в аномально быстрой скорости вращения внешних областей галактик.

Барионная тёмная материя. Предполагается, что некоторая часть тёмной материи — это обычное вещество, но не испускающее электромагнитного излучения или испускающего слишком мало для прямого обнаружения. Как минимум, некоторые из таких объектов можно считать уже обнаруженными. Это тёмные галактические гало. Также на роль тёмного барионного вещества предлагают уже открытые коричневые карлики и нейтронные звезды.

Небарионная материя. В зависимости от скоростей частиц, из которых состоит тёмная материя, её можно разделить на несколько классов:

Горячая тёмная материя. Состоит из частиц, движущихся со скоростью близкой к световой, вероятно из нейтрино. Эти частицы имеют очень маленькую массу, но всё же не нулевую, учитывая огромное количество нейтрино во вселенной (300 частиц на 1 см³), это даёт огромную массу. В некоторых моделях на нейтрино приходится 10 % тёмной материи. Эта материя из-за своей огромной скорости не может образовывать стабильные структуры, но может влиять на обычное вещество и другие виды тёмной материи.

Тёплая тёмная материя. Материю, движущуюся с релятивистскими скоростями, но ниже, чем у горячей тёмной материи, называют «тёплой». Скорости её частиц могут лежать в пределах от 0,1c до 0,95c. Некоторые данные, в частности, температурные колебания фонового микроволнового излучения, дают основания полагать, что такая форма материи может существовать. Пока нет никаких кандидатов на роль составляющих тёплой тёмной материи, но возможно, стерильные нейтрино, которые должны двигаться медленнее обычных трёх ароматов нейтрино, может стать одним из них.

Холодная тёмная материя. Тёмную материю, которая движется при классических скоростях, называют «холодной». Этот вид материи представляет наибольший интерес, так как, в отличие от тёплой и горячей тёмной материи, холодная может образовывать стабильные формирования, и даже целые тёмные галактики.

Однако недавно было высказано противоположное мнение: Темная материя – всего лишь иллюзия, производимая эффектом гравитационно поляризованного квантового вакуума, считает исследователь из CERN. Объяснить странное поведение вещества в галактиках можно на основе известных квантово-механических эффектов, не привлекая экзотическую физику. Физик Драган Славко Хаджукович (Hajdukovic D.S), работающей в CERN - один из тех, кто скептически относится к гипотезе скрытой массы. В свежем номере журнала Astrophysics and Space Science опубликована его статья под названием «Не является ли темная материя иллюзией, вызванной гравитационной поляризацией квантового вакуума?» (текст статьи доступен в архиве электронных препринтов), предлагающая альтернативное и довольно изящное решение проблемы парадокса со скоростями.

«Есть два подхода в объяснении аномально высоких скоростей вращения внешних областей галактик: один постулирует существование темной материи, другой требует изменения закона гравитации, – пояснил Хаджукович. - Я предлагаю третий вариант, не требующий ни участия темной материи, ни модификаций существующих законов».

5. 8.Самогравитация.

Самогравитация рассматривается на примере плоского холодного бесконечно тонкого гравитирующего слоя. В такой модели при сжатии вещества *не возникает противодействующей силы*. Вещество, ускоряясь, падает на область повышенной плотности, увеличивая её величину и, тем самым, увеличивая силу притяжения.

Развивается гравитационная неустойчивость (коллапс), частота возмущений которой является чисто мнимой.

В такой системе *из-за отсутствия возвращающей силы - колебательного процесса нет.* Для холодных систем нет различия между бесстолкновительной и газодинамической средами.

