ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ: ГОРЯЧАЯ ИЛИ ХОЛОДНАЯ?

Популярная геономия.

В. В. Кузнецов

Новосибирск
2014

Астрофизики отказались от модели “холодной” стационарной Вселенной в пользу “горячей” и расширяющейся. Вслед за ними, казалось бы, должны последовать геологи и геофизики, признав модель “горячей” и расширяющейся Земли.

ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ: ГОРЯЧАЯ ИЛИ ХОЛОДНАЯ?
Популярная геономия.

В. В. Кузнецов

Содержание:

Введение…….. 3
1. Планета Земля, её внутреннее устройство…… 6
2. Как изменялись представления о Земле по мере развития науки…….. 8
3. Образование солнечной системы и горячей Земли……. 17
Закон Тициуса-Боде. Плотность вещества в Солнечной системе.
4. Модель горячей Земли…… 24
Оценка температуры. Характер расширения Земли. Эволюция параметров Земли. Планеты и спутники в горячей модели.
5. Геомагнитное поле…….. 35
Размер источника. Модель генерации дипольного поля горячей Земли. Электропроводность F-слоя. Супервращение ядра. Фазовый переход в F-слое. Суточное вращение F-слоя и возникновение начального геомагнитного поля. Эффект усиления начального поля. Магнитные аномалии, джерки, инверсии и фокусы векового хода. Дрейф северного магнитного полюса.
6. Геодинамика…… 72
Дрейф материков. Спрединг и субдукция. Модель растекающейся капли. Суперхроны – суперплюмы. Парадокс Эверндена. Течение литосферы и образование гор.
7. Физика землетрясения……. 87
Модель сильных движений. Афтершоки. Ударно-волновая модель и принцип Рейда. Образование ударной волны на разрыве характеристики среды. Длительность фронта основного удара землетрясения.
8. Как образуются месторождения полезных ископаемых. …… 105
9. Менялась ли сила тяжести в ходе эволюции? ……. 109
10. О физике плюма.. ……. 113
11. О возможной причине усиления вулканизма и сейсмичности в наше время……119
12. Новая модель атмосферного электричества. ……123
13. Климат, роли инверсий геомагнитного поля и вариаций космических лучей…..127
14. Расширяющаяся Земля и её автор - «еретик» С. Уоррен Кэри……... ……...133
Заключение. Популярная геономия ……...……..…141
Направление дальнейших исследований ……...……143

Введение

Все мы живем на Земле и пользуемся её дарами. Но, по большому счету, до сих пор так и не знаем, как же она устроена, как образовалась, какова её судьба и судьба всего живого, что есть на Земле. То есть, мы знаем, конечно. В учебниках написано. А кто задумывался, всё ли верно в этих учебниках, даже школьных, и соответствует ли то, что написано, тому, что видно даже не вооруженным глазом? Пытливому человеку, который подчас скептически относится к тому, что написано в учебниках, - конечно видно.

Заметим, что 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 их - нет?

Конечно, одна из главных задач физики Земли, - ответить на вопрос, который отмечал ещё Эйнштейн: почему происходит генерация магнитного поля? Почему это поле имеется на других планетах? Почему оно было раньше на Луне и Марсе и потом исчезло? Есть ли, или было раньше магнитное поле на Венере? Убедительного ответа на эти вопросы человечество до настоящего времени так и не получило.

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.

Чтобы не быть голословным по поводу информации в учебниках, приведу пока лишь один пример, затем, по ходу дела буду приводить и другие примеры. Воспользуюсь школьным учебником для младших классов.

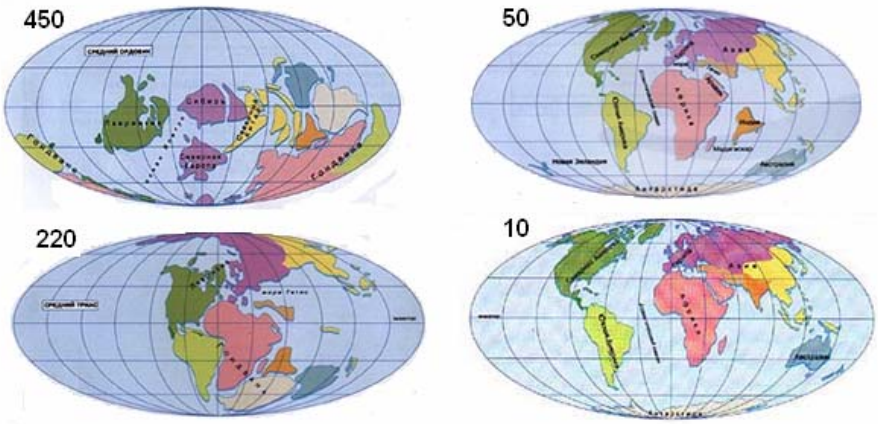


Рис. 1. Разрыв Гондваны и этапы раздвижения материков: цифры в млн. лет.

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, а также то, 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) 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 более 40 лет, но я не встретил ни одного опровержения идеи Мезервея. Геологи на этот факт не обратили внимание.

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

На рис. 2-а изображена ситуация, аналогичная приведенной на рис. 1 (220), и как видно, она невозможна на Земле современного радиуса. Именно в этом состоит парадокс Мезервея. Рассмотрим суть парадокса чуть подробнее.

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. Иначе, длина периметра Тихого океана никогда не была больше современной, только – меньше. Для того чтобы образовать Гондвану (рис. 2-а), материкам пришлось бы двигаться вдоль по направлениям, показанным стрелками на рисунке 2-b, увеличив примерно вдвое площадь поверхности Тихого океана, что противоречит палеомагнитным реконструкциям. Как показано многими авторами, материки можно «уложить» один к другому практически без зазоров на шаре радиусом, точно равным радиусу внешнего ядра Земли (рис. 2-с). 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 радиуса.

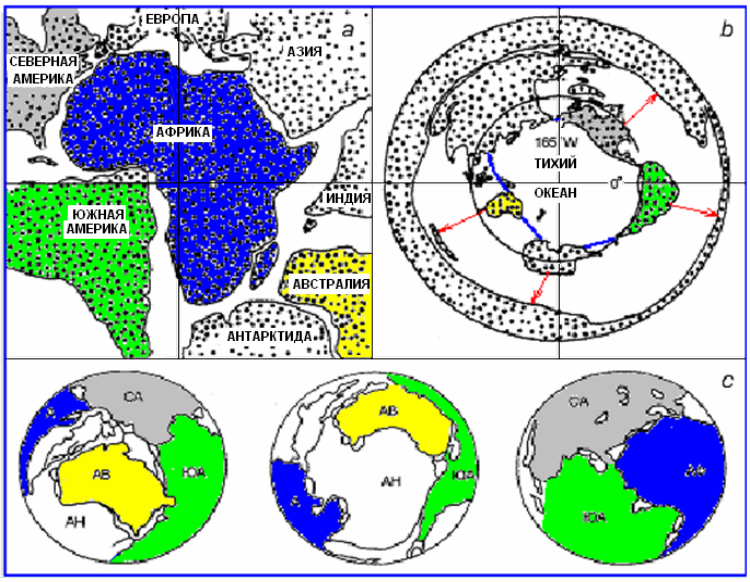


Рис. 2. Вверху слева – соединение материков в Гондвану; справа – интерпретация этого факта Мезервеем. Внизу: расположение материков на внешнем ядре Земли.

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

Приведенный пример настолько прост и прозрачен, что приходится только удивляться, почему до сих пор современная геодинамика, которая базируется на такой очевидной ошибке, не отвергнута научным сообществом.

Как будет ясно по прочтении этой книги, в физике Земли есть не мало аналогичных курьёзов. Отмечу один из них. Принято считать, что Земля образовывалась путем медленного «склеивания» пылевых частиц, названных планетозималями. Причем, при этом пылевые частицы сталкивались друг с другом на огромных скоростях порядка нескольких км в секунду. Представьте себе, что два кирпича летят навстречу друг другу каждый со скоростью 10 км в секунду. Соударяясь, они склеиваются в другой кирпич, в два раза больший. Это абсурдное утверждение. Достаточно привести простой пример. Кумулятивная струя движется в сторону брони танка со скоростью порядка 10 км/с и совсем не склеивается с броней, как это следует из наших рассуждений, а пробивает её, испаряя материал брони.

---

* Все ссылки, приведенные в этой популярной книге можно найти в книге автора «Введение в физику горячей Земли», изданной в Петропавловске-Камчатском в 2008.

Глава 1. Планета Земля, её внутреннее устройство.

Внутреннее устройство Земли известно благодаря информации о ней, полученной при изучении проходящих через Землю сейсмических волн, которые образуются при землетрясении или мощном взрыве. Эти волны проходят через всю толщу Земли, включая её внутреннее ядро, и регистрируются сетью сейсмографов (сейсмических станций), расположенных практически во всех регионах Земли.

Что нам 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. 3). Ядро Земли состоит из двух оболочек: центрального твердого кристаллического ядра, которое находится внутри расплавленного железного внешнего ядра.

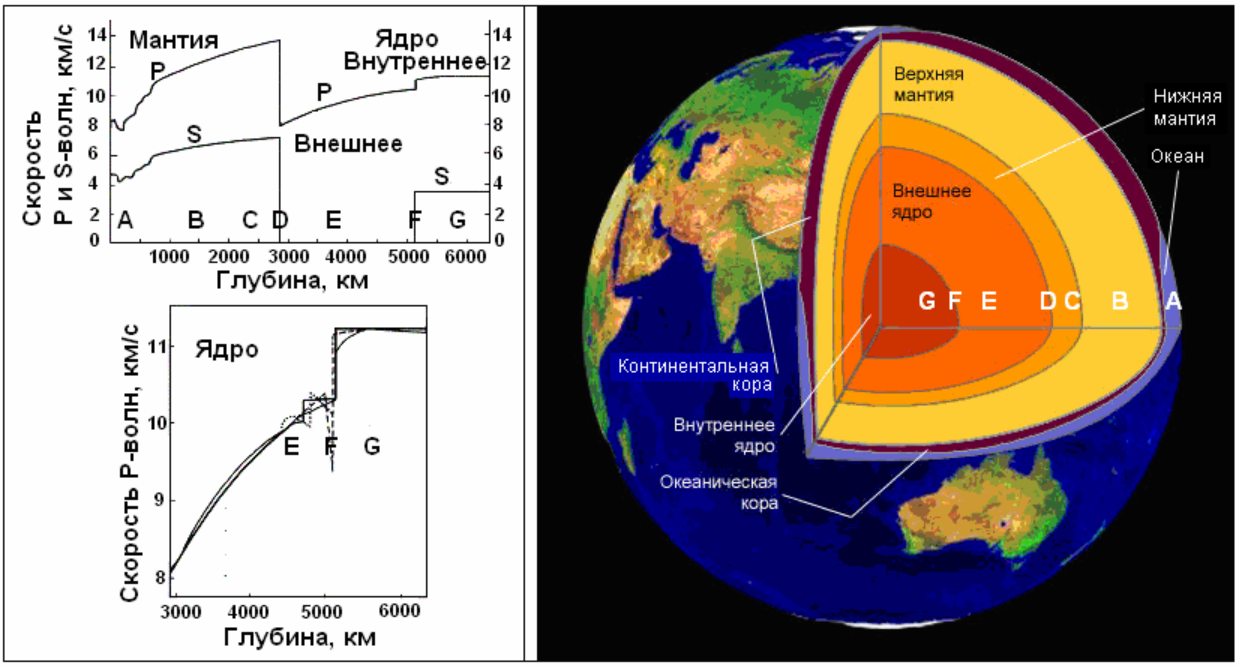


Рис. 3. Устройство Земли (распределение скоростей сейсмических волн) по данным сейсмологии.

Считается, что 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. Названы они так по аналогии с железным магнитом, у которого силовые линии выходят из «северного полюса» и «входят» – в «южный», хотя принято считать магнитный 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 20-30 раз меньше земного.

Земля вращается, причем на ранних этапах эволюции она вращалась быстрее. 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 её 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.

Эти вопросы мы рассмотрим ниже, а пока обратимся к истории представлений о внутреннем устройстве Земли.

Глава 2. 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.] определил 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° Е), отстают приблизительно на 2.5 мин в сутки, в Кайенне (5° Е), 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 поверхности 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 **Инге Леманн** 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. 3). 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 ли 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 к сейсмографу 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

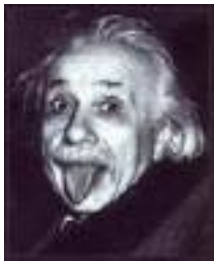
существовать другие фазовые переходы. Венгр Эдьед [1957] предложил гипотезу, отличную от гипотезы Рамзея. Он так же полагал, что Земля “состоит из трех фаз одной и той же однородной ультраосновной силикатной массы. Во внутреннем ядре структура материала подобна решетке, которая не подвержена влиянию 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 составляет, 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 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. Кэри** (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^{-15}.

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.

Надо заметить, что практически все разработчики модели расширяющейся Земли стремились “уложить” континенты один к другому таким образом, чтобы не оставалось “зазора” между ними. Среди них несколько вариантов. Один из них был предложен Гораи, другой - глобус немецкого инженера из Потсдама К. Фогеля. Это прозрачный глобус, на внешней поверхности которого были расположены современные материки, а внутри размещался еще один шар, меньшего диаметра, на котором материки занимали положения, примерно так же, как это показано Гораи.

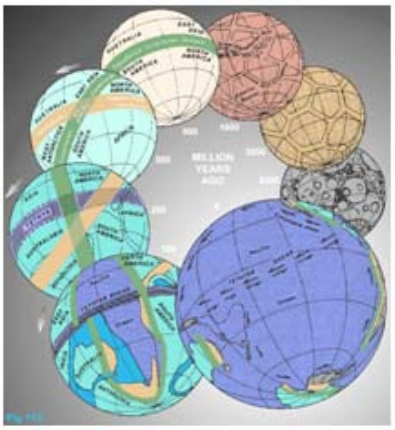


Рис. 4. Модель расширения Земли по Кэри.

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. 4 и заимствованной мной из книги Кэри. 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

.

Глава 3. Образование солнечной системы и горячей Земли.

Сравнительно недавно на страницах научного журнала появились две статьи докторов наук И. А. Резанова и Е. Л. Рускол, посвященные обсуждению вопроса о роли и влиянии на физику Земли космогонической гипотезы О.Ю.Шмидта. Оценки авторов относительно роли этой гипотезы принципиально расходятся: если И. А. Резанов приходит к твердому убеждению об её ошибочности, то Е. Л. Рускол, аспирантка О. Ю. Шмидта, придерживается противоположной точки зрения, полагая, что гипотеза Шмидта оказала огромное влияние на развитие мировой науки и не потеряла своего значения до нашего времени. Авторы, взаимно упрекая друг друга в том, что оппонент не использует данных современной астрономии, сами в этих статьях ни разу не коснулись ряда очень важных результатов, осмысление которых позволит однозначно оценить роль этой гипотезы. Это касается, например, открытия т.н. Коричневых Карликов – инфракрасных звезд, занимающих промежуточное положение по массе между Солнцем и Юпитером. Они не коснулись проблемы “What is a Planet?”, которая недавно широко обсуждалась на страницах журнала Science и в Internet и практически осталась без внимания в Российских журналах.

В научном мире принято считать, что критика оппонента должна быть по возможности конструктивной, а это означает, что, критикуя гипотезу, теорию или модель, необходимо предложить альтернативу, свободную от отмеченных критикой недостатков. В этой книге обсуждается принципиально новая модель «горячей» Земли, как альтернативная общепринятой модели холодной Земли. Модель горячей Земли находится в позиции, принципиально противоположной гипотезе Шмидта. Первая книга автора, в которой изложена модель горячей Земли, издана 30 лет назад (Кузнецов, 1984). Последующие публикации на эту тему, не меняя сути основной идеи, углубляли детали предложенной модели. Суть модели состоит в том, что вещество Земли, в момент образования в процессе самогравитации Солнца и её планетной системы, было нагрето до температуры порядка нескольких десятков тысяч градусов. Вещество при такой температуре, находится в состоянии плотной слабоионизированной плазмы. Причем, так как это газ, он может быть сжат внешним давлением до состояния, с плотностью выше, чем плотность конденсированного тела. В процессе эволюции Земля остывала: вещество, находившееся поначалу в газообразном состоянии, - конденсировалось (становилось жидким), и затем - кристаллизовалось. В результате протекания этих процессов, на Земле формировались оболочки: внутреннее ядро с первичным веществом, внешнее ядро – жидкое и мантия – в твердом состоянии. Так как плотность вещества внутреннего ядра (из которого Земля целиком состояла в момент образования) значительно выше средней плотности Земли, в процессе эволюции - она расширяется. Расширение Земли происходит циклично, вслед за циклом расширения следует цикл сжатия, расширение Земли прекратится после того, как релаксирует все вещество внутреннего ядра. При этом на Земле исчезнет её магнитное поле и существенно уменьшится величина теплового потока. Все это уже произошло, например, на Луне и Марсе.

“What is a Planet?”

Сегодня никто не сомневается в том, что Вселенная горячая и расширяющаяся. Однако еще совсем недавно эта идея широко обсуждалась специалистами. Звезды, объединенные в скопления и галактики, составляют значительную часть вещества Вселенной. Звезды, как известно, горячие, а планеты - принято считать холодными... Почему? Ведь достаточно чуть внимательнее присмотреться к особенностям строения Солнечной системы и сравнить ее с системами Юпитера, Сатурна, Урана: сразу видна их общность. Еще совсем недавно, после того, как космические аппараты «Пионер-X» и «Пионер-XI» обнаружили заметное тепловое излучение Юпитера, астрономы обсуждали вопрос: Юпитер, - это планета или звезда? Однако, тем не менее, до сих пор планеты

земной группы принято считать холодными, разогревающимися только за счет радиоактивного распада элементов. Правда, в самые последние годы появилось несколько работ, в которых их авторы допускали, что большие газообразные планеты - возможно горячие. Эти планеты до сих пор называют «горячий Юпитер».

Представим себе, что все планеты и спутники Солнечной системы образовались одновременно с Солнцем в едином процессе. Что может измениться в этом случае в нашем представлении о внутреннем устройстве планет? Возможно, новая модель позволит найти объяснение тем моментам в физике Земли, которые встречают определенные трудности в ее холодной модели? Зададимся вопросом: что же такое планеты? Оказывается, такая постановка вполне своевременна и актуальна. Данные по обнаружению планет в других звездных системах и изучению планетарных туманностей – своеобразных «колыбелей» планет, полученные с помощью телескопа Хаббла в самые последние годы в межзвездной астрономии, вполне оправдывают привлечение внимания к такому, казалось бы, весьма тривиальному вопросу. Как уже отмечалось выше, на страницах журнала Science и в Internet, в 2001 г. разыгралась дискуссия на тему: “What is a Planet?”, которая пока так и не окончилась. Это означает, что дискуссия на тему “что такое планета?” – продолжается.

Надо сказать, что «планетная» тема обсуждается учеными в течение нескольких сотен лет. В прежние годы, ещё 100 лет тому назад, ответ на этот вопрос был бы однозначен: Земля? - конечно горячая. Декарт, например, считал, что в центре Земли находится солнечное горячее вещество. Разделяли эту точку зрения Кант, Лаплас, Ломоносов и многие другие. Однако по мере накопления экспериментальных фактов, взгляд на внутреннее устройство Земли менялся. Например, не находил решения такой вопрос. Если Земля была горячей, и её мантия в момент образования находилась в расплавленном состоянии, а время её эволюции τ не превышало 5 млрд. лет (~10^{17} с), то мантия, толщина которой около 3 тысяч км, не могла полностью кристаллизоваться на всю свою толщину. По этой, и ряду подобных причин, предпочтение было отдано холодной модели. Заметную роль в этом сыграла космогоническая гипотеза Шмидта. Однако ученые явно поторопились. В модели холодной Земли несоответствий её наблюдаемым данным значительно больше, чем те, о которых мы уже упоминали. Рассмотрим некоторые из них.

Скорость роста планеты, согласно теории Шмидтда – Сафронова, определяет время образования Земли около 10^8 лет, и «это значение широко использовалось в литературе. Однако, согласно этой теории, время аккреции Урана и Нептуна оказывается порядка 10^{11} лет, т.е. более чем в 10 раз больше возраста Солнечной системы. Попытки обойти эти трудности, - неубедительны». Для того чтобы получить этот результат (10^8 лет), О.Ю.Шмидтом написана соответствующая формула, подобраны размеры протопланетного диска и плотность его вещества. Уяснить смысл этих оценок можно очень легко, если привести простой расчет, согласно которому оказывается, что время в 100 млн. лет необходимо для того, чтобы тепло, выделившееся за счет гравитационной энергии Земли может быть «сброшено» излучением в космос (согласно закона Стефана-Больцмана, связывающего энергию излучения E с температурой тела T: $E = \sigma T^4$). Это принципиальный момент холодной модели: если время формирования будет меньше чем 10^8 лет, Земля оказывается горячей.

До недавнего времени никто не мог определить, каково же реальное время формирования планеты. Эта оценка была получена в самое последнее время. Однако, для того, чтобы ею воспользоваться, необходимо допустить, что механизм образования планет Солнечной системы не уникален и неповторим, а обычен во Вселенной. Иначе: все

планеты в звездных системах образуются «по одному сценарию». Мысль – достаточно очевидная.