Вещество падает само на себя для любых начальных возмущений, но наиболее быстро растут мелкомасштабные (большие k), и этим гравитирующий слой отличается от однородной во всех направлениях среды плотности ρ_o, для которой $\omega^2 = 4\pi G\rho_o$. Последнюю формулу легко понять на следующем примере. Если в начальный момент времени расстояние между двумя одинаковыми неподвижными относительно друг друга гравитационно взаимодействующими телами равно a, то через время $t_o = \pi/2(a^3/2m\mathrm{G})^{1/2}$ частицы столкнутся (это значение легко получить из третьего закона Кеплера). Принимая для оценок среднюю плотность такой системы $\rho_o = 2m/(4/3\pi a^3)$, получаем $t_o \approx 1/(\mathrm{G}\,\rho_o)^{1/2}$. Мнимая часть частоты (инкремент) обратна характерному времени роста возмущений и по порядку величины $\mathrm{Im}(\omega) \sim 1/t_o \sim (\mathrm{G}\,\rho_o)^{1/2}$.

В процесс самогравитации последовательно включаются в рассмотрение: учет хаотического движения частиц, вращения диска, различных неоднородностей равновесных величин и т.п. Некоторые факторы делают диск более неустойчивым (увеличивают инкремент), и их естественно называть дестабилизирующими. Другие приводят к уменьшению инкремента вплоть до стабилизации гравитационной неустойчивости.

Гравитационный коллапс - быстрое сжатие и распад межзвездного облака или звезды под действием собственной силы тяготения. Гравитационный коллапс – очень важное астрофизическое явление; он участвует как в формировании звезд, звездных скоплений и галактик, так и в гибели некоторых из них.

В межзвездном пространстве существует множество облаков, состоящих в основном из водорода плотностью около 1000 ат/см^3, размером от 10 до 100 св. лет. Их структура и, в частности, плотность непрерывно изменяются под действием взаимных столкновений, нагрева звездным излучением, давления магнитных полей и т.д. Когда плотность облака или его части становится настолько большой, что гравитация превосходит газовое давление, облако начинает неудержимо сжиматься – оно коллапсирует. Небольшие начальные неоднородности плотности в процессе коллапса усиливаются; в результате облако фрагментирует, т.е. распадается на части, каждая из которых продолжает сжиматься.

При сжатии газа возрастают его температура и давление, что может препятствовать дальнейшему сжатию. Но пока облако прозрачно для инфракрасного излучения, оно легко остывает, и сжатие не прекращается. Однако по мере нарастания плотности отдельных фрагментов их остывание затрудняется и возрастающее давление останавливает коллапс – так образуется звезда, а вся совокупность превратившихся в звезды фрагментов облака образует звездное скопление.

Коллапс облака в звезду или в звездное скопление продолжается около миллиона лет – сравнительно быстро по космическим масштабам. После этого термоядерные реакции, происходящие в недрах звезды, поддерживают температуру и давление, что препятствует сжатию. В ходе этих реакций легкие химические элементы превращаются в более тяжелые с выделением огромной энергии (подобное происходит при взрыве водородной бомбы). Выделившаяся энергия покидает звезду в виде излучения. Массивные звезды излучают очень интенсивно и сжигают свое «горючее» всего за несколько десятков миллионов лет. Звездам малой массы хватает их запаса топлива на многие миллиарды лет медленного горения. Рано или поздно у любой звезды топливо заканчивается,

термоядерные реакции в ядре прекращаются и, лишенная источника тепла, она остается в полной власти собственной гравитации, неумолимо ведущей звезду к гибели.

Коллапс звезд малой массы. Если после потери оболочки остаток звезды имеет массу менее 1,2 солнечной, то его гравитационный коллапс не заходит слишком далеко: даже лишенная источников тепла сжимающаяся звезда получает новую возможность сопротивляться гравитации. При высокой плотности вещества электроны начинают интенсивно отталкиваться друг от друга; это связано не с их электрическим зарядом, а с их квантово-механическими свойствами. Возникающее при этом давление зависит только от плотности вещества и не зависит от его температуры. Такое свойство электронов физики называют вырождением. У звезд малой массы давление вырожденного вещества способно сопротивляться гравитации. Сжатие звезды останавливается, когда она становится размером приблизительно с Землю. Такие звезды называют белыми карликами, поскольку светят они слабо, но имеют сразу после сжатия довольно горячую (белую) поверхность. Однако температура белого карлика постепенно снижается, и через несколько миллиардов лет такую звезду уже трудно заметить: она становится холодным невидимым телом.