Совсем недавно с помощью космического телескопа Хаббл были обнаружены и исследованы протопланетные туманности, из которых «вырастают» планеты. Оказалось, что туманности, в которых должны были бы находиться уже заметно «подросшие» слипшиеся пылинки (планетезимали), из которых затем, согласно модели Шмидта, образуются планеты, - в радиодиапазоне прозрачны. Это означает, что радиоизлучение с длиной волны, соизмеримой с размерами таких частиц, свободно проходит сквозь протопланетные туманности и на частицах не рассеивается. Вывод из этих наблюдений состоит в том, что таких частиц-пылинок в диске просто нет. Время существования протопланетных дисков в созвездии Орион измерено, это 100 тыс. лет, а совсем не 100 млн. лет, необходимых для образования Земли. По мнению авторов этого открытия «сырье», пригодное для «изготовления» планет, за прошедшие 100 тыс. лет, было полностью «израсходовано». В подтверждение приведем слова Г. Троопа из Боулдера (Университет Колорадо, США), получившего эти важные результаты: «если вы намерены создать планету, то вам следует поторапливаться, а то спустя первый же миллион лет от диска почти ничего не останется». Складывается впечатление, что любой планете, и Земле в том числе, остается один путь для образования. Это быстрое сжатие вещества за счет самогравитации в едином процессе образования звезды. Именно этим путем образуются и звезды, и «Коричневые Карлики» (инфракрасные звезды). По-видимому, этот путь определен и для образования планет.

Закон Тициуса-Боде.

Одна из основных закономерностей, свойственных Солнечной системе, это закон планетарных расстояний (от Солнца до планеты) Тициуса-Боде. Он записывается в виде:

$$L = 0.4 + 0.3\times 2^n.$$

Здесь L – 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. 5). Этот факт подчеркивает общность механизмов формирования планет Солнечной системы и систем спутников больших планет.

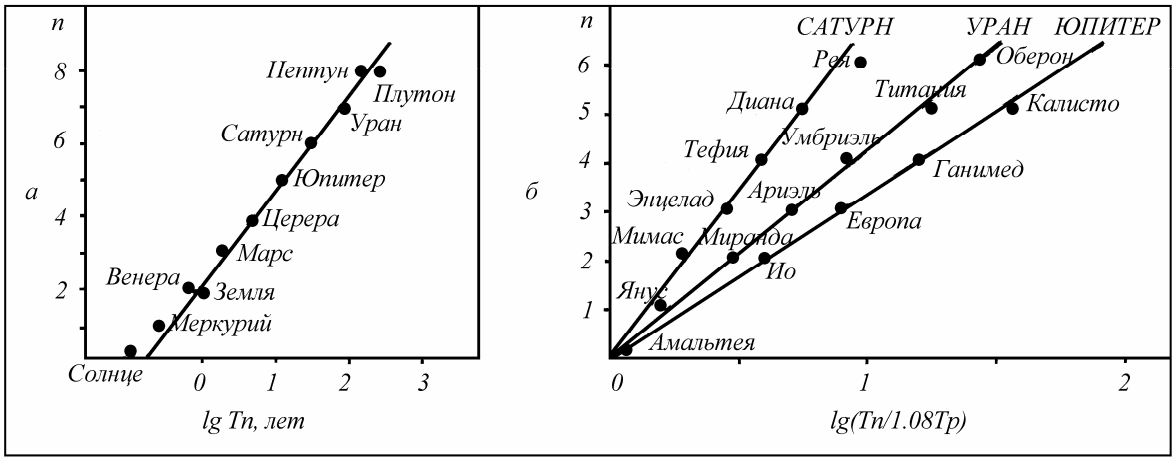


Рис. 5. Закон Тициуса-Боде для Солнечной системы (а) и систем Сатурна, Урана и Юпитера (б).

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. 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). (Подробнее о резонансных свойствах Солнечной системы можно прочитать, например, в моих книгах (Кузнецов, 1990, 2008)). 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. Рассмотрим принципиальную возможность реализации этого явления на стадии формирования планет и спутников.

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:

$$\rho = M_n/\pi(R^2_n - R^2_{n-1}).$$

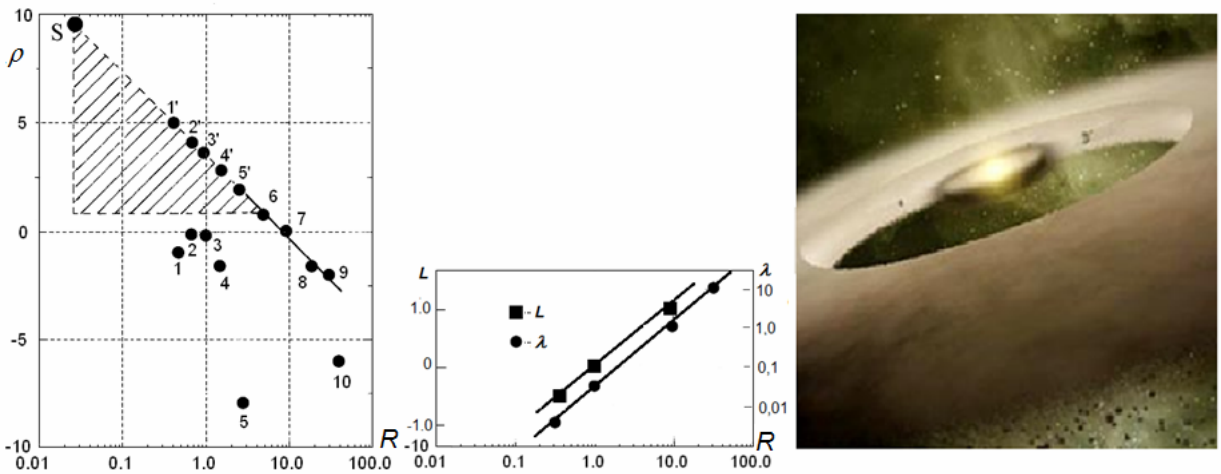


Рис. 6. Величина поверхностной плотности для планет Солнечной системы $\rho(R)$ (lg-lg). Цифры – номера планет (1 - Меркурий, 2 - Венера, 3 - Земля, 5 - пояс астероидов, 6 - Юпитер.., S –Солнце, цифры 1’. 2’. 3” – плотность планет до бифуркации). Масса заштрихованного треугольника равна массе Солнца (слева). Закон Тициуса-Боде: $L(R)$ и длины волн плотности $\lambda(R)$ (в центре). Внутренние планеты уже сформировались, хотя формирование звезды и внешних планет ещё не закончилось – результат наблюдений (справа).

На рис. 6 приведены величины поверхностной плотности для Солнца (S) и планет (1 - Меркурий, 2 - Венера, 3 - Земля и т.д. в log-log масштабе для $\rho = f(R)$. Нельзя не обратить внимания на четкую зависимость величины плотности от расстояния до Солнца, для планет Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна (6-9). 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. Предположим, что начальное распределение плотности в диске также подчинялось этому же распределению (1' – 5', 6-9). Такая ситуация существовала до начала сжатия центральной части диска, т.е. до начала образования звезды – Солнца.

Затем, в центре диска начался коллапс – сжатие протосолнечного вещества. Это явление вызвало генерацию звуковых волн, которые распространялись из центра диска к его периферии и, отражаясь от края диска, создавали структуру стоячих волн. Причем, т.к. скорость звука $c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$ обратно пропорциональна плотности вещества ($c \sim \rho^{-1/2}$), то при условии, что частота стоячих волн одинакова для данного диска, длина образующейся в диске волны λ определяется только скоростью звука и пропорциональна: $\lambda \sim \rho^{-1/2}$. В пучностях стоячих волн плотность вещества диска выше, чем в её окрестности и этот факт приводит, в конечном счёте, к тому, что вещество в пучности волны собирается в новый диск меньшего размера, чем начальный и процесс сжатия этого диска повторяется по тому же сценарию. Таким образом, диск разбивается на кольца, отстоящие друг от друга на расстоянии λ. Распределение λ. от радиуса диска показано на среднем рисунке, из которого видно, что причиной эмпирического закона Тициуса-Боде может быть характер распределения начальной плотности по радиусу диска. В каждом из сформировавшихся таким образом новых дисков начинается процесс сжатия в его центре.

После того, как в дисках стали формироваться «зародыши» планет солнечной системы, произошло событие, которое нарушило этот процесс. По мере того, как увеличивалась масса Солнца, возрастал его гравитационный потенциал. После того, как гравитационный потенциал Солнца оказался больше, чем гравитационный потенциал каждой из внутренних планет, - режим сжатия изменился. Вместо медленного сжатия центральной части диска, начался быстрый коллапс, в результате действия которого часть вещества, ранее (до коллапса) принимавшего участие в сжатии вещества в ближайших к Солнцу кольцах, «перехватывается» Солнцем и идёт уже на образование Солнца, а не планет. Это явление можно считать своеобразной бифуркацией – возникновение второго, более предпочтительного пути развития солнечной системы, чем первый. Принципиальным моментом этого механизма является то, что у ближайших к Солнцу планет сжатие уже началось. Дело в том, что если бы сжатие не началось, то при малом его количестве в планетном кольце критерий Джинса бы не выполнялся и гравитационного сжатия - вообще бы не произошло. Критерий Джинса показывает, что если вещества в заданном объеме не достаточно, - сжатия не будет.

Такой «дискриминации» со стороны Солнца подвергались ближайшие к нему пять планет. Четыре из них, как планеты - состоялись, а пятая – пояс астероидов – вообще не возникла. Область пространства, заштрихованная на рис. 6 показывает количество вещества «отнятого» Солнцем у ближайших планет. Интегрирование этого треугольника показывает некую массу, которая с хорошей точностью равна массе Солнца. Таким образом, из нашей модели следует, что в период образования Солнечной системы может возникнуть ситуация, когда ближайшие к Солнцу планеты уже сформировались, а далекие планеты – ещё находятся в фазе формирования.

Эта ситуация вполне возможна и, более того, не уникальна. Так, например, произошло с одной из наиболее изученных молодых звезд в окрестностях Солнца - TW Гидрой. 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. В пространстве между звездой и диском находятся уже сформировавшиеся планеты (рис. 6, справа). Возраст звезды не превышает 10 млн. лет.

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. Отметим, что время их формирования значительно меньше (в 1000 раз!), чем это следует из принятой модели формирования планет. *Этот результат не находит объяснения.*

Глава 4. Модель горячей Земли.

Оценка температуры.

Оценим температуру горячей Земли. Гравитационная энергия Земли $E = 3/5\ GM^2/R$ (G- гравитационная постоянная, M - масса, а R - радиус Земли, множитель 3/5 возникает за счет теоремы вириала) равна $E = 2.25\ 10^{39}$ эрг. Если эту энергию поделить на M и приемлемую величину теплоемкости вещества Земли ($c_p = 0.3$ кал/г·град., как известно, c_p конденсированного тела $\approx 3\ R_g$, где R_g - газовая постоянная), то оказывается, что температура земного вещества может достичь очень большого значения: $T \approx 30\ 000$ К. Геофизики не знают, как можно воспользоваться этой оценкой, т.к. такая температура представляется им абсолютно нелепой. Академик В.А.Магницкий в своей книге пишет, что «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», т.е. температура планеты определяется скоростью её роста. В такой ситуации для геофизиков остался лишь один путь - развитие модели «холодной» Земли. В этом случае, как мы отмечали, для «изготовления» Земли необходимо примерно 10^8 лет, чтобы образующееся в этом процессе тепло успевало отводиться радиационным способом, через излучение.

Рассмотрим, к чему приведет “сценарий” образования горячей Земли и планет. Как мы отмечали, температура вещества Земли окажется порядка нескольких десятков тысяч градусов. Очевидно, что температура вещества планеты (звезды, спутника) определяется величиной ее массы: $T \sim E/Mc_p \sim M/Rc_p \sim M^{2/3}/c_p$. 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 в настоящее время примерно соответствует температуре вещества, находящегося в самом центре планеты. Учитывая то обстоятельство, что радиус Земли в момент е образования был меньше современного и величина теплоемкости вещества в момент образования тоже была меньше, температура явно превышала нашу оценку.

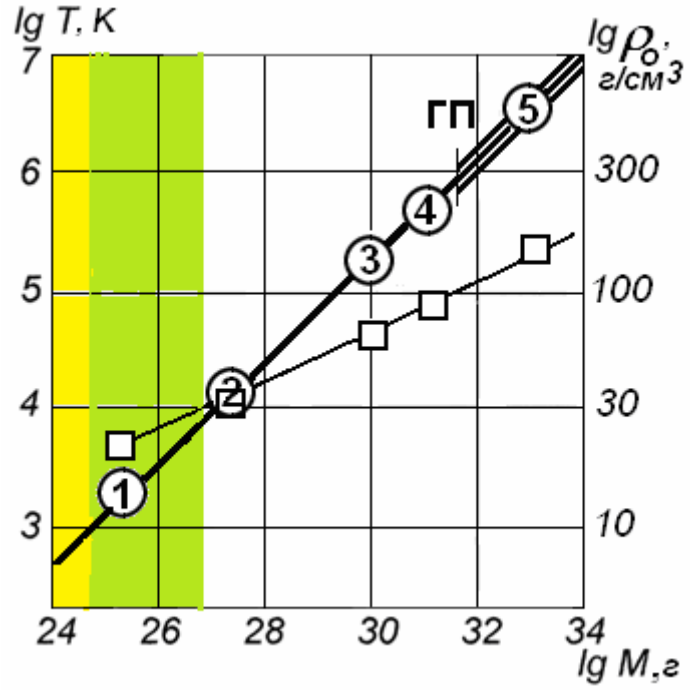


Рис. 7. Температура T образования звезд (Солнце - 5), Коричневого Карлика (4), Юпитера (3), Земли (2) и Луны (1) как функция их массы M. В верхнем правом углу зависимость светимости звезд Главной Последовательности (ГП, в отн. ед.) от их массы. Плотность центральной части тел (квадраты) в момент их образования. Три класса деления планет и спутников по массе: первый – желтый, второй – зеленый, третий - белый

Обратим внимание на зависимость: $T \sim M^{2/3}$ и предположим, что она справедлива для Луны, Земли, Юпитера, Коричневого Карлика (инфракрасной звезды) и Солнца. (При этом необходимо учитывать, что величину c_p никак нельзя считать константой: она в конденсированном теле возрастает при увеличении температуры, при его испарении, - в газе – уменьшается, и при достижении критической точки, – устремляется к нулю). Наша модель, основанная на использовании простой формулы $T \sim M^{2/3}$, демонстрирует (рис. 7) очевидную логику и стройность: все объекты (звезды, планеты и спутники) оказываются на продолжении Главной Последовательности звезд, в состав которой входит Солнце.

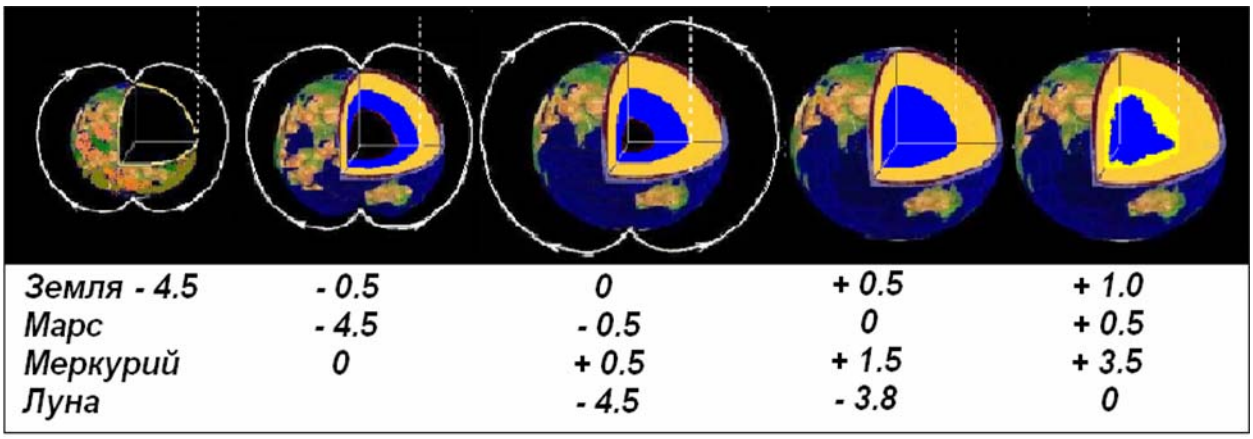


Рис. 8. Внутреннее строение Земли, Марса, Меркурия и Луны на различных этапах эволюции. Цифры – в млрд. лет от современного времени, когда возраст планеты – 0.

Очевидно, что вещество, имеющее температуру 30 000К, будет находиться в состоянии слабоионизованного газа - плазмы. Вещество планеты (звезды) будет нагреваться до такой температуры при его сжатии за счет самогравитации. Внутреннее (газокинетическое) давление вещества в процессе его сжатия, по мере увеличения его температуры, будет возрастать. Сжатие остановится в тот момент, когда газокинетическое давление (nkT) станет равным давлению (ρgR) самогравитации (в соответствии с известным критерием Джинса). Этим критерием можно пользоваться для оценки термодинамических параметров вещества Земли и планет. Сделаем одно весьма существенное для нашей модели предположение. Будем считать, что в настоящее время земное вещество в "первородном" состоянии находится во внутреннем (G по модели Буллена) ядре Земли. Это очень важное предположение. Если это действительно так, то все остальное в нашей модели является физически непротиворечивым следствием этого предположения...

Итак, мы приняли, что: $nkT = \rho gR = 3.5 \cdot 10^{12}$ 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. Отсюда следует оценка $T/\mu \approx 3 \cdot 10^3$ К, принимая T = 30 000 К, получаем $\mu \approx 10$. Величина молекулярного веса вещества Земли μ в момент её образования показывает, что в ее составе значительное место принадлежало водороду. Для примера представим, что внутреннее ядро Земли состоит из водорода и кремния. Молекулярный вес μ "молекулы", составленной из атомов кремния и водорода, будет равен примерно 10, при условии, если один атом кремния будет "окружен" двумя атомами водорода. Аналогичным образом можно представить, что ядро Земли состоит из водорода и кислорода (воды), тогда величина $\mu \approx 6$ и т. п., в пределе $\mu \geq 1$.

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 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 примерно в 1.5 – 2 раза. Наиболее интересное решение 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 его поверхности точно равна суммарной площади материков. При этом материки плотно «упаковываются» на шаре радиуса R_o. Это обстоятельство, по-видимому, можно истолковать в пользу того, что Земля имела первоначальный размер, равный размеру ее внешнего ядра, а материки занимали полностью всю ее поверхность.

Очевидно, что в этот момент на Земле ещё не было ни мантии, а ядро Земли не делилось на «твердое» и «жидкое». В процессе остывания газообразной оболочки сформировалась гранитная кора, которая в ходе дальнейшей эволюции и расширения Земли была разорвана. При этом возникли материки в их практически современном виде. В процессе формирования, когда вещество Земли находилось при температуре порядка критической, в её плотной газовой оболочке могли возникнуть флуктуации плотности «полезных» элементов – прообразы будущих месторождений. Чуть позже, когда гранитная кора уже образовалась, на её поверхности существовали условия, необходимые для образования алмазов.

Характер расширения Земли.

Процесс расширения Земли наглядно демонстрирует глобус, созданный инженером Клаусом Фогелем из Потсдама (Германия). Автор расположил материки на поверхности прозрачного шара, в центре которого находился другой шар, меньшего радиуса, на котором эти же материки были плотно упакованы и составляли некоторый праматерик Пангею. Эта идея находится в очевидном противоречии с представлением Пангеи, идущим ещё от Вегенера. Легко показать несостоятельность общепринятого представления о том, что материки, которые 160 млн. лет назад были единым и целым образованием, могли принять современное расположение на шаре, радиус которого равен радиусу современной Земли. Согласно общепринятой точке зрения, Африка и Южная Америка представляли собой единый материк. С другой стороны, периметр Тихого океана никогда не был больше современного. Этот факт означает, что, не «разорвав» линии, проходящей по периметру Тихого океана, нельзя приблизить Южную Америку к Африке. Как было показано Мезервеем, топология современного расположения материков запрещает их объединение в единый материк на шаре радиусом, равным радиусу современной Земли (рис. 2). Это противоречие неразрешимо, по крайней мере, <u>модель холодной Земли решить этой задачи не может</u>.

Оценим величину T/μ из равенства: $nkT = \rho gR = 3.5 \cdot 10^{12}$ 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. К примеру, 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 (95%) вещества Земли (составляющее внешнее ядро и мантию) за время ее эволюции уже остыла (релаксировала). 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.

Итак, после образования 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 определялась кондуктивным теплопереносом, иначе, 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, увеличение толщины внешнего ядра (l) и наращивание мантии происходило очень медленно: $l \sim (\zeta t)^{1/2}$, t - время эволюции. Так продолжалось до тех пор, пока ее толщина l не стала достаточной для того, чтобы во внешнем ядре 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 $Ra > 1710$:

$$Ra = (g\,\beta\, l^3 \Delta\, \mathrm{T}) / (\nu\zeta).$$

Подстановка характерных для вещества ядра Земли величин ускорения силы тяжести g, коэффициента объемного расширения β, кинематической вязкости ν, и коэффициента температуропроводности ζ, для $\Delta T = 10^4$ К, величина $l^* \approx 300$ км.