Коллапс массивных звезд. Если масса звезды более 1,2 солнечной, то давление вырожденных электронов не в состоянии сопротивляться гравитации, и звезда не может стать белым карликом. Ее неудержимый коллапс продолжается, пока вещество не достигнет плотности, сравнимой с плотностью атомных ядер (примерно $3 \cdot 10^{14}$ г/см^3). При этом большая часть вещества превращается в нейтроны, которые, подобно электронам в белом карлике, становятся вырожденными. Давление вырожденного нейтронного вещества может остановить сжатие звезды, если ее масса не превышает приблизительно 2 солнечные. Образовавшаяся нейтронная звезда имеет диаметр всего около 20 км. Когда стремительное сжатие нейтронной звезды резко останавливается, вся кинетическая энергия переходит в тепло и температура поднимается до сотен миллиардов кельвинов. В результате происходит гигантская вспышка звезды, ее внешние слои с большой скоростью выбрасываются наружу, а светимость возрастает в несколько миллиардов раз. Астрономы называют это «взрывом сверхновой». Примерно через год яркость продуктов взрыва уменьшается, выброшенный газ постепенно охлаждается, перемешивается с межзвездным газом и в следующие эпохи входит в состав звезд новых поколений. Возникшая в ходе коллапса нейтронная звезда в первые миллионы лет быстро вращается и наблюдается как переменный излучатель – пульсар.

Если же масса коллапсирующей звезды значительно превышает 2 солнечные, то сжатие не останавливается на стадии нейтронной звезды, а продолжается до тех пор, пока ее радиус не уменьшится до нескольких километров. Тогда сила притяжения на поверхности возрастает настолько, что даже луч света не может покинуть звезду. Сжавшуюся до такой степени звезду называют черной дырой. Такой астрономический объект можно изучать только теоретически, используя общую теорию относительности Эйнштейна. Расчеты показывают, что сжатие невидимой черной дыры продолжается, пока вещество не достигнет бесконечно большой плотности (сингулярности).

Возможен ли коллапс пылевого шара в ОТО. Статья под таким названием была недавно опубликована в ДАН (Герштейн и др., 2008). Авторы, среди которых академик А.А.Логунов, разработавший альтернативную ОТО, релятивистскую теорию гравитации, обнаружили несоответствие между общими положениями псевдоримановой геометрии и уравнениями Гильберта-Эйнштейна. Уравнения ОТО оказываются не совсем адекватны общей идее ОТО, что гравитация проявляется как псевдориманова геометрия

пространства-времни. Это приводит к сингулярности, т.е. нефизическому решению, - получаемому при анализе уравнений ОТО.

«В отличие от ОТО, в релятивистской теории гравитации, как полевой теории, благодаря другой системе гравитационных уравнений, такая ситуация не возникает, так как согласно уравнениям релятивистской теории гравитации, **процесс сжатия пылевого шара непрерывно переходит к *остановке* сжатия шара, а затем к его *последующему расширению*».**

Вместо заключения.

В заключение приведём пару неудачных попыток понять сущность гравитации исходя из представлений о кажущейся аналогии между гравитацией и электродинамикой. Обе попытки имеют давнюю историю и принадлежат двум известным физикам: Хевисайду и Дирку.

Хевисайд предложил уравнения гравитации, подобные уравнениям Максвелла. Эти уравнения хорошо согласованы с рядом законов и принципов физики. Поэтому можно непосредственно обратиться к уравнениям Хевисайда, минуя ОТО.