В работе (Chandrasekchar, 1961) показано, что для больших чисел Релея (именно этот случай соответствует конвекции в ядре) произведение чисел Рейнольдса: $Re = (v_k\, l)/\nu$ и Прандтля $Pr = \nu/\zeta$ пропорционально корню квадратному из числа Релея:

$$Re \times Pr \sim Ra^{1/2}.$$

В свою очередь, число Релея $Ra \sim l^3$. 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. 9-а).

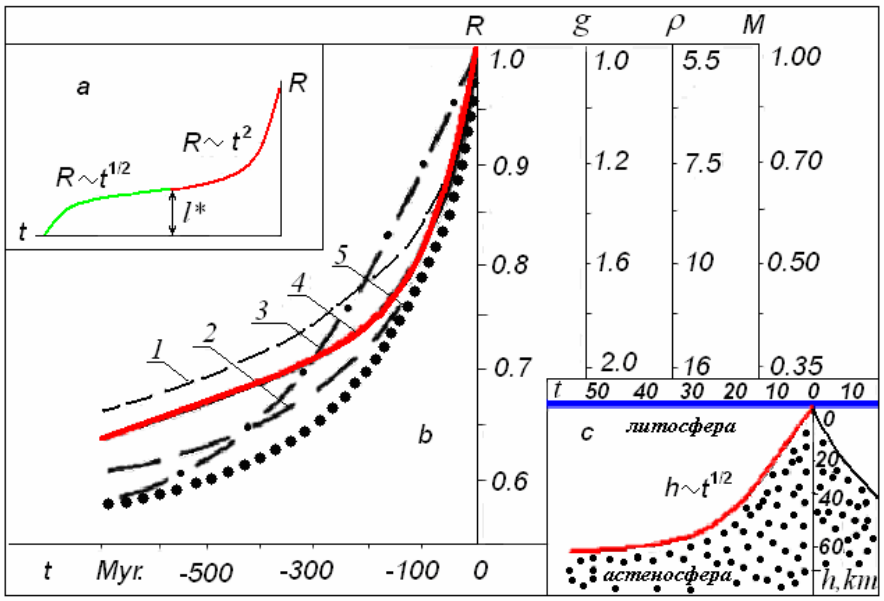


Рис. 9. Увеличение радиуса Земли R от времени её эволюции t. (a) - в течение всего периода эволюции t, за последние 500 млн. лет: - (b). Здесь $R(t)$, $g(t)$, $\rho(t)$: 1- по данным Кэри, 2 – Хильденберга, 3 – Оуэна, 4 – нашей модели. Увеличение массы океанов $M(t)$ – 5. Толщина литосферы h (км) от расстояния (t в млн. лет) до оси рифта - (c).

Можно ли найти подтверждение квадратичной зависимости увеличения радиуса Земли ($R \sim t^2$) в геологических данных? Оказывается можно, более того, эта зависимость хорошо известна. Расширение Земли на последнем этапе эволюции происходит путем разрастания океанического дна, где зависимость глубины астеносферы в зоне спрединга: $h \sim t^{1/2}$, (h – глубина астеносферы, а t – время, отсчитанное назад, от современного) подтверждена многократными наблюдениями (рис. 9-с). Функции $R(t)$ и $h(t)$ являются однозначно обратными и симметричными относительно: $R \sim t_R$, 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, показывающая изменение толщины астеносферной зоны от времени эволюции, характеризует скорость расширения Земли. Обратим внимание на то, что <u>зависимость $h \sim t^{1/2}$ модель холодной Земли объяснить не может.</u>

Эволюция параметров Земли.

Градиенты 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 известным термодинамическим тождеством: $E = pdV - TdS$. Можно считать, что первое слагаемое правой части “отвечает” за увеличение объема и расширение Земли, второе - за тепловой поток. Положим, что температура T изменяется в области фазового перехода на 10 000 К, а изменение энтропии dS порядка 1 Дж/г град. Обычно, величина $T \cdot dS \approx U$, где U - теплота фазового перехода конденсации, $U \approx 10$ -15 кДж/г. Величина теплового потока в этом случае: $Q = T \cdot dS \cdot M/t_o$, 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. В этой модели очевидно равенство теплового потока на материках и океанах. Согласно модели холодной Земли тепловой поток связан с генерацией тепла за счет распада радиоактивных элементов в земной коре, концентрация которых значительно отличается для коры континентальной и океанической. Эта проблема, так же как и другие, не находит правдоподобного решения в модели холодной Земли.

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. Цикличность эволюции Земли так же не находит объяснения в холодной модели.

По нашей модели вещество мантии образовалось при разуплотнении вещества внешнего ядра: $(R^3_З - R^3_Е)\,\rho м = (R^3_Е - R^3_G)\,\Delta\rho$, отсюда разуплотнение $\Delta\rho = \rho м\,(R^3_З - R^3_Е)/(R^3_Е - R^3_G) \approx 5\,\rho м = 20$ г/см^3. В настоящее время величина $\Delta\rho$ значительно меньше, порядка 5 г/см^3. ($\Delta\rho \approx \rho$ Земли). Дело связано с тем, что в процессе эволюции температура вещества, давление в центре Земли и, плотность вещества внутреннего ядра - заметно уменьшались.

Согласно нашей модели, начальная плотность вещества Земли могла достигать 35 г/см^3, а молекулярный вес $\mu \sim$ 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 10. На врезке рис. 10 приведены расчетные данные по плотности воды при давлении, близком 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 полученные нами по известной методике, приведены на рис. 10. Отсюда следует, что плотность окиси кремния достигает современной плотности внутреннего ядра при давлении 360 ГПа (линия 1). Как следует из нашей модели, начальное давление было в 10 – 15 раз выше современного (линия 2), в этом случае начальная плотность SiO_2 могла достигать 35 г/см^3.

Может возникнуть вопрос, насколько правдоподобна такая большая средняя плотность планеты? До недавнего времени ответа на этот вопрос не существовало. Однако совсем недавно была обнаружена планета CoRoT-Exo-3b с очень высокой плотностью. Первый результат её оценки показал величину 45 г/см^3. Окончательная оценка плотности планеты приведена в последней публикации авторов, где говорится о плотности несколько меньшей, приближающейся к 30 г/см^3. Естественно, что такой большой плотностью обладали планеты земного типа на самой ранней стадии их эволюции.

Из статистической физики известно, что давление вещества, 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.

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 $\rho_2 = 12$, а $\rho_1 = 1$ г/см^3.

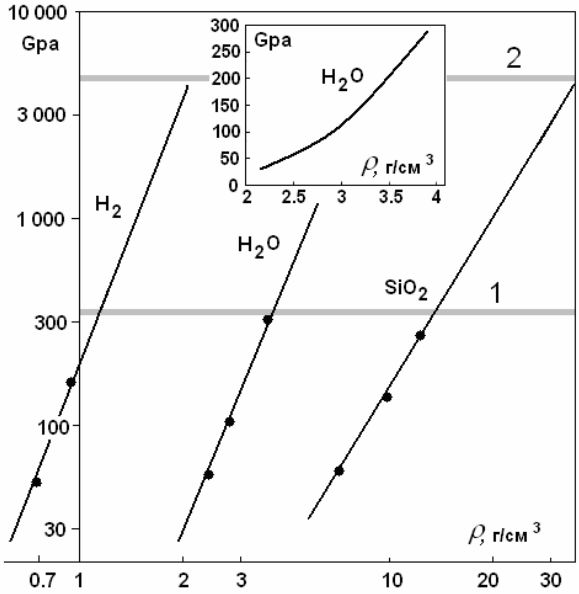


Рис. 10. Зависимость «плотность – давление» для водорода, воды и окиси кремния. Давление в центре Земли: 1 – сейчас, 2- в момент образования.

Как видно из рис. 9, общий характер зависимости: $\Delta R \sim t^2$, однако, на последнем участке кривой можно принять $\Delta R \sim t$. В течение последних 5 млн. лет, ΔR увеличился примерно на 50 км. Средняя скорость расширения Земли ≈ 1 см/год. Очевидно, что пока существует внутреннее ядро, радиус Земли ещё будет возрастать, но насколько?

Величину ΔR, на которую возрастет радиус Земли можно оценить 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 ($g = GM/R^2$).

В каком состоянии находится вещество внутреннего ядра?

Вещество во внутреннем G-ядре, согласно модели горячей Земли, находится в газообразном, плазменном – «кристаллическом» состоянии. Вещество во внешнем E-ядре - в конденсированном, жидком. В F-слое, промежуточном между внутренним и внешним ядром, сосуществуют две фазы жидкости и газа. Именно это обстоятельство объясняет, почему в этом слое скорость распространения P-волн ниже, чем во внутреннем и внешнем ядре. Незначительное повышение давления относительно давления в F-слое соответствует переходу вещества в критическое состояние. При этом свойства вещества присущи системе как единому целому, они определяются совокупностью всех частиц. В критическом состоянии сжимаемость вещества очень сильно возрастает, к бесконечности стремится коэффициент теплового расширения, а коэффициент тепловой диффузии, - к нулю. К нулю стремятся: теплота фазового перехода, производная энтропии по температуре ($\partial S/\partial T \to 0$), теплоемкость вещества ($c_p \to 0$).

Можно ли найти какие-либо доказательства того, что вещество внутреннего ядра обладает свойствами, соответствующими критической точке? Обратим внимание на характер распределения скорости звука во внутреннем ядре ($V_G \sim \partial P/\partial\rho$). Видно, что она остается практически постоянной вдоль радиуса. Если бы во внутреннем ядре находилось

кристаллическое железо, то скорость волн V_G к центру Земли возрастала бы так же, как она увеличивается во внешнем ядре ($V_G \uparrow$). Известно, что в критической точке ($\partial^2 P/\partial\rho^2 \to 0$), что соответствует постоянству скорости звука по радиусу внутреннего ядра: $V_G \to$ const.

Рассмотрим, можно ли получить полезную информацию о термодинамических величинах вещества внутреннего ядра, воспользовавшись интересным фактом, не привлекавшим ранее внимание геофизиков. Как известно, вторая космическая скорость Земли V_g = 11.2 км/с. Скорость распространения P-волны постоянна по радиусу G-ядра, и так же равна 11.2 км/с.

Приравняем квадраты этих скоростей: $V^2_g = 2GM/R = V^2_G = \gamma R_g T/\mu$. (Полагая, что скорость P-волны во внутреннем ядре можно описать как скорость звука в идеальном газе). Подставим вместо $T = 3/5\ GM/Rc_p$ и получаем: $3/5 \cdot 1/c_p \cdot (\gamma R_g/\mu) = 2$, отсюда следует: $c_p = 0.3\ (\gamma R_g/\mu)$. Принимая адиабатический множитель $\gamma = c_p/c_V \approx 1$, а молекулярный вес $\mu = 10$, величина $c_p = 0.03\ R_g$. Эта оценка означает, что c_p оказывается существенно меньше, чем c_p газа, где $c_p = 3/2R_g$, и в твердом теле, где $c_p = 3R_g$. В нашей ситуации: $c_p = 0.03\ R_g$ т.е. теплоемкость $c_p \to 0$, – как и полагается теплоемкости вещества в критическом состоянии.

Приведенные выше рассуждения подтверждают факт, что вещество внутреннего ядра находится в состоянии, близком к критическому. Однако, как было выше показано, вещество внутреннего ядра находится в состоянии кристаллической плазмы. Только в этом случае оно может обладать свойствами твердого тела. По-видимому, в этих утверждениях нет противоречий, хотя нет твердых оснований и утверждать это. Дело в том, что физика вещества, находящегося в плазменном, кристаллическом состоянии (пятом состоянии?) находится пока на самом начальном этапе исследований.

Планеты и спутники в горячей модели.

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 (рис. 7, 8).

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 $U_и$ = 15 кДж/г.

Как расширялись Луна и Марс, и сколько при этом образовалось воды?

Очевидно, что расширение Луны, Марса и других планет и спутников второго класса (рис. 7) происходило по тому же сценарию, что и расширение Земли на первом этапе её эволюции, когда $\Delta R \sim t^{1/2}$. Рассмотрим, в качестве примера, явления расширения, происходившие на Луне. Плотное газообразное вещество конденсировалось. При этом образующееся жидкое магматическое вещество нормальной плотности частично внедрялось в лунную кору в виде даек и интрузий, а частично формировало жидкую прослойку, аналогичную земному внешнему ядру. Создающееся в процессе конденсации дополнительное давление приводило к механическому растяжению и растрескиванию лунной коры, иначе, расширению радиуса Луны.

Оценим величину расширения радиуса: Удельная гравитационная энергия Луны: $e^* = 1/2\ GM/R = 1.4$ кДж/г. Как мы отмечали выше, теплоты фазового перехода (ФП): плавление, примем $U_2 = 1$ кДж/г, испарения $U_1 = 15$ кДж/г.

На испарение вещества Луны остается примерно 0.4 кДж/г, что составляет 0.4/15 = 3 % от массы Луны, а, учитывая, что необходимо использовать критерий Зельдовича 2 U_1, получаем в два раза меньшую величину 1.5 % от массы Луны. Для оценок примем 1.0 %.

Масса Луны $7.3 \cdot 10^{25}$г, следовательно, величина испарившейся массы $\Delta M \approx 7 \cdot 10^{23}$ г. При плотности вещества Луны 3.5 г/см^3, объем $\Delta V \approx 2 \cdot 10^{23}$ см^3. Поверхность Луны $S = 38 \cdot 10^6$ км^2 $\approx 4 \cdot 10^{17}$ см^2, увеличение радиуса Луны $\Delta R = \Delta V/S = 2 \cdot 10^{23} / 4 \cdot 10^{17} \approx 5$ км.

Наша модель позволяет более или менее строго ответить на вопрос «сколько воды на Луне», 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 эволюция горячей Земли связана с образованием кристаллической мантии. Именно этот процесс происходит с образованием воды мирового океана. Отношение количества воды на Земле к массе мантии равно примерно $k = 3.5 \times 10^{-4}$. 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):

$$GM^2/R = M\,U_2 + M_o\,2U_1,$$

Отсюда масса воды M_B:

$$M_B = kM/2U_1\,(GM/R - U_2)$$

Можно оценить часть вещества планеты (спутника), которая находилась в момент образования в газообразном (солнечном) состоянии (M_o). 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». Можно оценить отношение удельной гравитационной энергии спутника (планеты) к теплоте плавления. Если это число больше 1, то оставшаяся (после вычитания 1) часть показывает, сколько вещества оказалось в газообразном состоянии. Например, отношение E/U_n для Марса равно 6. Это означает, что 5 U_n гравитационной энергии Марса пошло на испарение. Теплота испарения больше, чем теплота плавления примерно в 15 раз. Значит, фактически испарилось $5U_n/U_u = 1/3$ массы Марса (2×10^{26} г). Учитывая коэффициент $k = 3.5 \times 10^{-4}$, на который необходимо умножить величину испарившейся массы планеты (M_o), 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.

Миссия GRAIL, NASA. 2012. Результаты наблюдений

В результате проведения миссии GRAIL, нацеленной на изучение гравитационного поля и внутреннего строения Луны, получена более детальная картина лунной коры, испещренной трещинами, которые заполнены застывшей магмой, образовавшейся при расширении Луны в ее далеком прошлом.

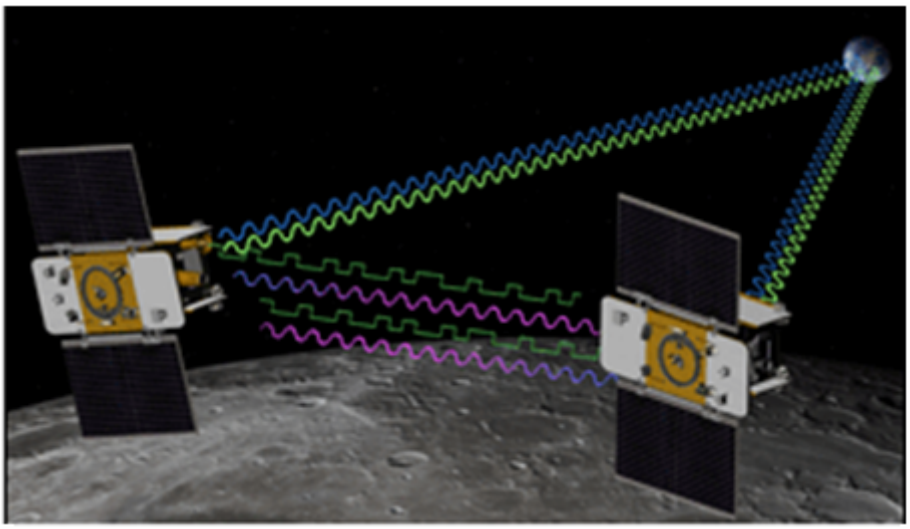


Рис. 11. Миссия GRAIL: два космических гравиметра одновременно вращаются на небольшой высоте над поверхностью Луны и передают информацию на Землю через стационарный спутник.

В миссии GRAIL эта проблема решается с помощью двух аппаратов «Отлив» и «Прилив», вращающихся вокруг Луны на близких орбитах (рис. 11). Инструменты на борту космических аппаратов измеряют изменение их высоты и расстояния между ними в то время, как они пролетают над поверхностью Луны, находясь в ее гравитационном поле, которое меняется в зависимости от свойств ее поверхности и концентрации массы под ней. Как выяснилось, на Луне наблюдаются значительные гравитационные аномалии, связанные с концентрациями массы в ее литосфере.

Авторы обнаружили, что Луна расширялась в течение первых 700 млн. лет эволюции. Оценки показали, что увеличение радиуса Луны находится в диапазоне ΔR = 0.6 **- 4.9 км** на самом раннем этапе её эволюции. В процессе выполнения миссии были обнаружены 22 линейных аномалий (магматических интрузий) общей длиной 5300 км и 44 дополнительных аномалий, общей длиной 8160 км + 46 аномалий с объединенной длиной 10 600 км обнаруженных независимым алгоритмом. Ширина внедрений изменяется в диапазоне 5 – 30 км, глубина коры (аномалии плотности) варьирует 40 – 60 км. Линейные аномалии похожи на известную Большую Дайку Зимбабве на Земле. Общая длина таких внедрений может достигать 25 тыс. км при их средней ширине порядка 20 км. Это дает суммарную поверхность линейных зон внедрения $\approx 5\cdot10^4$ км^2, что составляет ~ 0.1 % от поверхности Луны.

Таким образом, миссия GRAIL подтвердила нашу оценку максимального увеличения радиуса Луны (5 км) и период расширения – 700 млн. первых лет эволюции. Именно в этот период времени на Луне существовало магнитное поле.

Заметим, что авторы миссии GRAIL полагали, что расширение Луны на раннем этапе эволюции можно объяснить при использовании некоторых тепловых моделей. Оценим принципиальную возможность расширения Луны за счет её нагревания. Примем, что радиус Луны увеличился примерно на 3.4 км, тогда отношение $\Delta R/R = 2\cdot10^{-3}$ при $R \approx$

1700 км. Известно, что отношение объемов $\Delta V/V$ в три раза больше, чем отношение радиусов: $\Delta V/V = 6\cdot10^{-3}$. Мы ранее приняли, что Луна состоит из окиси кремния, коэффициент объемного расширения которого $\beta = \Delta V/V\cdot T = 5\cdot10^{-7}$ (K^{-1}), где T – температура.

Отсюда следует, что для увеличения радиуса Луны на 3.4 км, её вещество должно быть нагрето до температуры: $T \approx 10^4$ К, что нереально, учитывая, что гравитационная энергия Луны, деленная на величину теплоемкости, определяет среднюю начальную температуру вещества Луны в 6 раз меньшую, т.е. T порядка $1.5\cdot10^3$ К. Эта оценка означает, что Луна не могла увеличить свой радиус за счет нагрева ее вещества.

Вода на Луне.

Миссия LCROSS показала наличие льда на южном полюсе Луны. Ракета NASA Centaur весом более 2 тонн врезалась в дно кратера Кабеус в октябре 2009 года. Следом за ней был запущен зонд LCROSS. Анализы выброшенной из кратера пыли показали, что на дне картера содержится в больших количествах водяной лёд. Авторы полагают, что этот лед возник из воды занесенной на Луну кометами.

Глава 5. Геомагнитное поле.

Редкое сочинение по геомагнетизму обходится без упоминания о трактате Вильяма Гильберта, придворного врача английской королевы Елизаветы I, "О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле", увидевшем свет в 1600 году. В нем показано, что магнитное поле у Земли такое же, как у магнитного диполя, то есть наша планета представляет собой как бы большой магнит. Предваряя напутствием последнюю книгу своего знаменитого трактата, Гильберт писал: "Теперь нам следует раскрыть причины и удивительные, хотя и замеченные раньше, но необъясненные действия всего этого".

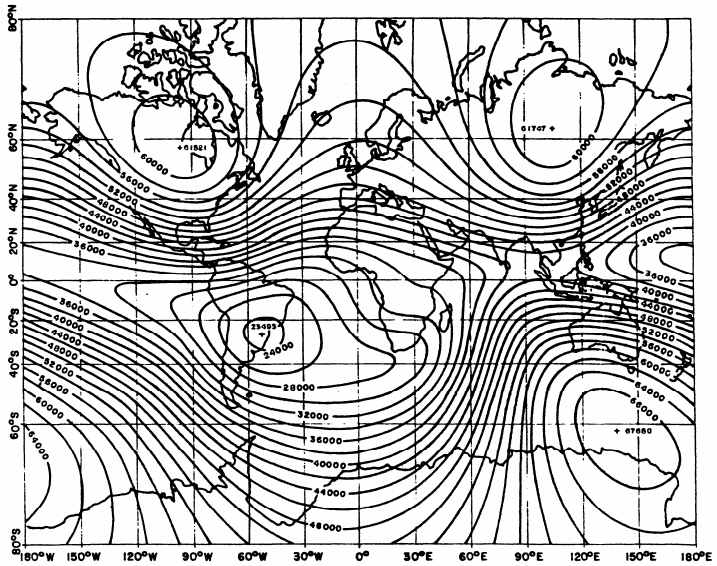


Рис. 12. Модуль интенсивности геомагнитного поля (в нТл) (Паркинсон, 1986).