Между ОТО и теорией Хевисайда большое различие, состоящее в том, что первая связана с ограниченной, а вторая - с неограниченной Вселенной. Поэтому в теории Хевисайда, как и в теории Ньютона, возникает проблема расходимости гравитационного потенциала, т.е. проблема гравитационного парадокса в безграничном пространстве, заполненном материей. Однако эта трудность имеет место только в случае, когда предполагается существование вещества с положительной массой, и только.

Уравнения Максвелла	Уравнения Хевисайда
$\operatorname{div}\mathbf{D}=\rho_E;$	$\operatorname{div}\mathbf{P}_G=-\rho_G;$
$\operatorname{div}\mathbf{B}=0;$	$\operatorname{div}\mathbf{P}_S=0;$
$\operatorname{rot}\mathbf{H}=\mathbf{J}_E+\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t};$	$\frac{1}{s_0}\operatorname{rot}\mathbf{S}=-\mathbf{J}_G+\frac{\partial\mathbf{P}_G}{\partial t};$
$\operatorname{rot}\mathbf{E}=-\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t};$	$\frac{1}{s_0}\operatorname{rot}\mathbf{G}=-\frac{\partial\mathbf{P}_S}{\partial t};$
$\mathbf{D}=\varepsilon_0\mathbf{E}+\mathbf{P};$	$\mathbf{P}_G=\mathbf{P}_{GVF}+\mathbf{P}_{GK};$
$\mathbf{B}=\mu_0\mathbf{H}+\mu_0\mathbf{M},$	$\mathbf{P}_S=\mathbf{P}_{SFV}+\mathbf{P}_{SK},$

Проблема отрицательной массы ставит под сомнение этот подход. Существует подход, развиваемый Шиповым, где сказано о равенстве положительных и отрицательных масс во Вселенной. (Этот подход подвергается резкой критике физиками). В этом случае в теории гравитации Хевисайда (и Ньютона) сразу же снимаются возражения, связанные с гравитационным парадоксом. В гравидинамике Хевисайда появляется фундаментальное положение равенства положительных и отрицательных масс, эквивалентное фундаментальному положению равенства положительных и отрицательных электрических зарядов в электродинамике.

Исходя из признания СТО теорией всеобщего применения, необходимо распространить группу преобразований Лоренца и на уравнения Хевисайда. В частности, необходимо принять скорость гравитационных волн равной скорости света, положив массу релятивистским инвариантом. Таким образом, в теории Хевисайда становятся справедливыми все три фундаментальные положения электродинамики, если в нем осуществить замену релятивистски-инвариантных зарядов на релятивистски-

инвариантные массы.

Для полей: E - электрическое, $\mathbf{M}'$ - магнитное, G - гравитационное, S - спиновое; для поляризаций ФВ: PEFV - электрическая, $\mathbf{P}_{MFV}$ - магнитная, $\mathbf{P}_{GFV}$ - гравитационная, $\mathbf{P}_{SFV}$ - спиновая; для поляризаций вещества: $\mathbf{P}_{EK}$ -электрическая, $\mathbf{P}_{MK}$ -- магнитная, $\mathbf{P}_{GK}$ - гравитационная, $\mathbf{P}_{SK}$ - спиновая. Кроме того, вводятся следующие обозначения: ρ_E - плотность электрических зарядов вещества; ρ_G - плотность гравитационных масс вещества; $\mathbf{J}_E = \rho_E \cdot \mathbf{v}$ - плотность электрического тока вещества; $\mathbf{J}_G = \rho_G \cdot \mathbf{v}$ - плотность гравитационного тока вещества; $\mathbf{v}$ - скорость носителей электрического или гравитационного токов. В случае движения точечного электрического заряда q: $\mathbf{J}_E = \mathbf{v}\, q\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_q)$; в случае движения точечной гравитационной массы m: $\mathbf{J}_G = \mathbf{v}\, m\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_m)$; $\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_m)$ - δ-функция; $\mathbf{r}_q, \mathbf{r}_m$ - радиусы- векторы траектории движения электрического заряда и гравитационной массы соответственно; r - текущий радиус-вектор; $\mathbf{v} = d\,\mathbf{r}_q / dt = d\,\mathbf{r}_m / dt$.