Спустя 400 лет слова Гильберта по-прежнему не потеряли своей актуальности. Загадка геомагнетизма до сих пор не раскрыта и остается одной из важнейших нерешенных фундаментальных проблем геофизики.

Рис. 12 дает общее представление о морфологии геомагнитного поля. Можно видеть, что поле имеет довольно сложный характер, - это не совсем 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.

Автору представляется очевидным, что решение проблемы физики генерации магнитного поля Земли следует начать с оценки, где же в Земле происходит генерация поля, иначе, каков размер источника поля, а так же, что же снабжает этот генератор энергией? Почему магнитное поле существовало на Луне, Марсе и спутниках Юпитера и потом прекратилось? Что, «кончилось горючее»? Похоже, что на Венере магнитного поля вообще не было никогда. Почему? Попытаемся ответить на эти вопросы, но начнем с оценки размера источника.

Размер источника

В модели геодинамо, принято считать, что дипольный источник геомагнитного поля расположен во внешнем ядре, ближе к границе с мантией, или на самой границе. В геомагнетизме вопрос о местоположении источника генерации, как правило, не обсуждается, тем не менее, попытки определить размер источника (глубину его

расположения, в долях земного радиуса R), - известны. Оценить его можно на основании имеющихся данных о структуре геомагнитного поля.

Так, например, в цикле работ Олдриджа (Alldredge, Hurwitz, 1964 и др.), а так же в некоторых других работах (Peddie, Zunde) 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 $a = 0.2\ R$, где R – радиус Земли.

Размер области генерации магнитного поля Земли оценивался О. Жижимовым на основе анализа сферических коэффициентов в предположении, что разложение поля по сферическим функциям на поверхности Земли и разложение этого поля по малому параметру, - отношению размера источника к расстоянию до него, эквивалентны. При моделировании на четных и нечетных гармониках разложения геомагнитного поля, - получался один однозначный результат: глубина генерации магнитного поля оказывалась равной 0.2 R.

При оценке степени недипольности источника геомагнитного поля, исследовалась зависимость расстояний между различными виртуальными магнитными полюсами (ВМП) и точками, в которых они определялись (Кузнецов и др., 1987). Если бы все ВМП попадали в одну точку, то расстояние между ними было бы равно нулю. Это свойство дипольного источника. Если бы расстояния между парами ВМП оказались равными расстояниям между этими же парами точек их определения, то это показывало бы на отсутствие дипольного характера поля. В таком случае, ни о каком дипольном характере поля нельзя вести речь, т.к. наклон такой прямой был бы равен 45°. В действительности этот угол значительно меньше, что говорит о дипольном характере геомагнитного поля. Если расстояние L между обсерваториями, т.е. точками определения ВМП принять равным величине земного радиуса R_E, то расстояние между самими ВМП оказывается 0.2 R_E, что равняется радиусу внутреннего ядра R_G (рис. 13-*а*). Это еще раз подтверждает справедливость прежних оценок.

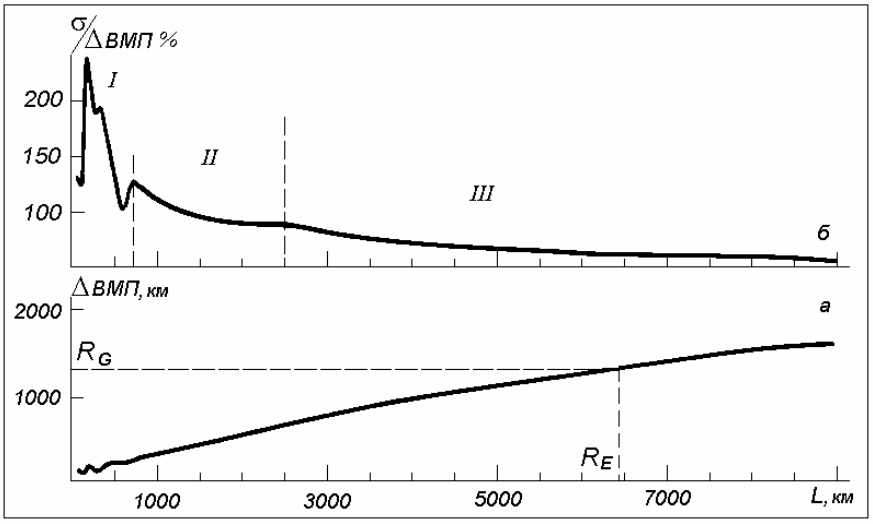


Рис. 13. Расстояние между виртуальными магнитными полюсами, определенными на обсерваториях и расстояние между этими обсерваториями L – *а*; *б* - относительное среднеквадратичное отклонение σ от среднего значения ВМП в зависимости от L.

Оценка размера источника генерации геомагнитного поля проводилось нами по доли радиуса Земли, соответствующей области источника генерации поля магнитных аномалий, а так же по геомагнитному спектру, аналогично работам (Langel, Estes, 1982; Gregori et al., 1999; Nevanlinna, 1987). Проводилось моделирование геомагнитного поля с помощью магнитных диполей и токовых контуров**.** Все методы дают однозначное

решение: главная (доминирующая) часть магнитного момента Земли создаётся в объёме, непосредственно окружающем внутреннее ядро ($R_G = 0.2\ R_E$). Наиболее оптимальное количество токовых колец дополнительных к центральному осевому диполю, оказалось равным четырем (Ботвиновский, 2000), как и четырем наблюдаемым глобальным магнитным аномалиям. Наиболее вероятная область генерации геомагнитного поля соответствует F-слою, т.е. границе внутреннего ядра.

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. Как известно, граница между внутренним (G) и внешним (E) ядром хорошо выделяется сейсмологическими методами. Граница имеет реальную толщину порядка 100 км и носит название F-слой. Рассмотрим подробнее особенности F-слоя. Существует значительная вероятность того, что генерация геомагнитного поля происходит именно в этом слое.

Модель генерации дипольного поля горячей Земли.
Скорости сейсмических волн в F-слое.

Распределение скоростей звука (P-волн) в области F-слоя, пограничного с внутренним ядром, неоднозначно, т.е. существует несколько интерпретаций, заметно различающихся между собой. В последнее время всё чаще появляются работы, в которых авторы склоняются к трактовке Джеффриса (рис. 3), 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 ($v_{ж}$):

$$v_{ж} = \frac{q\mu' pV_1}{RT\sqrt{c_{p1}T}},$$

V_1 - удельный объем первой фазы, R – газовая постоянная, μ' – молекулярный вес, q – скрытая теплота c_p - теплоемкость. Скорость звука в паре (газе) с незначительным количеством жидкости в виде капелек ($v_г$):

$$\frac{1}{v_г^2} = \frac{\mu'}{RT} - \frac{2}{q} + \frac{c_{p2}T}{q^2}.$$

Сравнивая скорости $v_{ж}$ и $v_г$ со скоростями в жидкости и газе, видим, что они действительно меньше.

Как показано в (Кутателадзе, Накоряков,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 «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. Брагинским предложен структурный фазовый переход, в возможности существования которого сомневался Лангер, в своей работе показавший, что только за счет изменения концентрации примесей достичь эффекта кристаллизации невозможно (Langer, 1980). Поэтому, общепринятый в физике Земли подход к проблеме кристаллизации внутреннего ядра из расплава внешнего, по всей видимости, - не верен.

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. 14-*б* верхняя линия (2 - σ_o) показывает область данных по геоэлектрическим разрезам нижней мантии, полученных Коломийцевой, Олдриджем, Стейси, Макдональдом, Дюкруи, и др. Несмотря на повторение многими авторами этого результата, он вызывает сомнение. Дело в том, что штриховая линия В на рис. 14-*б* ограничивает область величин электропроводности, соответствующий периодам вариаций геомагнитного поля в 11 лет. (Период смены полярности магнитного поля Солнца). По-видимому, величина электропроводности, оцененная по колебаниям поля в 11 лет - 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. 14-*б* 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.

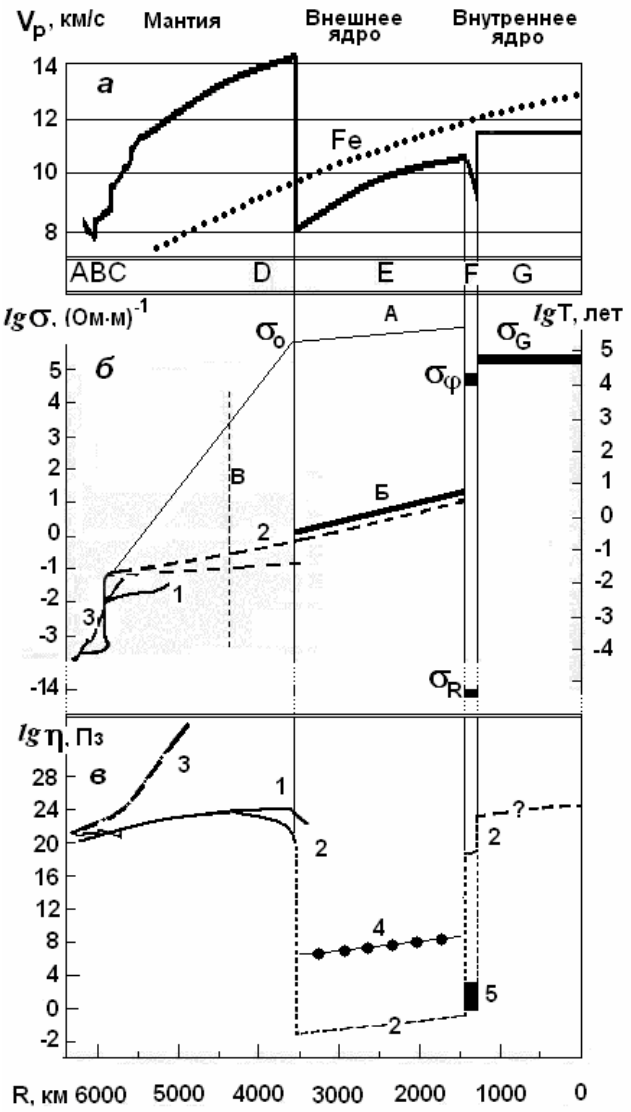


Рис. 14-*а*. Распределение скорости Р-волн в ядре и мантии Земли, и железе (Кузнецов. 2008).
Рис. 14-*б*. Изменение электропроводности Земли (σ) с глубиной, по данным геомагнитных вариаций (1), вековых вариаций (2) и ГМТЗ (3) (Ротанова, Пушков, 1982). Интерполяция кривой 3 в область высоких проводимостей σ_o, линия А – проводимость во внешнем железном ядре, скачек 2-σ_o - на границе ядро-мантия; Б - σ_o внешнего ядра, согласно нашей модели; граница 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.
Рис. 14-*в*. 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); 5 – вязкость вещества F-слоя (по модели).

Однако из практики геомагнетизма следуют совсем другие времена. Минимальный период вариаций, полученный по палеомагнитным данным, составляет примерно 100 лет. Короче период распознать не удается по техническим причинам, в основном из-за ограничения скорости осадконакопления и малой толщины образца. Джерки, - явления современного геомагнетизма происходят в течение времени не длиннее чем один год. Вероятно, эту цифру можно считать наименьшим периодом вариаций геомагнитного поля,

ей соответствует величина σ = 10 (Ом·м)$^{-1}$. Продолжение линии 2 приводит к точке, соответствующей электропроводности σ = 20-30 (Ом·м)$^{-1}$ на границе внутреннего ядра.

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 ниже, 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.

Вязкость вещества F-слоя по данным о супервращении 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 (по скорости распространения сейсмических волн), 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 значительного супервращения внутреннего ядра - не подтвердило (Кузнецов, 1997; Кузнецов, 2001).

Вязкость вещества внешнего ядра «по минимуму», $\eta \approx 10^5$ Па·с (реально, по-видимому, больше). Аналогичный результат был получен в работе (Bills, 1999), где так же оценивалась величина вязкости вещества внешнего ядра. 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. Bills 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.

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. 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.

Вязкость вещества F-слоя, находящегося при критической температуре уменьшается на несколько порядков. Это известное свойство практически всех веществ. Ранее мы назвали его сверхтекучестью, но к реальной сверхтекучести квантовых жидкостей это отношения, естественно, не имеет.

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):

$$K \approx 10^{26}\, exp(-3/lnS_{П} + ln\, S_{П}),$$

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.

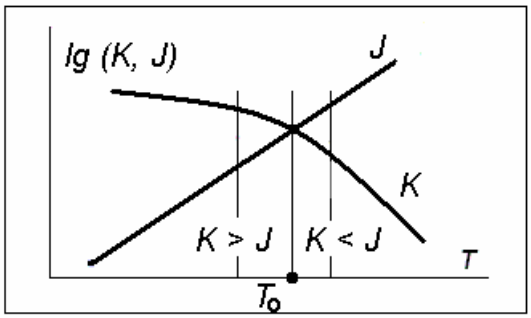


Рис. 15. Изменение *lg* скоростей конденсации (K) и испарения (J) в зависимости от температуры T.

В режиме испарения (кипения) в системе преимущественно рождаются пузыри пара, скорость образования которых:

$$J\ (с^{-1}\ см^{-3}) = 10^{37}\, exp\,(-W/kT),$$

где W - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Зависимости K и J от температуры среды T (чисто качественные) изображены на рис. 15. 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.

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. 16).

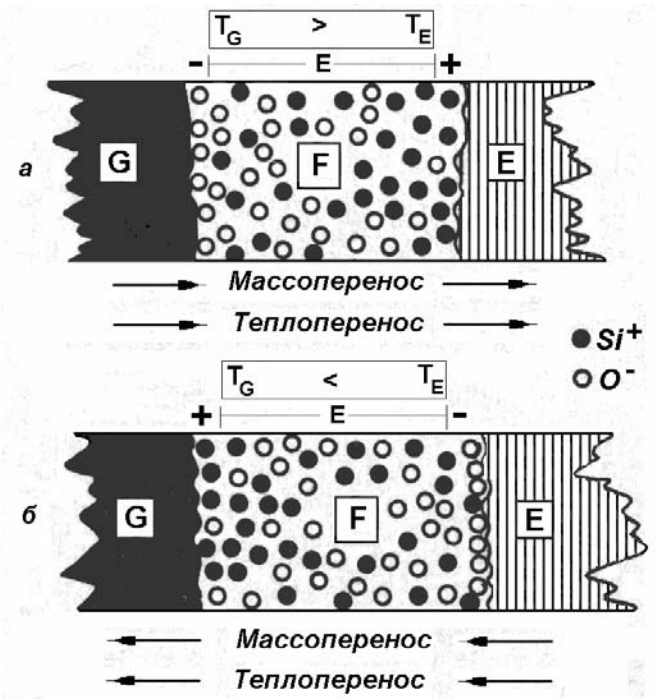


Рис. 16. Схема тепло- и массопереноса вещества в F-слое: *а* – цикл расширения ($K > J$), *б* – цикл сжатия ($J > K$).

Рассмотрим процессы, происходящие в F-слое, пограничным между «твердым» внутренним ядром и «жидким» - внешним.

По уравнению Клайперона-Клаузиуса, распределение температуры как функция давления:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{V_П - V_Ж}{U} T,$$

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 $T \approx Tкр$, $U \to 0$, а это означает возможность сколь угодно больших величин dT/dp.

Температура вещества G-ядра $T \approx (1\text{-}3)\ 10^4$ К. При такой температуре происходит частичная ионизация вещества. Оценим степень ионизации по формуле Саха для константы ионизационного равновесия k_p:

$$k_p = \frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} p \left(\frac{2\pi m}{h^2}\right)^{3/2} (kT)^{5/2} \exp\frac{e\varphi}{kT},$$

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).

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:

$$e = e_p + T\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p,$$

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:

$$n_{10} - n'_{10} = k_T \ln\left(\frac{T'}{T}\right),$$

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 разделение зарядов 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. 17) 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.

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:

$$E_R = \Delta R N e/\varepsilon_o.$$

Подставляя известные величины, получаем: $E_R = 10^{-3} N$. Примем: $E_R \leq 10^8$ В/м, что позволяет оценить величину $N \leq 10^{11}$ м$^{-3}$ ($N = 10^3 E_R$), что значительно ниже, чем полученная нами оценка ($N \approx 10^{20}$ м$^{-3}$). Это означает, что указанный нами механизм разделения вполне 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):

$$\varphi = -\int_S \tau k \, grad\left(\frac{1}{R}\right) dS.$$

Здесь: $\tau = nl$, где l – толщина слоя (расстояние между S и S'), k – направление нормали к двойному слою, R - расстояние от S до точки P. 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 $E \to 0$ (рис. 16), 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 A (рис. 17). *Электропроводность F –слоя вдоль радиуса оказывается очень малой* (как у диэлектрика): $\sigma_R \sim j_R / E_R$ (рис. 14-*б*).

Суточное вращение F-слоя и возникновение начального геомагнитного поля.

Несколько слов о том, возможно ли возникновение магнитного поля за счет суточного вращения электрических зарядов? В известной книге (Яновский, 1953) автор пишет, что эта идея «противоречит принципу относительности, ибо наблюдатель на поверхности Земли, вращаясь вместе с зарядами, остается неподвижным относительно их» (стр. 139). Возможность возникновения магнитного поля, за счет вращения электрических зарядов - была экспериментально доказана опытным путем Эйхенвальдом (1927). Автор проводил измерения магнитного поля, вызываемого вращением поляризованного диэлектрика.

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:

$$B_o = \mu I_o/R_G = 4\pi 10^{-7}\cdot 10^3/10^6 = 10^{-9}\text{Тл}.$$

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 ($\Delta R = R_F - R_G$). Величина S может оказаться несколько завышенной. Толщина токового слоя вполне может быть меньше принятой нами величины $\delta \approx 1$ км. Если это экмановский слой, то его толщина $\delta \sim (\eta/\Omega)^{1/2}$. Вязкость вещества слоя η строго оценить не представляется возможным (Ω – параметр силы Кориолиса). Величина вязкости, оцененная нами ранее, определяет толщину слоя в 1 км. В любом случае, для получения необходимой величины поля $B \approx 3\cdot 10^{-3}$ Тл, поле B_o необходимо усилить в $k_B = B/B_o > 10^7$ 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 A между внутренним G- ядром и внешним E-ядром изображены на рис. 17. Гидродинамический перенос среды F- слоя в пристеночных δ- слоях, прижатых каждый к своей стенке, текут в противоположных направлениях со скоростью V. Между этими слоями «дует» «геострофический тепловой ветер», аналогичный ветру в атмосфере. При смене полярности геомагнитного поля изменяется знак носителя заряда в δ-слоях, что приводит к смене направления токов и, соответственно, направлению вектора поля B.

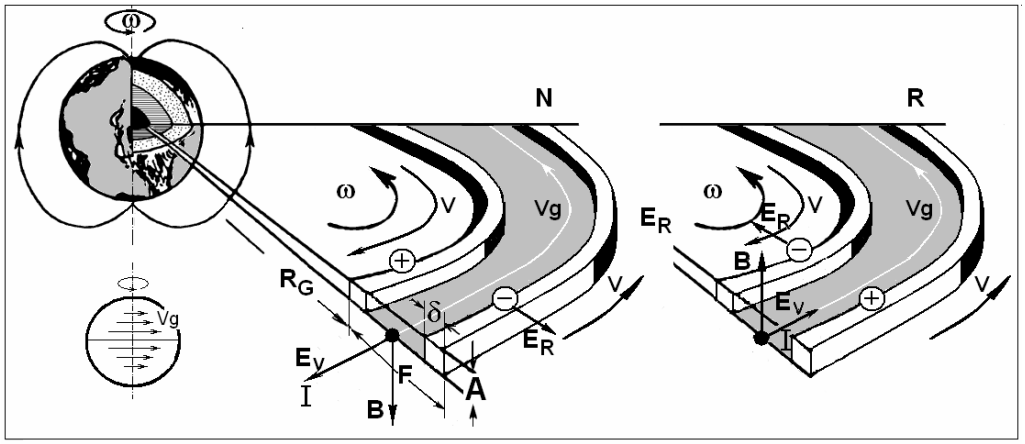


Рис. 17. Токовые системы в F-слое в случае прямой (N) и обратной (R) полярности МПЗ. Обозначения в тексте статьи.

Характерное время изменения модуля поля и эффект усиления начального поля.

Воспользуемся фундаментальным уравнением магнитной гидродинамики:

$$\partial B/\partial t = \text{rot}(\mathbf{u}\times\mathbf{B}) + \eta\nabla^2\mathbf{B} = VB/L + \nu B/L^2,$$

где $\eta = (\mu\sigma)^{-1}$ – магнитная вязкость, аналог кинематической вязкости ν. Число Рейнольдса определяет границу между ламинарностью и турбулентностью потока равно:

$$Re = LV/\nu,$$

где L и V - характерные длина и скорость потока. По аналогии, магнитное число Рейнольдса Rem можно записать в виде:

$$Rem = LV/\eta$$

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 лет (± 50 лет) $\partial B/\partial t \approx 600$ 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:

$$V = \partial B/\partial t\ (L/B),$$

тогда:

- в спокойный период: $V \approx 10^{-4}$ м/с. Магнитное число Рейнольдса, полагая, что электропроводность вещества F-слоя $\sigma = 10^4 - 10^5$, $\eta \approx 10 - 100$ 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 $Re = LV/\nu = 600\ V \approx 6$. 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. Остается выяснить, может ли существовать поток в F-слое с такими скоростями? Отметим, для сравнения, что т.н. *западный дрейф и супервращение внутреннего ядра - это гидродинамические перетоки, 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. 17).

Оценим, возможно ли усиление поля B_o за счет взаимодействия его с движением проводящей среды, скорость которой V. Запишем выражение поля B после его усиления в k раз: $B_o = \mu I_o \Delta R / R^2_G$, аналогично, $B = \mu I \Delta R / R^2_G$. Так как кроме токов, все остальные параметры не изменяются, а $I = jS$, где сечение токов также неизменны, то весь эффект усиления равен отношению $k = j/j_o$. Плотность тока вращающихся зарядов: $j_o = n_e e\omega R_F$; плотность холловского тока j получим из формулы холловского э.д.с.: $E\varphi = 1/en_e(\boldsymbol{j}\times\boldsymbol{B})$. Коэффициент усиления поля за счет холловского динамо-эффекта получается равным:

$$k = E\varphi / B_o\omega R_F \approx 10^9\ E\varphi.$$

Этот коэффициент мы оценили выше: $k_B = B/B_o \sim 10^7$ раз. Величина $E\varphi$ оказывается равной 10^{-2} В/м.

Оценим величину E_φ. Для этого можно воспользоваться тремя способами:

1. $E_\varphi = j/\sigma_\varphi = I/S\sigma_\varphi = 2.5\cdot10^8/10^9\cdot10^5 = 2.5\ 10^{-6}$ В/м;
2. $E_\varphi = P/IL = 10^{12}/10^{10}\ 6\cdot10^6 = 1.510^{-5}$ В/м;
3. $E_\varphi = VB = 10^{-2}\ 3\cdot10^{-4} = 3\cdot10^{-6}$ В/м.

Оценки показывают, что величина $E\varphi$ полученная по коэффициенту усиления оказалась у нас на 3 – 4 порядка выше, чем по другим оценкам. Дело в том, что этот коэффициент мы полагали как одноразовое (за один оборот «токового кольца») усиление поля от величины B_o до величины B. Время такого оборота $t = L/V = 20$ лет

Совпадение величин E будет вполне допустимым, если принять мощность геомагнитного поля на два порядка меньше, чем принятое во многих работах значение $P = 10^{12}$ Вт. Мы говорим здесь о мощности как о произведении тока на напряжение ($E_\varphi IL$), развиваемое в результате гидродинамического взаимодействия движущегося потока с магнитным полем, где $E_\varphi IL$ – напряжение. Вполне возможно, что кпд системы преобразования энергии Земли в магнитное поле заметно меньше 1 %.

Мощность диссипации геомагнитного поля по представлениям «классиков» геомагнетизма (Паркинсон, 1986): 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. Т.о. наша оценка не выбивается из пределов представлений «классиков» геомагнетизма.

Для сравнения, тепловая мощность Земли, оцененная по величине теплового потока, равна $4 \cdot 10^{13}$ Вт. Таким образом, на генерацию магнитного поля Земли приходится менее 0.1 % от полной энергии. Энергия запасена во внутреннем ядре и расходуется путем реализации фазового перехода первого рода, происходящего в F-слое.

Диффузия геомагнитного поля.

Для поля, изменяющегося по синусоидальному закону, время диффузии равно:

$$T = L^2\sigma\mu/2\pi \approx (36\ 10^{12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} / 2\pi \cdot 3 \cdot 10^{7})\ \sigma = 0.2\ \sigma\ (\sigma \text{ в } (\text{Ом м})^{-1}).$$

На рис. 14-*б* шкала *T* справа.

Гидродинамический перенос вещества в F-слое.

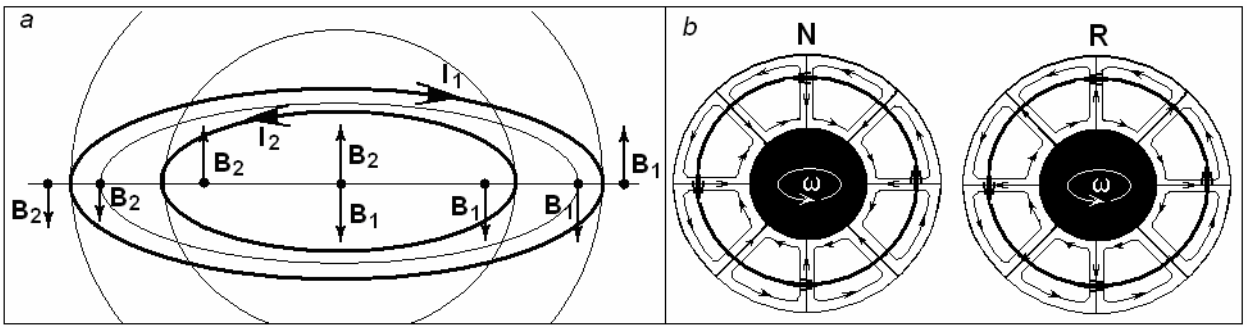


Рис. 18-a: Токи (I) и магнитные поля (B) двух коаксиальных контуров в F-слое, тонкая линия показывает положение геострофического ветра. Рис. 18-b: Структура токовых ячеек в моменты прямой и обратной полярности поля и изменения направления массопереноса. Толстая линия показывает положение геострофического ветра

Как мы отмечали выше, западный дрейф и супервращение внутреннего ядра - это гидродинамические переносы, направленные в противоположные стороны. Рис. 18-b показывает, что в F-слое, согласно нашей модели, действительно вблизи его границ с внутренним и внешним ядром существуют два переноса, направленные в различные стороны. Кроме этих потоков существует геострофический тепловой перенос. Кроме этого, как мы также отмечали выше, в этом слое происходит радиальный тепло- и массопереносы, направление которых изменяется со сменой полярности поля. Смена полярности вызывается сменой направления радиального массопереноса (рис. 17). Это приводит к смене знака электрического заряда и изменению направления токов.

Возникновение теплового (геострофического) ветра.

Как следует из модели горячей Земли (Кузнецов, 2008), в F-слое происходит ФП «испарение-конденсация». Именно в этом слое реализуется механизм генерации геомагнитного поля, 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 недипольной составляющей, так и фокусов векового хода. В нашей модели генерации геомагнитного поля используется возможная аналогия между 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 некоторые обстоятельства: 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).

Усиление поля за счет Холловского динамо.

Рассмотрим модель динамо-генерации поля в F-слое. Она, в значительной степени, повторяет известную модель ионосферного динамо (Ришбет, Гарриот, 1975), поэтому прежде отметим особенности модели ионосферного динамо.

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 в E-слое, на высоте примерно 100 км. Для любой частицы среды, на которую действует электрическое и магнитное поле, можно записать уравнение:

$$m\, dV/dt = \varepsilon \boldsymbol{E} + \varepsilon\, \boldsymbol{V} \times \boldsymbol{B} - m\nu\, (\boldsymbol{V} - \boldsymbol{U}).$$

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:

$$\boldsymbol{j} = \sigma' \cdot \boldsymbol{E}_t = \sigma' \cdot (\boldsymbol{U} \times \boldsymbol{B} - \nabla\Phi).$$

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». Природа этой струи имеет индукционный характер и обязана выполнению известного в физике правила Ленца.

Динамо F-слоя.

Принято считать, что ионосферное динамо возбуждается в проводящем слое ионосферы, во-первых, за счет ветрового переноса проводящей среды поперек магнитного поля Земли и, во-вторых, из-за тензорного характера проводимости. В нашей модели магнитное поле, - это поле Земли. Для работы динамо F-слоя, как модели генерации, необходимо начальное затравочное поле. Будем считать, что причина появления затравочного магнитного поля может быть та же, что и в первом случае, - разделение зарядов и их суточное вращение. Если мы принимаем такое условие, то очевидным становится и наличие в схеме динамо-генерации радиального электрического поля E_R. Смена его полярности должна приводить к инверсии поля. Это означает, что, в отличие от первой схемы, в пограничном слое должно меняться на противоположное направление ветра. Отсюда следует, что в генерации поля принимают участие не геострофические ветры, а другие течения, явно связанные с процессами ФП, протекающими в F-слое. Если принять эту идею, то в настоящее время на внешней поверхности F-слоя ветер имеет западное направление, т.е. среда движется на запад. Естественно, ток на внутренней поверхности F-слоя при современной полярности имеет восточное направление (как в ионосфере). Обратим внимание на аналогию: токи текут в восточном направлении вблизи поверхности, заряженной положительно (ионосфера и G-ядро), и, наоборот, в западном, - если поверхность имеет отрицательный заряд (Земля и E-ядро). Причина этого, по всей видимости, заключается в том, что при смене полярности геомагнитного поля (инверсии) меняется направление радиального массопереноса в области ФП, что при неизменном направлении вращения Земли приводит (за счет кориолисовых сил) к изменению направления горизонтального переноса. Кроме этой особенности, которая никак не скажется на процессы по первой схеме, в остальном, - обе модели идентичны.

К примеру, аналогичным образом, и в первой, и во второй модели, требуется, чтобы проводимость имела тензорный характер, а так же имелось в наличии затравочное поле. Собственно различия обеих моделей состоят только в том, что является причиной появления горизонтального поля $\boldsymbol{E}$: это либо холловское поляризационное поле, либо поле, индуцированное гидродинамическим переносом. Оценки показывают, что это величины одного порядка. По-видимому, можно считать, что обе эти схемы эквивалентны, и на современном этапе разработки модели генерации трудно отдать предпочтение какой-либо из них. Общим для двух схем генерации является наличие двух токов, текущих навстречу друг другу в тонких экмановских δ-слоях вблизи G-ядра и E-ядра. В первой модели, это холловские токи, во второй – индукционные, связанные с гидродинамическим переносом со скоростью $\boldsymbol{U}$. Вероятнее всего, что в этих схемах мы рассматриваем одну и ту же модель генерации геомагнитного поля.

Геомагнитное поле и анизотропия внутреннего ядра.

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 P-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. 17, 18). 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.

Нашу задачу можно сформулировать таким образом: Может ли цилиндрическая токовая диссипативная структура привести к локальному нагреву вещества требуемой величины. Как известно (Кузнецов, 1998), 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:

$$\Delta T/T = (2\zeta P/Q)\times R/A.$$

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.

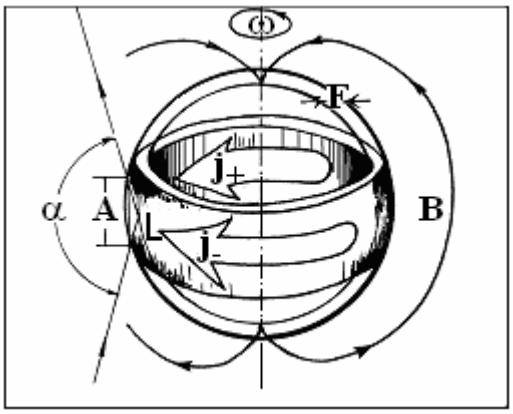


Рис. 19. Структура токов в F-слое ядра.

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. 17) 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. 19). 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 $\alpha = 150/2 = 75°$. 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.

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.

Воспользуемся данными о стандартном геомагнитном поле. Переменная часть величины H-компоненты (в микротеслах - мкТл), измеренная в плоскости экватора представлена на рис. 20-а и 20-б точками (ромбами). Среднее значение H-компоненты на экваторе составляет примерно 32 мкТл. Полученную функцию $H(\varphi)$ можно разложить на две гармоники: первую и вторую (рис. 20-а). 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 (рис. 20-а) определит в плоскости экватора смещение внутреннего круга (2), а вторая - отклонения от этого круга (2) в соответствии с величинами и фазами второй гармоники.

Обратим внимание на то, что в латеральной анизотропии внутреннего ядра, так же как и у второй гармоники H-компоненты поля, наблюдается два максимума и два минимума. Представим себе, что эта функция определяет "вторую гармонику" разложения H-компоненты "по собственным функциям". Тогда, вычитая её из $H(\varphi)$, получим некую функцию (аналог первой гармоники), которая (по нашей модели) должна была бы показать изменение круга (1), в то время как "вторая" гармоника покажет изменение формы круга (2). В этом случае нет нужды смещать круги один относительно другого даже на 20 км, как на рис. 20-а, достаточно их несколько деформировать. В результате, на

рис. 20-б мы получим сечение F-слоя в плоскости экватора, которое наилучшим образом описывает морфологию H-компоненты геомагнитного поля.

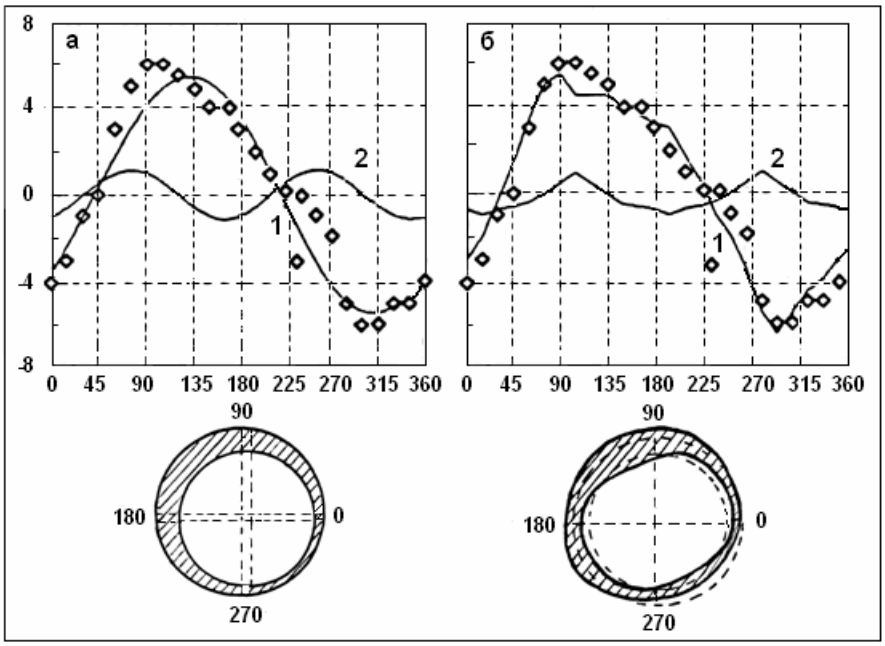


Рис. 20. Связь анизотропии внутреннего ядра и морфологии геомагнитного поля. Точки – переменная часть *H* компоненты в плоскости экватора. 1 – первая и 2 – вторая гармоники. На рис. 20-*а* - разложение по sin-функциям; 20- *б* разложение по собственным функциям. Внизу: сечение F-слоя.

Магнитные аномалии, джерки, инверсии и фокусы векового хода.

Аномалии. На карте полного вектора МПЗ (F) хорошо различимы (см. рис. 12) 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. 30).

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:

$$Ra = g\beta l^3 \Delta T/\eta\,\zeta,$$

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.

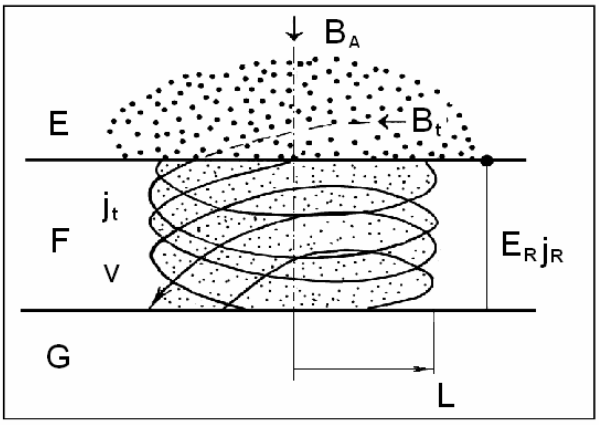


Рис. 21. Схема генерации магнитного поля глобальной аномалии как вихря Россби в тонком F-слое. Описание в тексте.

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 ($\partial B/\partial t \neq 0$).

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.21).

Эффект индукции (усиления поля) описывается в магнитной гидродинамике уравнением:

$$\partial B/\partial t = rot(\boldsymbol{v} \times B) + \eta_M \nabla^2 B.$$

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:

$$G = BL(\sigma/\rho\eta)^{1/2},$$

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.

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.22), 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 почти 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.

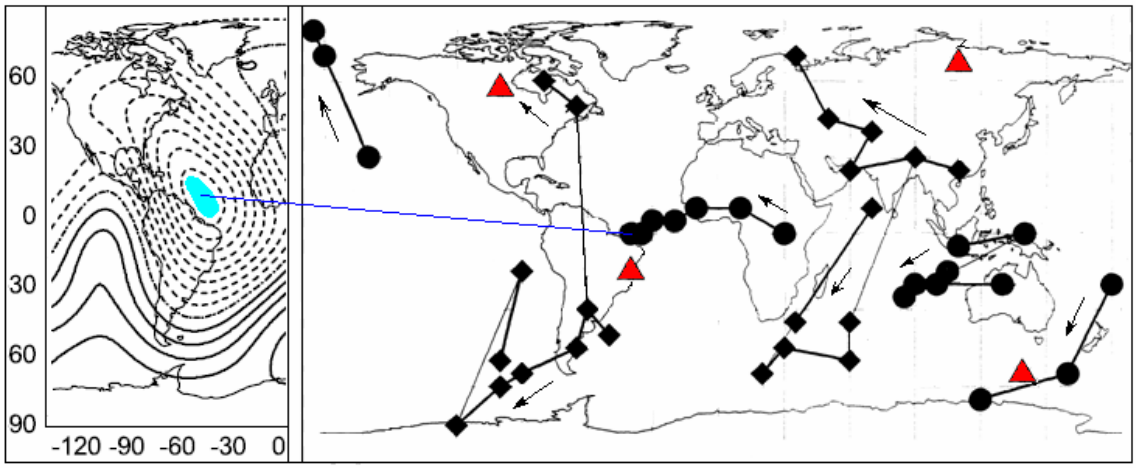


Рис. 22. Слева - фокус векового хода (ФВХ). Справа - карта дрейфа ФВХ с 1743 по 1985 г.г. Треугольники - ГМА. Номера ФВХ приведены на Схеме 1.

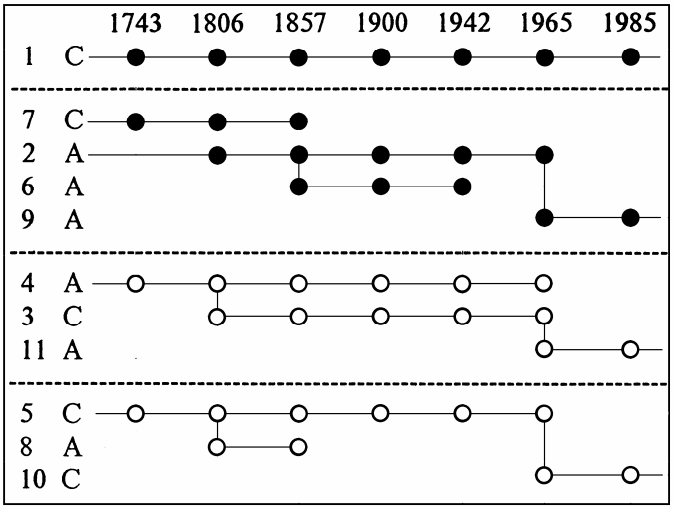


Схема 1. Эволюция фокусов векового хода. (С-циклоны; А-антициклоны).

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. Вращательное 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.

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

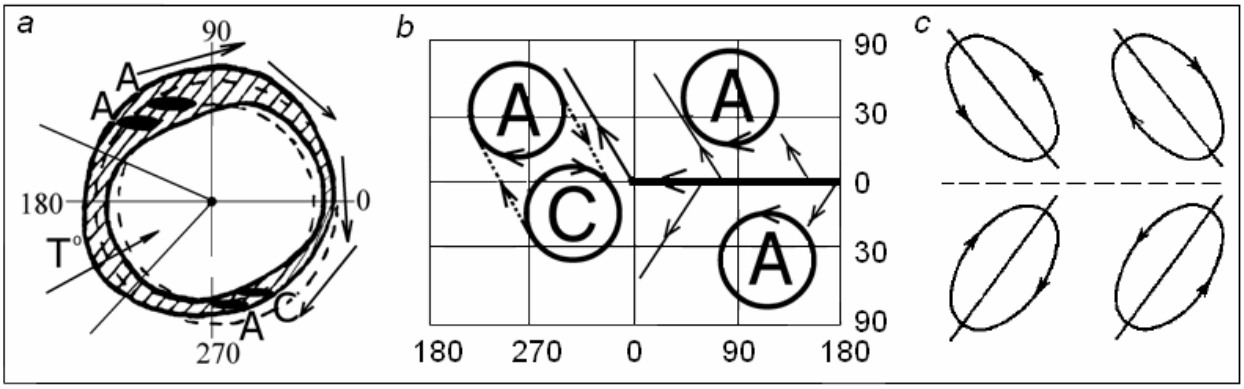


Рис. 23. Модель глобальных магнитных аномалий как циклонов и антициклонов. Проекция вихрей на F-слой, стрелками показано направление гидродинамического переноса. Стрела поперек слоя – температурный градиент. Выделенная область соответствует Тихому океану - *a*. Размещение антициклонов («А», и пара «А-С» - солитоны). Линия вдоль экватора – гидродинамический перенос, ответвления показывают направления «рингов» (ФВХ) - *b*. Вихри, образующиеся при отрицательной вязкости – *c*.