Уравнения Максвелла		Уравнения Хевисайда	
ε_0	$8.855 \cdot 10^{-12}$ м^3·кг$^{-1}$·с^4·А^2	g_0	$1.193 \cdot 10^{9}$ м^3· кг· с^2
μ_0	$1.257 \cdot 10^{-6}$ м· кг· с$^{-2}$·А$^{-2}$	s_0	$0.9329 \cdot 10^{-26}$ м· кг$^{-1}$
ρ_E	м$^{-3}$·с·А = Кл / м^3	ρ_G	м$^{-3}$ · кг = кг / м^3
$\mathbf{J}_E$	м$^{-2}$·А = А/м^2	$\mathbf{J}_G$	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}}{\text{м}^3}$
$\mathbf{P}_E$	$\text{м}^{-2} \cdot \text{с} \cdot \text{А} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{м}^3}$	$\mathbf{P}_G$	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^3}$
$\mathbf{P}_M$	$\text{м}^{-1} \cdot \text{А} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^3}$	$\mathbf{P}_S$	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}}{\text{м}^3}$
$\mathbf{E}$	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1} = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}(\text{м} \cdot \text{с}^{-2})$	G	м·с$^{-2}$
$\mathbf{M}'$	$\text{Кл} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1} = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}(\text{с}^{-1})$	S	с$^{-1}$

Уравнения гравидинамики Хевисайда стимулировали развитие идей, связанных с т.н. спиновыми полями кручения, или, иначе, с торсионными полями.

П. Дирак обратил внимание на безразмерную постоянную $e^2/4\pi G m_e m_p$, которая по порядку величины равна 10^{40}. Эта постоянная может быть получена следующим образом. Сила взаимодействия протона и электрона в атоме водорода обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними: $F_e = e^2/4\pi r^2$. То же самое относится и к гравитационному взаимодействию: $F_g = G m_e m_p / r^2$. Если составить отношение сил электростатической и гравитационной, то получится постоянная Дирака. Он высказал предположение (гипотеза больших чисел), что такое большое число в природе не может быть случайным, и связал это число с возрастом Вселенной. По последним оценкам ее возраст (T) составляет примерно 16 млрд. лет. Год - это искусственная единица времени. Дирак воспользовался атомной единицей времени, в которой за отсчет берется интервал

времени, в течение которого свет проходит "сквозь" классический электрон $e^2/4\pi m_e c^3$. Возраст Вселенной в этих единицах оказывается равным $\approx 10^{40}$. Дирак предположил, что эти очень большие числа действительно равны, т.е.: $e^2/4\pi G m_e m_p \approx T$. В атомной системе единиц заряд электрона e, массы протона и электрона m_p и m_e постоянны, если возраст Вселенной T растет, значит должна изменяться гравитационная постоянная ($G \sim 1/T$). В соответствии с возрастом Вселенной за год это изменение должно составлять 5×10^{-11}.

П. Дирак обратил внимание еще на одну очень большую безразмерную величину - полную массу Вселенной, выраженную в массах протона (примерно 10^{80}). Согласно гипотезе больших чисел следует ожидать, что это число пропорционально возрасту Вселенной в квадрате ($\sim T^2$). Это означает, что во Вселенной должно рождаться вещество, причем рождаться непрерывно. Дирак предположил два различных механизма этого явления. В первом из них новое вещество непрерывно рождается во всем пространстве Вселенной. Это, так называемое, - аддитивное рождение. Либо оно рождается рядом с уже существующим веществом, – это мультипликативное рождение. В предположении аддитивного рождения вещества масса Солнца $M_\odot$ остается приблизительно постоянной величиной, следовательно ($G \times M_\odot$) $\sim 1/T$. Если имеет место мультипликативное рождение, $M_\odot \sim T^2$, т. е. ($G \times M_\odot$) $\sim T$.