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 и рис.23).

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. 22. 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.

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, иначе, - 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.

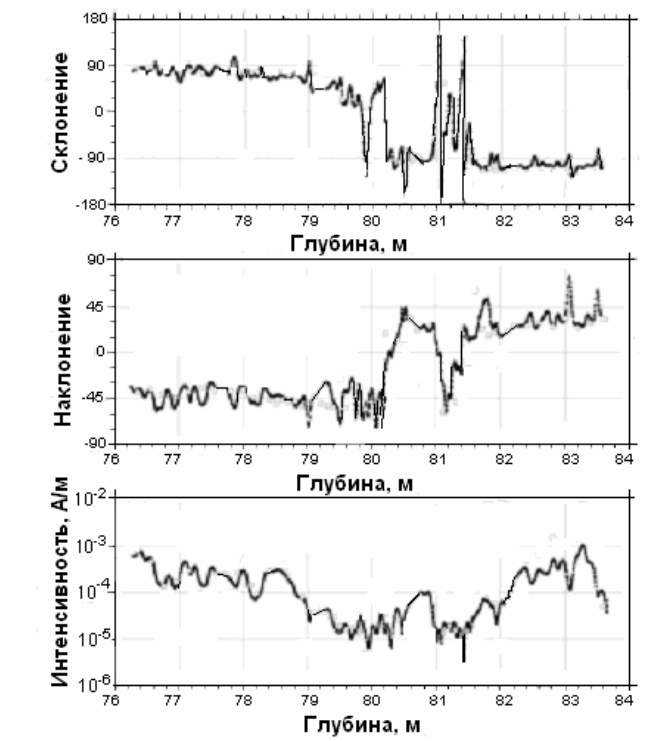


Рис. 24. Изменение параметров геомагнитного поля в период инверсии Брюнес-Матуяма: склонения, наклонения и полного модуля поля, в зависимости от глубины осадков (т.е. текущего времени) для Южной Атлантики.

Принято считать, что полное время инверсии занимает примерно 10 тыс. лет, в то время как реальное время, по-видимому, значительно меньше. Экскурсы – явления ещё более «быстрые», чем инверсии. Иллюстрацией сказанному может служить рис. 24, на котором приведены данные, полученные для инверсии Брюнес-Матуяма по палеомагнитным наблюдениям в Южной Атлантике, в непосредственной близости от берегов Африки. Средняя скорость накопления осадков в этом регионе в период инверсии составляла 10 см за 1000 лет. Весь период смены полярности Брюнес-Матуяма (788 – 795 тыс. лет) составляет 7 тыс. лет. Рис. 24 позволяет грубо оценить характерное (минимальное) время смены полярности. Это время оказывается существенно меньше 1000 лет. (Что меньше минимального времени, следующего из модели динамо, примерно в 100 раз). Все эти данные показывают, что, разрабатывая модель инверсий и экскурсов, необходимо учитывать отмеченные временные особенности этих явлений. Рис. 24, кроме этого, демонстрирует, что в момент инверсии в районе Южной Атлантики модуль поля уменьшается в значительно большее число раз (почти в 100 раз), чем в других регионах, но все же остается немалым, не равным нулю.

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.

Таблица. Инверсии и экскурсы.
(В таблице различным цветом выделены инверсии: светлый – N, серый – R).

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
	- 550	Big Lost	13
Brunhes-Matuyama 780	- 660	Delta	14
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

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 (см. Таблицу). 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. 25). 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).

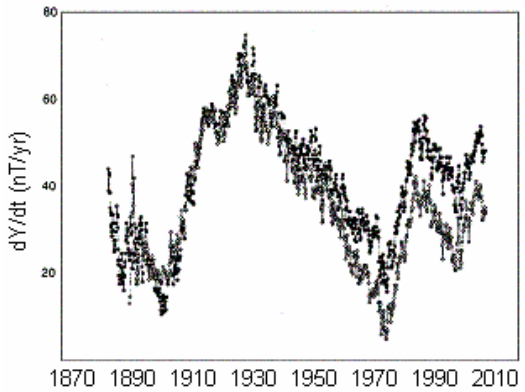


Рис. 25. Вековые вариации восточной компоненты геомагнитного поля (*dY/dt*). Резкие изменения производной по данным обсерватории Niemegk, с 1883 по 2000 гг., - джерки (Mandea et al., 2000).

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. 26). 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. 25, 26, 29). Эти

рисунки показывают, что «размах» колебаний величины производной Y-компоненты и их длительность со временем уменьшаются.

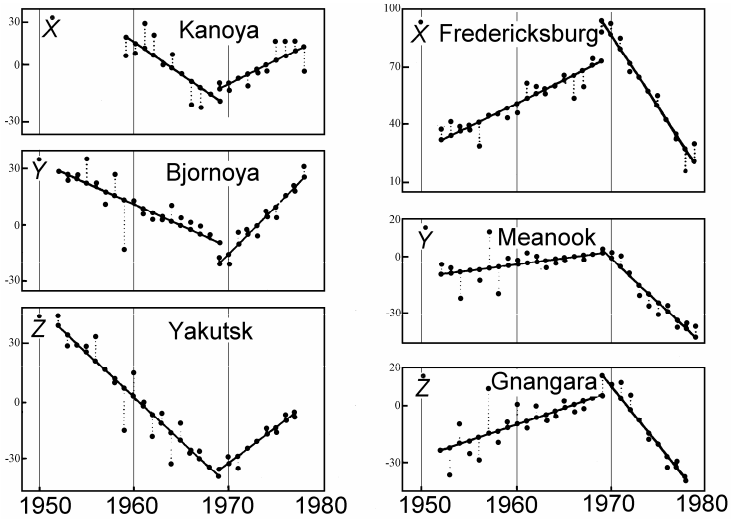


Рис. 26. Джерки 1969-70 г.г. по данным обсерваторий.

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.27). 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.

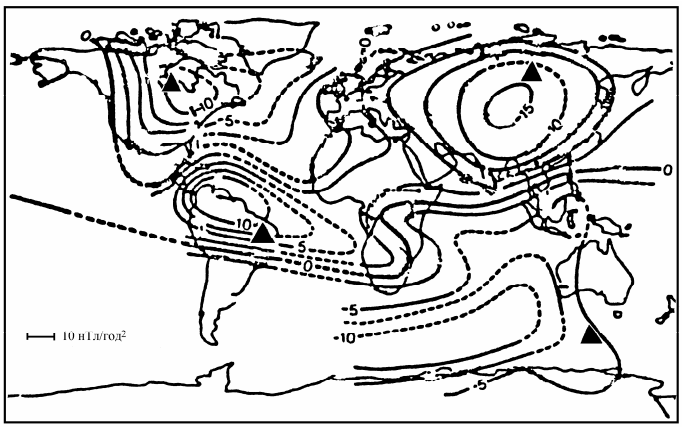


Рис. 27. Распределение интенсивностей джерка-1969. Треугольники – ГМА

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: $dT/dt \sim t^{-1/2}$.

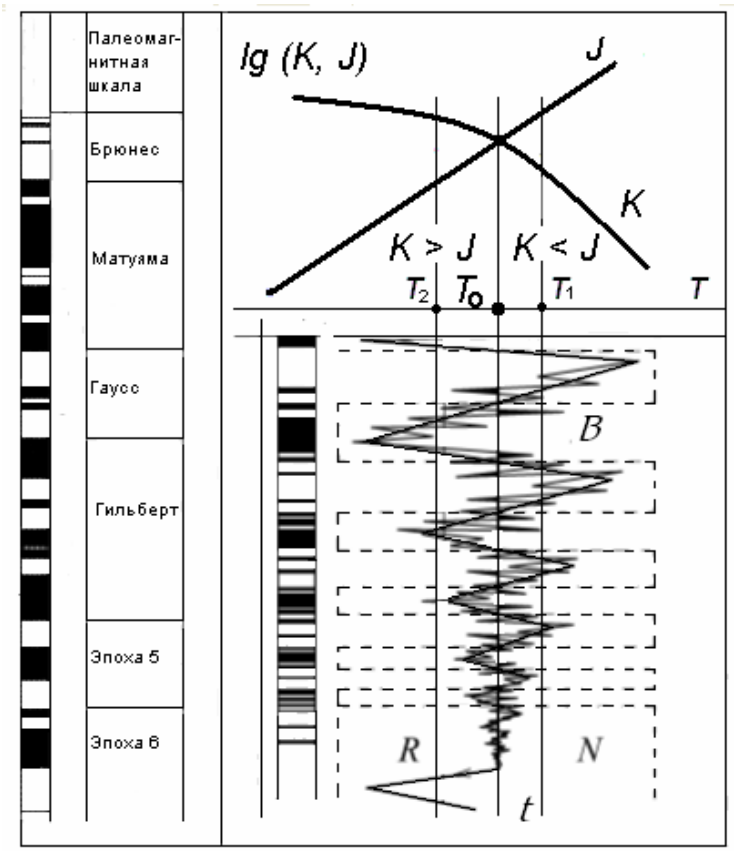


Рис. 28. Слева - палеомагнитная шкала. Справа - наша модель изменений полярности поля. Зависимость явлений, связанных с «работой» фазового перехода во времени и их отражение в геомагнитном поле.

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. 28). 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): $B^2 \sim t$.

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. 27). Становится понятной пространственная взаимосвязь джерков с ГМА.

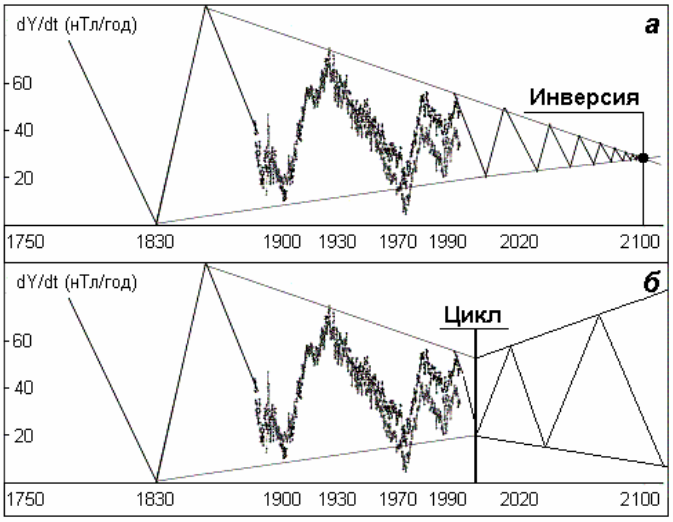


Рис. 29. Изменение частоты джерков со временем (прогноз). Выход системы на стационарное состояние и начало инверсии – а. Уменьшение частоты джерков после 2000 и цикличность – б.

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.

Дрейф северного магнитного полюса.

Модель дрейфа северного магнитного полюса (СМП) основана на развиваемой автором концепции горячей Земли и, следующей из этой концепции схемы генерации геомагнитного поля. Модель учитывает величину градиента геомагнитного поля в районе СМП (*dH/dL*) и его временную вариацию (*dH/dt*). Скорость дрейфа СМП $V = (dH/dt)/(dH/dL) = dL/dt$. Величина *dH/dL* оценивается по магнитной карте, а *dH/dt* - по данным двух полярных обсерваторий Resolute Bay (Canada) and Cape Chelyskin (Russia).

Известно, что магнитные полюса дрейфуют в момент инверсии по вполне определенным траекториям (Кузнецов, 2008). 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. 30). Обе трассы сравнительно близки к 90°-меридиану в западном и восточном полушариях. Многие работы магнитологов посвящены исследованиям направлений дрейфа ВГП, рассматриваются возможные модели дрейфа, естественно, исходя из концепции динамо механизма генерации магнитного поля Земли. 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.

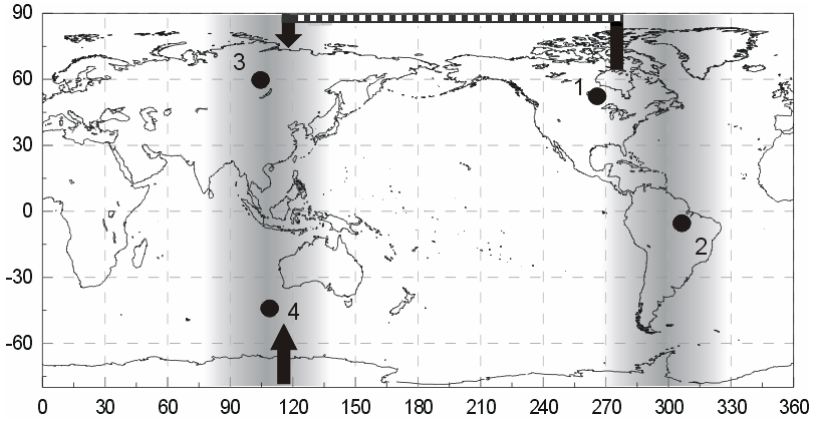


Рис. 30. «Следы» дрейфа виртуальных магнитных полюсов в моменты инверсий геомагнитного поля - полосы. Черные токи – глобальные магнитные аномалии.

Обратим внимание на то, как происходил дрейф СМП в течение последних 100 лет и, особенно, в самое последнее время. 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. 31).

Магнитные аномалии, инверсии, экскурсы, джерки и фокусы векового хода, это “особые точки” геомагнетизма, в которых это явление проявляется наиболее ярко. 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. 31). Хоуп считал, что СМП перемещается по линии, соединяющей обе аномалии. Идеи Хоупа не нашли должного внимания среди магнитологов и были забыты.

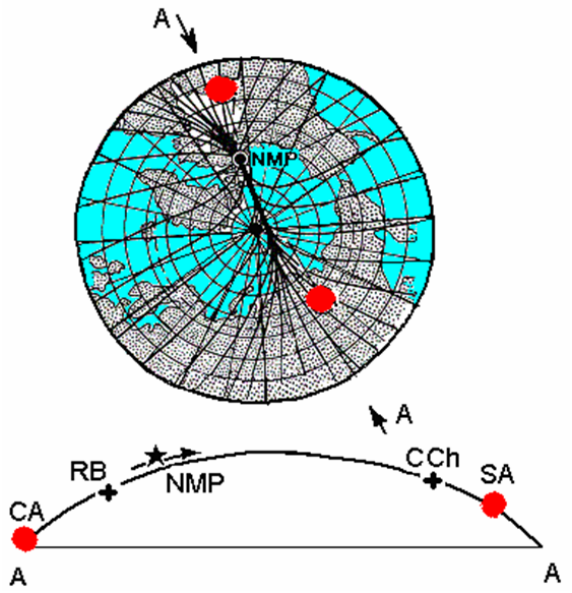


Рис. 31. Вверху: структура силовых линий геомагнитного поля. Внизу схема по АА: CA – Канадская аномалия, RB – обсерватория Resolute Bay, NMP – Северный магнитный Полюс, CCh – обсерватория Cape Chelyskin, SA – Сибирская аномалия.

Около тридцати лет тому 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, 2008). 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.

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). Очевидно, что прогнозировать дрейф магнитных полюсов можно только в том случае, если измеряемые элементы геомагнитного поля, такие как склонение и наклонение показывают определенную логичность своего «поведения».

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. 32-а). На рис. 32-а представлены сглаженные результаты наблюдений за изменениями I и D, опубликованные впервые Бауэром для Лондона (Bauer, 1895), и в последствии повторенные во многих монографиях по геомагнетизму.

Зная величины I и D, можно определить положение виртуальных магнитных полюсов (ВМП) и сравнить изменение их положения с реальным дрейфом СМП. Рисунок показывает, что виртуальный северный магнитный полюс (ВСМП) в течение 450 лет дважды изменял направление своего дрейфа: в 1580 и 1860 годах.

Анализируя результаты наблюдений склонения и наклонения в Лондоне можно получить информацию о том, как в действительности перемещался СМП в течение последних 450 лет. Сравнение скоростей дрейфа ВСМП и СМП за последние 100 лет, показывает, что их скорости дрейфа оказываются очень близкими по величине и направлению, особенно в самые последние годы. Это обстоятельство позволяет предположить, что ВСМП повторяет дрейф СМП не только в 20 веке, т.е. в годы инструментальных измерений, но и за все предыдущие 450 лет. Если бы СМП реально двигался так, как это следует из рис. 32-а, то определение местоположения СМП, сделанное Дж. Россом, оказывается ошибочным (рис. 32-b), и в действительности СМП в 1831 году находился восточнее примерно на 100 км. Обратим внимание на то, что СМП, начиная с 1580 г. и по 1860 г., дрейфовал в направлении, обратном современному, - т.е. к югу. В пользу такого предположения говорит тот факт, что в данных Лондонской обсерватории нет подтверждения наличию резкого изменения скорости дрейфа СМП в промежутке времени между измерениями Росса и Амундсена. В 1860 году какая-то причина вынудила СМП изменить направление своего дрейфа, развернуться и начать свой путь к северу. Рис. 32 -а дает возможность предположить, что СМП может «замкнуть» цикл длительностью в 560 лет примерно в 2140 году и вернуться в точку, в которой находился в 1580 г. Произойдет это, или нет, - покажут будущие наблюдения.

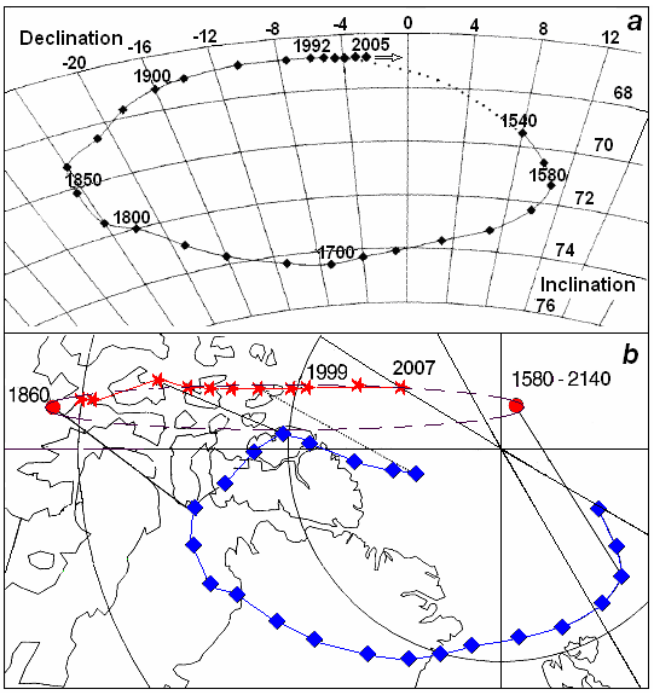


Рис. 32. *a* – изменения склонения (*D*) и наклонения (*I*) измеренные на Лондонской магнитной обсерватории [Bauer, 1895]; *b* – местоположение СМП (звезды) и виртуальные геомагнитные полюсы (ромбы), полученные по данным – *a*.

Анализируя этот рисунок, видно, что в 2000 г скорость дрейфа СМП должна быть самой большой, а в дальнейшем, – она должна уменьшаться, причем, таким образом, чтобы СМП остановился, развернулся в 2140 г и стал дрейфовать в обратном направлении. Таким образом, в течение последних 450 лет наблюдается определенная логика в характере дрейфа СМП. Так как скорость дрейфа СМП не стала уменьшаться после 2000, а, наоборот, продолжает расти, можно предположить, что характер его

движения изменился и, похоже, СМП не будет разворачиваться в обратную сторону в 2140. **Имеется ли такая же логика дрейфа СМП в пространстве?**

Представим скорость дрейфа магнитного полюса как: $V = dL/dt = (dH/dt) / (dH/dL)$, где dH/dt изменение величины среднегодовой горизонтальной компоненты геомагнитного поля в районе магнитного полюса. Для полюсов СМП и ЮМП эта величина составляет ≈ 40 нТл/год. Пространственные градиенты Н-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 формулу пространственных и временных градиентов поля H-компоненты показывает их совпадение с измеренными скоростями дрейфа магнитных полюсов. Полагая, что градиент поля dH/dL значительно не меняется в течение времени наблюдений за дрейфом полюса, для определения его местоположения - необходимо контролировать изменение dH/dt.

Суть модели прогноза положения магнитного полюса состоит именно в том, чтобы, используя особенность его дрейфа, контролировать dH/dt на ближайших к полюсу магнитных обсерваториях. Как известно СМП движется практически по прямой линии, соединяющей две обсерватории Резольют Бей (в Канаде) и Мыс Челюскин (в России), что демонстрирует рис. 33-а. 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. Анализ дрейфа СМП как пространственный, так и временной показывает стабильность дрейфа СМП: он не меняет направления, а скорость его дрейфа, в течение времени наблюдения, – возрастает.