Идеи П.Дирака были развиты и обобщены В. Кануто, П. Джорданом, Р. Дике и др. Проводимые ими исследования в значительной степени касались изменения во времени величины земного радиуса и величины ускорения силы тяжести в зависимости от вариации гравитационной постоянной. Кануто предполагал возможность вариации величины G, при этом, он считал, что при вариациях земного радиуса происходит превращение части потенциальной гравитационной энергии в энергию электромагнитного поля (?). Дике показал, что нет принципиальной разницы между предположениями об изменении массы и изменении гравитационной постоянной. Можно предположить, что в постоянной Дирака изменяется со временем электрический заряд, однако, как было показано (Sabbata, 1980), это противоречит современным экспериментальным данным.

Общая теория относительности не удовлетворяет тезису Дирака, но может быть соответствующим образом обобщена, что было сделано Джорданом, а затем Брансом и Дике. Из теории Джордана вытекает факт творения материи. Бранс и Дике, введя дополнительное к гравитационному скалярное поле, собственно связанное с изменением величины G, “обошли” эту трудность. Идея “творения” материи – ошибочна.

Литература

Александров Е. Б. В поисках пятой силы // http://n-t.ru/tp/iz/pps.htm

Буллен К.Е. Плотность Земли. М.: Мир. 1978. 442 с.

Герштейн С.С., Логунов А.А., Мествиришвили М.А. Возможен ли коллапс пылевого шара в общей теории относительности. ДАН. Т. 421. № 1. С. 34-36. 2008.

Кэрри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир.1991. 447 с.

Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.

Мясников В.М. Расширение Вселенной – локальная физика (опыт построения современной физической картины мира). ЛГУ. 2004. http://quater1.narod.ru/

Серкеров С.А. Теория гравитационного и магнитного потенциалов. М.: Недра.1990. 304с.

Хаббард У. Внутреннее строение планет. М.: Мир. 1987. 327 с.

Шен Э.Л. Расширение Земли в связи с формированием её глобальной структуры. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. С.180-185.

Шен Э.Л. Типы внутренней структуры Земли и возможные схемы эволюции Земли и планет. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 2. С. 18-25.

Янчилин В.Л. Неопределенность, гравитация, космос. М.: Едиториал УРСС, 2003. 248с.

Янчилин В.Л. Тайны гравитации. М.: Новый Центр, 2004. 240с.

Brans C., Dicke R.H. Mach's principle and relativistic theory of gravitation. Phys. Rev. 1961. V. 124. N. 3. P. 925-935.
Brumfiel G. Particles break light-speed limit. Neutrino results challenge cornerstone of modern physics // Nature, 22 September 2011 | doi:10.1038/news.2011.554/
Chao B.F., Gross R.S. Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes. Geophys. J.R. astr. Soc. 1987. V. 91. P. 569-596.
Chao B.F., Gross R.S. Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes. Geophys. J. Int. 1995-a. V. 122. P. 776-783.
Chao B.F., Gross R.S. and Dong D-N. Changes in global gravitational energy induced by earthquakes. Geophys. J. Int. 1995-b. V. 122. P. 784-789.
Dicke R.H. Implication for cosmology of steller and galactic evolution rates. Rev. Mod. Phys. 1962. V. 34. N. 1. P. 110-122.
Dirac P.A.M. Anew basis for cosmology. Pros. Roy. Soc. London A. 1938. V. 165. P. 199-206.
Jordan T.H. The deep structure of the continents. Sci.Amer. 1979. V. 240. N 1. P.70-82.
570. N. 9. P. 63-90.
Hajdukovic D.S. Is dark matter an illusion created by the gravitational polarization of the quantum vacuum? arXiv:gr-qc/0612088v2 (2007).
Heaviside O.A. Gravitational and Electromagnetic Analogy. The Electrican. 1893. P. 281-282, 359.
Sabbata V. On the variation of the gravitational constant G. Acta cosmol. Zes.nauk UJ. 1980. V.