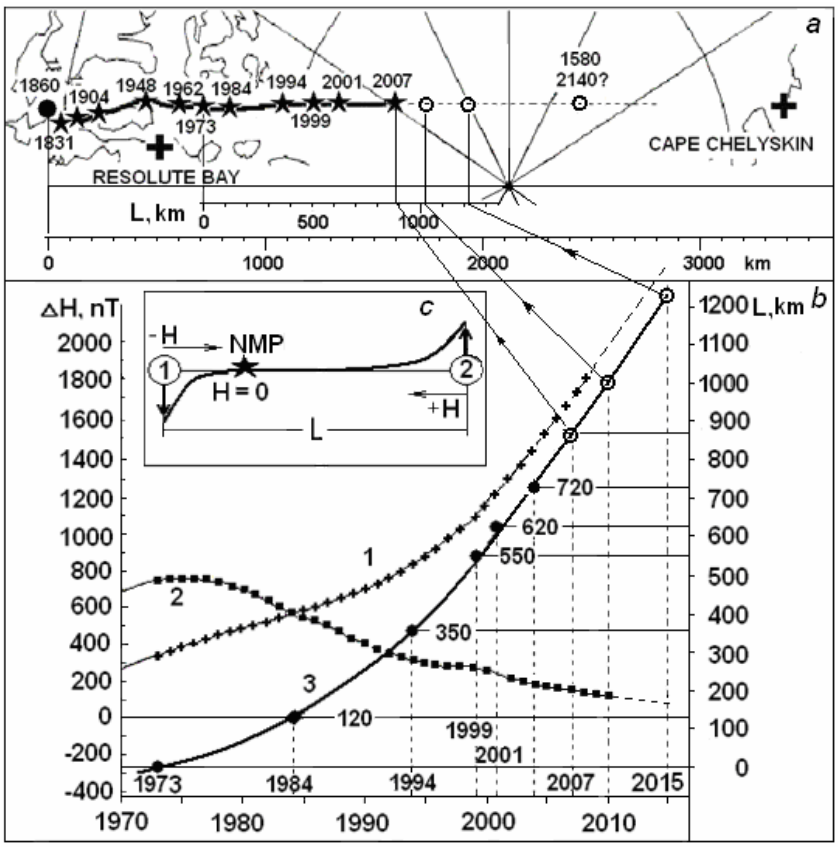


Рис. 33. *а* – Положения СМП: звездочки – измеренные, кружки – прогноз. Крестики – положения магнитных обсерваторий, *L* – расстояние (км) от точки СМП 1973;
b – ΔH вариации *H* компоненты: 1 – на станции Резольют Бей; 2 – на станции Мыс Челюскина. 3 – разность между величинами этих компонент- шкала слева (ΔH, нТл),

звездочки – положения СМП (2004 – прогноз). Шкала справа: расстояние СМП (L, км) от его местоположения в 1973 ($L = 0$);
c - схема дрейфа СМП (звездочка) между двумя источниками поля 1 и 2. – квазиисточниками H-компоненты геомагнитного поля.

Для определения координат положения СМП будем использовать эту особенность его дрейфа. Для оценки положения полюса необходимо определить расстояние $\triangle L$, на которое он может сместиться за время $\triangle t$. В течение этого времени горизонтальная компонента поля в районе СМП может измениться на величину $\triangle H$. Очевидно, что если в двух точках, расположенных на пути дрейфа СМП, по обе стороны от него, Н-компоненты магнитного поля Земли направлены навстречу друг к другу, то полюс находится в той точке, где $H = 0$ (см. вставку на рис. 33-с).

На рисунке 33-b приведены графики (1 и 2), показывающие вариации $\triangle H$ в двух обсерваториях. Вычитая из вариации $\triangle H$, определенной по данным обсерватории Резольют Бей, аналогичную вариацию, полученную на обсерватории Мыс Челюскин, - получаем кривую 3, связанную, по нашей модели, с dL/dt. Для упрощения модели принимаем, что в 1984 разность между величинами $\triangle H$ равна нулю: $\triangle H = \triangle H_1 - \triangle H_2 = 0$, и в дальнейшем будем рассматривать только переменную часть этих величин. К примеру, значения Н-компонент на обсерваториях: Резольют-Бей (1989) H_1 = 1041 нТл; Мыс Челюскин (1990) H_2 = 3160 нТл и т.д.

Ранее отмечалось, что путь, который проходит СМП $L(t)$, линейно связан с $\Delta H(t)$: $L(t) \sim \Delta H(t)$, примем: $L = 0$, для СМП-1973. Принятые предположения позволяют получить зависимость: $L(t)$(км) – кривая 3, правая вертикальная шкала на рисунке 33-b. Выбираем масштаб таким образом, чтобы отложенные на кривой 3 точки, соответствовали положениям СМП в соответствующие годы и показывали расстояние от СМП-1973, измеренное по карте, изображенной на верхней панели рисунка**.** Определим расстояние, которое должен пройти СМП к 2007, оно оказывается примерно равным 900 км. Откладываем это расстояние на карте дрейфа (верхняя панель) и определяем ориентировочные координаты СМП. Оказывается, что такой прогноз, в пределах точности, доступной для этого метода, практически совпадает с измерениями положения полюса.

Методика, используемая при предварительном прогнозе положения магнитных полюсов как северного, так и южного, проста и наглядна, но, по-видимому, недостаточно точна. Методика базируется на развиваемых автором представлениях о роли глобальных магнитных аномалий в дрейфе магнитных полюсов в периоды смены полярности геомагнитного поля (Kuznetsov, 1999). Эта методика обсуждалась в (Кузнецов, 2006) где, основываясь на данных по изменению H-компонент, полученных до 2004 года, было высказано предположение, что возможны два варианта дальнейшего дрейфа СМП: либо – замедление скорости дрейфа до нулевой и повторение цикла, либо начало инверсии или экскурса ГМП. Появление новой информации на сайтах обсерваторий Резольют Бей и Мыс Челюскин позволяют склониться ко второму варианту, что может означать начало смены полярности геомагнитного поля.

Заключение

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 во времени. Именно поэтому стабильной во времени оказывается величина радиального электрического поля E_R и, соответственно, начального B_o и усиленного, собственно, геомагнитного поля. Заметим, что проблема стабильности поля вообще не поднимается в модели геодинамо. Понятно, что речь идет о стабильности в течение выделенного этапа эволюции, а не во время всего существования геомагнитного поля.
- В нашей модели нет принципиально важной и неразрешимой проблемы динамо – источник энергии для генерации поля, это экзотермический ФП первого рода.
- Как известно, геомагнитное поле на Земле фиксируется на самых ранних этапах её эволюции, что противоречит идее динамо, согласно которой сначала на Земле должно сформироваться жидкое ядро, а уж потом - начаться динамо процесс.
- На Луне существовало дипольное магнитное поле и исчезло, на Марсе наблюдается аналогичная картина. Дипольное магнитное поле существует на Меркурии. В пользу нашей модели говорит тот факт, что, судя по средней плотности вещества Меркурия (5.4 г/см), он ещё обладает аналогом внутреннего ядра Земли и запасом высокоплотного вещества, которое обеспечивает энергией генерацию магнитного поля Меркурия. Эти факты динамо не объясняет, хотя они очевидны в нашей модели. Следуя логике модели, не представляет труда оценить, когда на Земле прекратится существование G-ядра и исчезнет геомагнитное поле, после чего жизнь на Земле - прекратится.
- Аналогичным образом находят простое и непротиворечивое объяснение существование магнитного поля на других планетах и спутниках. Возникает некоторая проблема с магнитным полем на Венере. Причина этого заключается не в недостатке модели, а в нехватке четкой информации о палеополе Венеры.
- Наша модель легко и просто, с единой позиции, объясняет такие загадочные явления как инверсии, экскурсы и джерки.

Остается не совсем ясным вопрос, каким же образом происходит на земле усиление поля B_o? Здесь мы рассмотрели два механизма. Они не противоречат друг другу. Возможно, - дополняют друг друга, возможно, что это один механизм, рассмотренный с двух различных позиций. Выяснение этого вопроса является предметом дальнейших исследований автора.

Глава 6. Геодинамика.

Термин “геодинамика” приобрел в течение последних 40 лет особую популярность в науках о Земле в связи с созданием и интенсивным внедрением в эти науки тектоники плит. 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 (атмосфера и океан). Реже, к геодинамике относят динамику ионосферы и магнитосферы.

В 6-ой главе мы рассмотрим 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. Выделим фундаментальные труды австралийского геолога профессора С.У. Кэри (Carey, 1976; Кэри, 1991).

Развиваемые в нашей книге идеи относятся к области науки, называемой геофизической гидродинамикой. В этой главе рассмотрены вопросы, 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 следующей главы, посвященной одному из крупнейших разделов физики Земли – сейсмичности и физике землетрясения.

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.

Дрейф материков в будущем.

Модель горячей расширяющейся Земли и модель генерации геомагнитного поля рассмотренные нами в предыдущих главах позволяют выяснить не только, как и почему, движутся материки по поверхности Земли, но и прогнозировать дальнейший ход её эволюции, в частности, как и насколько долго будет продолжаться на Земле этот дрейф. Как следует из нашей модели, движение материков связано с увеличением радиуса Земли, которое, в свою очередь, обязано релаксации (конденсации) вещества внутреннего ядра. В момент образования сверхплотное вещество Земли занимало весь объем внешнего ядра. В настоящее время – его радиус R_G составляет лишь одну треть, что составляет примерно 3-4% от первоначального объема.

Как следует из рис. 9-b, общий характер зависимости: $\Delta R \sim t^2$, однако, на последнем участке кривой можно принять $\Delta R \sim t$. В течение последних 5 млн. лет радиус Земли (ΔR) увеличился примерно на 50 км. Средняя скорость расширения Земли $\approx$ 1 см/год. Очевидно, что пока существует внутреннее ядро, радиус Земли ещё будет возрастать, но насколько?

Величину ΔR, на которую возрастет радиус Земли можно оценить 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 км (рис. 34). Отсюда следует неутешительная для

землян оценка: ***оставшееся время существования геомагнитного поля (и 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 ($g = GM/R^2$).

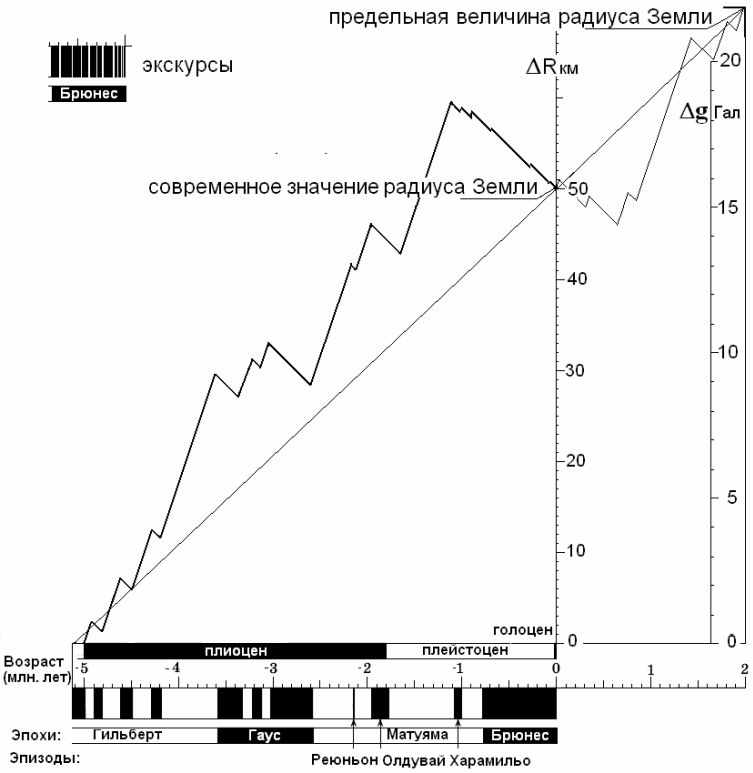


Рис. 34. Возможный (следующий из горячей модели) ход изменения радиуса Земли.

Длина экватора при этом вырастет примерно на $2\pi\Delta R$ = 120-150 км. Соответственно объем океанов возрастет, и суммарное расстояние между материками за счет действия механизма спрединга - увеличится на эту величину. Сейчас имеет смысл внимательней рассмотреть физику этого механизма и определить роль субдукции в нашей модели. Спрединг – разрастание океанического дна – явление очевидное, а отношение к субдукции – весьма спорное.

Срединг 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 тектоника плит ответов - не находит. Рассмотрим, может ли ответить на них наша модель горячей Земли.

Высота геоида. Первая информация по дрейфу материков, направлению и величине скорости дрейфа была опубликована в начале 80-х после обработки данных по длиннобазовой радиоинтерферометрии (РСДБ). Суть метода состоит в том, что в единую сеть включаются радиотелескопы, установленные на различных материках. Все они одновременно наблюдают заранее выбранный квазар (квазирадиоисточник – вращающаяся звезда). Наблюдение ведется в течение нескольких лет и сводится к точной привязке местоположения антенны радиотелескопа. Затем оценивается изменение расстояния между антеннами и вычисляется направление и скорость относительного движения. После первой публикации данных по векторам скоростей дрейфа материков, я нанес эти данные на карту геоида и обнаружил, что вектора скоростей неплохо совпадают с градиентом геоида.

Геоид (буквально - вид Земли) - выпуклая замкнутая поверхность, совпадающая с поверхностью воды в морях и океанах в спокойном состоянии и перпендикулярная к направлению силы тяжести в любой ее точке и продолженная под материками.

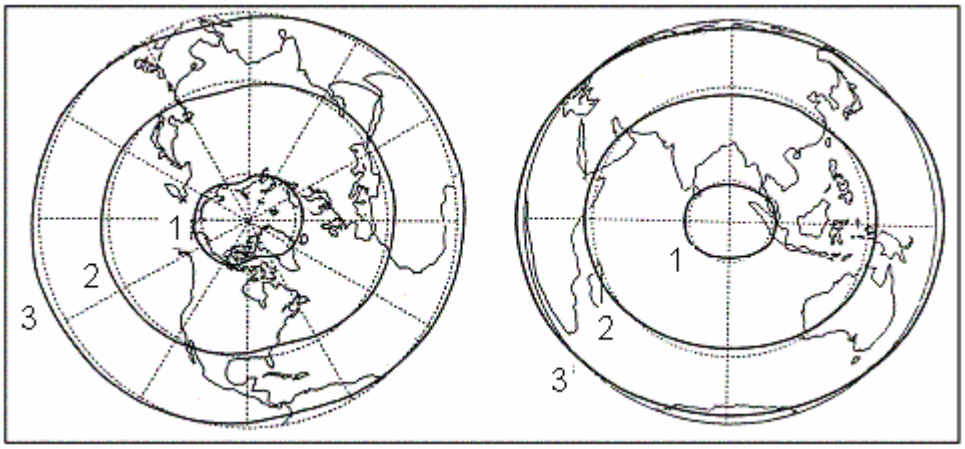


Рис. 35. Высота геоида (3), особенности акустических свойств мантии (2) и внутреннего ядра (1), полученные при анализе splitting-функций собственных колебаний для двух поперечных сечений Земли.

Построим распределение высот геоида по данным (Lewis, Smith, 1998) и сравним его со структурой внутреннего ядра и мантии, полученной по результатам интерпретации данных по анизотропии сейсмических свойств мантии и внутреннего ядра (Giardini, 1988; Кузнецов, 1997). На рис. 35 показано сечение свойств Земли по экватору: анизотропии внутреннего ядра (1), анизотропии мантии (2) и высоты геоида (3), и те же данные, для “среза” по меридиану. Здесь, в качестве положительных отклонений от круга, приняты:

понижение скоростей P-волн и уменьшение величины плотности, - для внутреннего ядра и мантии, и увеличение высоты геоида. Можно наблюдать очевидную асимметрию структуры Земли, как пространственную корреляцию свойств внутреннего ядра, мантии и высоты геоида.

Обратим внимание на форму геоида. Авторы (Lewis, Smith, 1998) выделяют два четко выраженных максимума высоты, приходящихся примерно на экватор, нулевой, и 180-ый градусы долготы. Максимумы соответствуют Тихоокеаническому поднятию и зоне спрединга в Атлантическом океане. Можно выделить два минимума, один южнее острова Цейлон (90° E) и другой, менее выразительный, в области 300 ° E (в Бразилии). Полюса, как северный, так и южный, попадают в область отрицательных высот геоида. Особенности геоида отражены на рисунке 35, где наибольший диаметр (3) показывает сечение высот геоида по экватору (слева) и по 0-180° меридиану (справа). Масштаб отклонения высот (максимальное превышение 100 м) увеличен для наглядности и не соответствует размерам Земли, изображенной на рисунке. Здесь же показаны аналогичные сечения Земли, построенные по данным splitting-функций для внутреннего ядра (внутренний круг - 1) и мантии (средний круг - 2).

Отклонения высоты геоида относительно земного радиуса составляют $\approx 2\times10^{-5}$. Вариации параметров скоростей и плотностей во внутреннем ядре и мантии, полученные по splitting-функциям, составляют не более ± 0.2 %. Для сравнения с геоидом, выразим эти вариации в расстояниях, под которыми будем понимать вариации радиуса соответствующей оболочки от некоторого среднего значения. Используем для этого известные значения градиентов скорости dv_p/dR в области вариаций splitting-функций. Изменение значений splitting-функций на 0.2 %, при градиенте скорости dv_p/dR = 1 км/с / 100 км и величине скорости $v_p \approx 10$ км/с эквивалентно расстоянию ΔR = 2 км или $\approx 3\times10^{-4}$. По-видимому, это может говорить о том, что степень стратификации Земли, её ядра и мантии, составляет примерно 0.2 %, в то время как геоид «уравновешен» со значительно лучшей точностью. Этот факт свидетельствует о том, что в минимизации высоты геоида и гравитационной энергии принимает участие только самая верхняя часть литосферы, возможно, только земная кора.

Причина именно такого строения Земли, в рамках нашей модели, заключается в том, что фазовый переход, который происходит на границе внутреннего ядра, наиболее интенсивен в областях раскрытия океанов: Тихого (120° E - 255° E) и Атлантического (315° E - 15° E). Именно в этих областях интенсивного фазового перехода происходит разуплотнение вещества внутреннего ядра и должно наблюдаться уменьшение плотности и скорости P-волн, т.к. известно, что на границе G-ядра скорость этих волн резко понижается. Это разуплотнение наблюдается и в мантии. По-видимому, именно оно приводит к увеличению высоты геоида, которая (как положительная, так и отрицательная), в соответствии с принципом минимизации гравитационной энергии, должна уменьшаться в процессе эволюции Земли. Возможно, именно реализация этого принципа в процессе эволюции и саморазвития, приводит к тому, что наибольшая сейсмичность Земли наблюдается в областях, близких к нулевым высотам геоида, где происходит его выравнивание. Именно здесь находятся зоны столкновений, коллизии, или, иначе, зоны субдукции.

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 разделе 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 36-а).

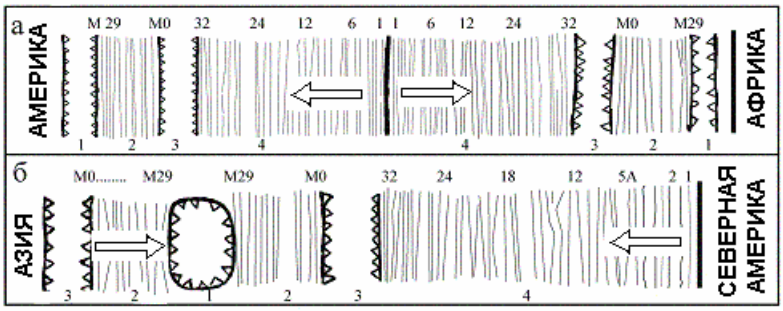


Рис. 36. Структура спрединга Атлантического (а) и Тихого океана (б) по данным полосовых магнитных аномалиях, где выделяются зоны: 1 – юрского суперхрона; 2 – мезозойских аномалий; 3 – мелового суперхрона; 4 - «современных» аномалий. Стрелки показывают направление дрейфа.

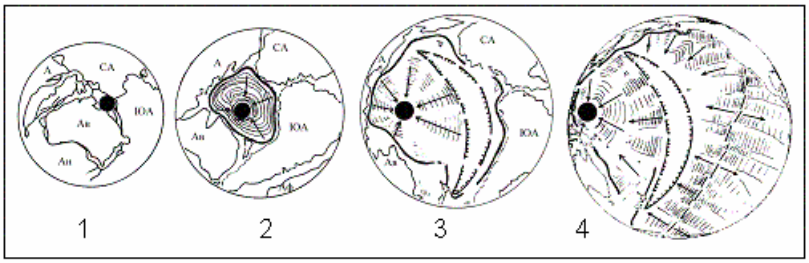


Рис. 37. Фазы спрединга Тихого океана: 1 – 200 млн. лет назад; 2 – 120; 3 – 80 млн. лет назад; 4 – настоящее время. Черный круг – юрский суперплюм, «полумесяц» – меловой суперплюм; жирная линия – желоба; стрелками показано направление спрединга.

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 - зона мелового суперхрона (в виде «полумесяца») и, наконец, зона инверсий “последних” 80 млн. лет (см. рис 36-б и 37). Рисунок 37 дает представление о возможном пути формирования дна Тихого океана. Исходная ситуация 37-1 соответствует началу расширения Земли, росту мантии, разрастания океанов и образования юрской зоны “свободного поля” (ориентировочно 300 - 200 млн. лет тому назад).

Второй этап (рис. 37-2) эволюции связан с мезозойскими инверсиями (160 - 110 млн. лет). Третий (рис. 37-3) - с возникновением мелового суперплюма-суперхрона (110 - 80 млн. лет) и, наконец, последний рисунок (рис. 37-4) показывает современную ситуацию. Складывается впечатление, что спрединнг в восточной части Тихого океана, на начальном этапе (рис. 37-1) 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.

Обратим внимание на характер спрединга, связывающий 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 спрединга, 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 изучения. 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.

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.

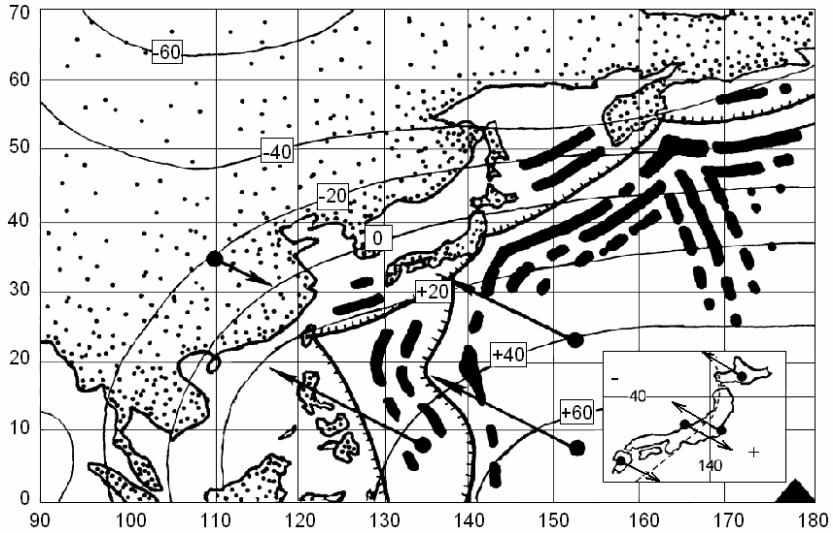


Рис. 38. Карта высот геоида (цифры в квадратах - метры), гравитационных аномалий (черные полосы), направлений (стрелки) и величин дрейфа (длина стрелок) материков и плит (Lewis, Smith, 1998). Черный треугольник внизу справа показывает положение точки с максимальным значением высоты геоида. В правом нижнем 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.

В правом нижнем углу на карте северо-западной части Тихого океана (см. рис. 38) 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°.

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. 38).

На вставке, в правом нижнем углу рисунка 38, - приведены данные по направлениям перемещений литосферы, измеренным с помощью GPS-системы в Японии (Imakire, 2000). Рисунок 38 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 38. 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.

Модель растекающейся капли. Очевидно, что физика “растекающейся капли” не может иметь прямой аналогии с процессами, связанными с субдукцией. 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: $X_1 = X_2 = \infty$, $\Delta p = 0$.

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:

$$h = a(1 - sin\theta)^{1/2}.$$

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).

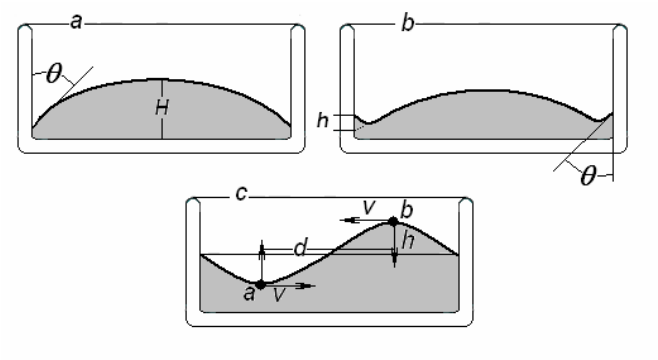


Рис. 39. Модель растекающейся капли.

Суперхроны - суперплюмы. Информация о периодах инверсий (смены полярности) геомагнитного поля неоднократно привлекала внимание исследователей, которых, в частности, интересовал 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 (I на рис. 40). 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 регулярно перемежались периодами частых инверсий. Замечено, что длительность периодов суперхронов со временем постепенно увеличивалась таким образом, что последний из них был самым длинным.

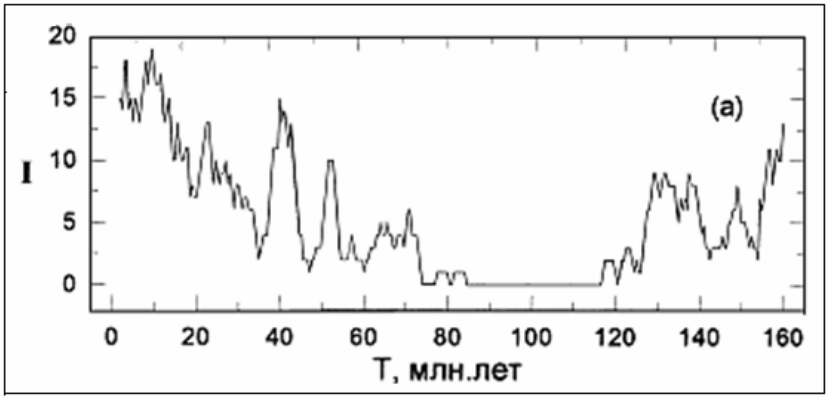


Рис. 40. Распределение количества инверсий I, произошедших в течение трех млн. лет, за T = 160 млн. лет эволюции геомагнитного поля (Харланд, 1985).

О прошлом геомагнитного поля имеется подробная информация, в частности, считается, что большая частота инверсий каким-то образом связана с активизацией геодинамических процессов. Однако, с другой стороны известно, что самые энергетически сильные события на Земле происходили в периоды суперхронов (Печерский, 2003). Эти события получили название суперплюмов. В этой связи следует выяснить, имеется ли в этой информации скрытая от глаз периодичность, или смена полярности поля представляет собой процесс, включающий набор статистически независимых друг от друга событий (Кузнецов, 1998). Следует также выяснить, в чем же состоит природа суперхронов в контексте модели горячей Земли, а также, попутно, понять и физику суперплюмов.

Модель. Обратимся к экспериментальным результатам, полученным (Giardini et al., 1988) при анализе спектров собственных колебаний Земли, точнее, их splitting - функций, возбуждаемых сильными землетрясениями. Анализ результатов показывает, что $_{11}S_4$ мода колебаний, максимум интенсивности которых приходится на внешнее ядро, четко фиксирует картину, состоящую из симметрично расположенных пятен (6 “черных” и 6 “белых”, см. рис. 41). Каждое из этих пятен означает, что плотность вещества ядра чуть больше (на 0,2 %), или чуть меньше ее среднего значения. Близкие структуры пространственного распределения скорости P-волн и плотности вещества наблюдаются на картах splitting - функций других мод собственных колебаний (в частности, $_{13}S_2$- и $_{13}S_3$-моды), интенсивность которых по глубине (kernels-функции) тоже приходятся на внешнее ядро. Правда, эти изображения не столь четки и симметричны, как в случае $_{11}S_4$ - моды, однако, и на них можно различить шесть белых пятен, в которых интенсивность splitting-функций, и связанное с ней изменение плотности, отрицательны, и шесть черных, в которых эти параметры положительны.

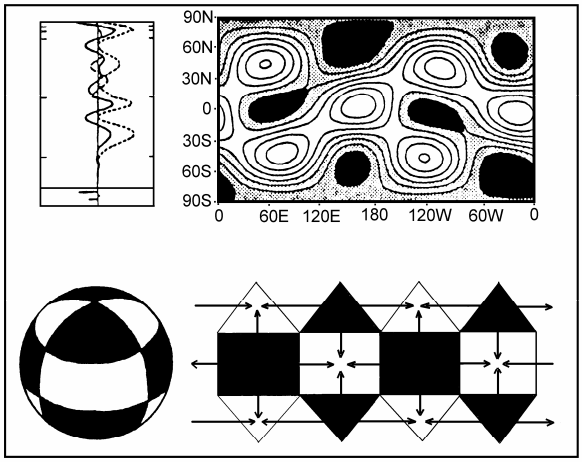


Рис. 41. Splitting-функция для моды $_{11}S_4$, слева - kernels-функция для s = 4 (точки - V_p, сплошная - распределение плотности) (Giardini et al., 1988) - вверху. Внизу слева - сферическое колебание с тессеральной гармоникой P^3_4, справа - структура конвективных ячеек во внешнем ядре.

Предположим, что отмеченная нами структура не случайна, а наоборот, показывает истинное пространственное распределение плотности вещества внешнего ядра. Такая картина может возникать, например, если в ядре происходит ламинарная 12-ячеистая конвекция. Внешнее ядро Земли принято считать конвективным, а конвекцию в нем - турбулентной. Дело в том, что число Рэлея (Ra) в ядре больше чем критическое, которое условно делит конвекцию на - турбулентную ($Ra > 10^6$) и ламинарную. Надо сказать, что

это, весьма условное деление привнесено из экспериментов, производимых в основном с водой. Насколько известно автору, еще никто не доказал, что такое деление типа конвекции на турбулентную и ламинарную справедливо для вещества внешнего ядра, для которого до сих пор еще остается дискуссионной величина вязкости (до 10 порядков).

Заметим, что модель динамо предполагает совсем другой вид конвекции во внешнем ядре. Тем не менее, есть основания предположить, что пространственная структура внешнего ядра, выявленная при анализе мод собственных колебаний (splitting-функций), соответствует конвекции в ядре, где образовались 12 ячеек. Из них, в 6-ти вещество ядра “всплывает”, а в 6-ти других - “тонет”. Эти ячейки, по своей структуре, весьма похожи на собственное сферическое колебание с тессеральной гармоникой типа P^3_4. Здесь обозначены степень гармоники $j = 4$, и ее порядок $m = 3$.

В различных моделях внутреннего устройства Земли принимаются различные схемы эволюции ядра, как внешнего, так и внутреннего. В некоторых из них радиус внутреннего ядра постепенно увеличивается, в других моделях, он уменьшается. Внешнее ядро в некоторых моделях остается неизменным, в других - увеличивается и т.п. Согласно нашей модели, размер внешнего ядра остается постоянным, в то время как радиус внутреннего ядра постепенно уменьшается. В процессе эволюции Земли, толщина ее жидкого ядра h (t) возрастает (см. рис. 42), что обязано приводить к перестройке конвекции, т.к. горизонтальный линейный размер устойчивой конвективной ячейки x связан с ее высотой $h(t)$ примерным соотношением: $h \approx 0{,}5x$. Возможно, эта пропорция определяется “золотым” сечением: $x = 0{,}618$, $h = 0{,}382$. В любом случае, размеры устойчивой конвективной ячейки h и x взаимосвязаны.

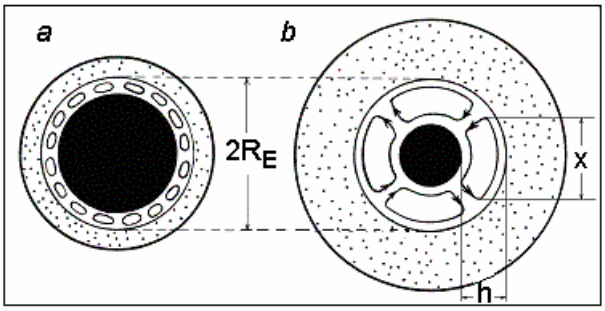


Рис. 42. Конвекция с образованием устойчивых ячеек Рэлея-Бенара на начальном этапе эволюции Земли (а). По мере увеличения толщины внешнего ядра h количество ячеек уменьшается (б).

Наша модель открывает путь для объяснения широко обсуждающейся (Larson, Olson, 1991; Fuller, Weeks, 1992; Cortillot, Besse, 1987) корреляции между суперхронами и резким увеличением интенсивности магматизма - суперплюмами. Действительно, в периоды устойчивой конвекции (т.е. в периоды между суперхронами) охлаждение ядра и теплоперенос из него в мантию будет происходить более эффективно, чем в периоды неустойчивой конвекции. Следуя модели, в течение периода неустойчивой конвекции, жидкое ядро Земли может «перегреться» и даже «закипеть». При этом «пузыри пара» могут подниматься к границе ядро-мантия и быть причиной возникновения плюмов, траппов и суперплюмов. Тогда, эта, отмечаемая многими геологами, корреляция не противоречит нашей модели, а, скорее, даже из нее следует.

О чем говорят параметры фигуры Земли ε = 1/298, C/Ma^2 = 0.333?

Парадокс Эверндена. Заголовком к этому параграфу взято название статьи Дж. Ф. Эверндена (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.

Отдавая должное автору и его смелому утверждению о негидростатичности Земли и отмеченному им несоответствию T и $1/\varepsilon$, надо заметить, что сделанные им выводы излишне категоричны и противоречат наблюдениям. Например, группой сибирских геофизиков (Крылов и др., 1993), с использованием методов глубинного сейсмического зондирования, обнаружено, что астеносферная зона под Байкалом “простреливает” всю толщу мантии от её границы с ядром до земной коры. Этот выдающийся в физике Земли результат явно противоречит выводам Эвернденa. Можно привести и другие примеры, но проблема, поставленная Эвернденом, остается. Может сложиться впечатление, что его выводы противоречат модели горячей Земли, согласно которой мантия наращивается на границе с ядром и, следовательно, если Эвернден прав, и нижняя мантия, без какой-либо динамики ее вещества, существует с момента образования Земли, то, следующего из модели горячей Земли, явления - происходить не может. Можно ли найти естественное и очевидное объяснение несоответствию длительности суток и сжатию в рамках нашей модели? Попытаемся найти такое решение…

Ответ на вопрос Эвернденa. Суть парадокса, замеченного Эвернденом, заключается в том, что Земля негидростатична. Это выражается в том, что для $T = 24$ часа, Земля должна была бы обладать обратным сжатием $1/\varepsilon = 232$, в то время как она имеет $1/\varepsilon = 298$.

Выводы, к которым приходит Эвернден: - “Земля всегда была такой” и - она никогда не была гидростатичной. Заметим, что Эвернден не сомневается в том, что Земля раньше вращалась заметно быстрее, правда, причину замедления он не обсуждает.

Вопрос Эверндена поставим в такой плоскости: была ли на Земле ситуация, когда $1/\varepsilon = 232$, или сжатие Земли всегда было $1/\varepsilon = 298$? Согласно нашей модели, Земля расширяется. Если бы она не вращалась, то $\varepsilon = 0$, а $1/\varepsilon = \infty$. Если бы Земля была гидростатичной, то, как мы отмечали, $1/\varepsilon_g = 232$, а она имеет: $\varepsilon_g > \varepsilon > 0$. В течение эволюции радиус Земли R увеличивался, возрастал и период вращения T. Запишем закон сохранения момента количества движения Земли: $MvR = \text{const}$. Скорость $v = dR/dT$, следовательно, период тоже возрастал: $T \sim R^2$. Длительность периода вращения $T = 16$ часов примерно соответствует (по нашей модели) времени около 400 – 500 млн. лет назад (рис. 43), когда началось энергичное формирование мантии. Предположим, что к этому моменту Земля была ещё “жидкой”, а жесткая мантия стала наращиваться позже. Этот момент соответствует: $1/\varepsilon = 100$ (при T = 16 ч.). На рисунке 43 прямая 1 показывает зависимость $1/\varepsilon(T)$ для реальной Земли $1/\varepsilon = 298$ при $T = 24$ ч. Прямая 2 вычислена по формуле Лэмба ($1/\varepsilon \sim T$) для гидростатичной Земли (Эвернден, 1997). Разность величин $1/\varepsilon$ показывает степень негидростатичности Земли. Из этого рисунка следует, что степень негидростатичности Земли увеличивается по мере увеличения T, иначе, по мере её эволюции и расширения. Сплюснутость гидростатичной, “жидкой” Земли больше, чем жесткой. Обозначим экваториальный радиус ”жидкой” Земли: $a_1 = a_o (1 + \varepsilon_1/3)$, а “жесткой, $a_2 = a_o (1 + \varepsilon_2/3)$. Введем параметр $\delta = (a_1 - a_2)/(a_1 - a_o) = 1 - \varepsilon_2/\varepsilon_1$. Он характеризует изменение формы Земли по мере увеличения её размера. Если в начале процесса наращивания мантии $\delta = 0$, что говорит о гидростатичности Земли, то в конце процесса, у современной Земли, $\delta = 0.22$ (22 %). Для абсолютно твердой сферы: $\delta = 1$. Введенный нами параметр, в определенном смысле, играет ту же роль, что и числа Лява. Он показывает, насколько жестче становится Земля, точнее, её мантия, по мере эволюции. В отличие от нашего параметра, числа Лява для абсолютно твердой сферы равны нулю и больше нуля, для однородной жидкой сферы.

Парадокс Эверндена разрешается в нашей модели горячей Земли. Параметр $\varepsilon = 1/298$ показывает, что Земля расширялась в течение своей эволюции, проходя все значения $1/\varepsilon$. Степень негидростатичности современной Земли достигла примерно 22 %. Вернемся к вопросу: почему Земля стремится к гидростатическому равновесию с фигурой, с обратным сжатием $1/\varepsilon = 298$, а не 232, как этого следовало бы ожидать?

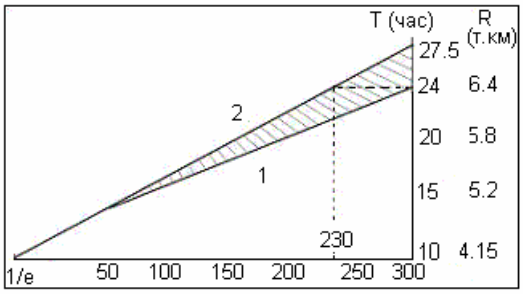


Рис. 43. Зависимость величины обратного сжатия $1/\varepsilon$ от длительности периода вращения Земли T для: 1 - реальной и 2 - гидростатичной Земли.

Отвечая на этот вопрос, обратимся к рис. 43, откуда следует, что Земля, эволюционируя и расширяясь, путем наращивания толщины мантии, становилась все в меньшей и меньшей степени гидростатичной. Раньше Земля была сплюснута в большей степени и, по мере уменьшения скорости её вращения, она «отслеживала» скорее не изменение ω, а dR/dt. В частности, рис. 35 демонстрирует поразительную

пространственную корреляцию акустических свойств внутреннего ядра и мантии, с высотой геоида. При этом внешнее ядро не обладает таким очевидным совпадением своих акустических свойств с аналогичными свойствами внутреннего ядра и мантии. Этот рисунок показывает очевидную взаимосвязь земных оболочек.

Согласно нашей модели, генерация мантии происходит в D”-слое, скорость процесса кристаллизации «контролируют» pT-условия в этом слое, которые, в свою очередь, определяются гидродинамикой внешнего ядра и её степенью сжатия. Так как внутренние оболочки Земли всегда имеют сжатие меньшее, чем внешние, именно это обстоятельство и объясняет, почему на Земле $1/\varepsilon = 298$, а не 232.

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. 44-а). 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. 44-b). Рис. 44-а 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.

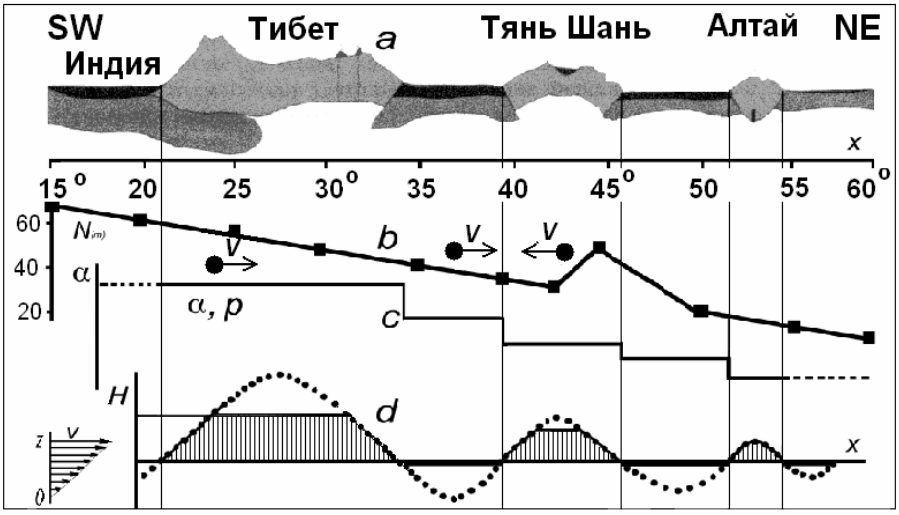


Рис. 44. Схема горных районов центральной Азии (рис. а) пересекаемых широтным профилем SW – NE (широта N– в градусах). Высоты геоида (в метрах) вдоль этого профиля (b) и направления скоростей дрейфа. Изменение (в отн. ед.) величины «поверхностного натяжения» литосферы α и величины сдвигового (лаплассового) давления p вдоль профиля (с). Модельные представления (d).

Воспользовавшись формулой можно оценить величину капиллярной постоянной a и, вслед за этим, величину «поверхностного натяжения» α (по формуле: $a = (2\alpha/g\rho)^{1/2}$). Рисунок 44-с 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. 44-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. 44-a и 44-d, ниже, т.к. она определяется соотношением между силой тяжести и прочностью литосферы. Предположим, что кривая, отображенная на рис. 44-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: $ds/dt = dp/dt - v_o$. Здесь p – амплитуда прерывистого движения ползуна.

В настоящее время считается, что на глубине десятков, первых сотен километров вещество литосферы высоко нагрето и было бы расплавленным, но громадное давление вышележащих толщ сохраняет его в твердом состоянии. При нагреве расстояния между атомами увеличиваются, что и приводит к плавлению. Давление же, наоборот, сближает атомы, не позволяя веществу расплавиться. Чтобы возникла расплавленная масса, необходимо уменьшить давление. Считается, что образовавшаяся при землетрясении трещина вызывает формирование изолированной порции магмы. Магма по трещине, как ослабленной зоне, начинает подниматься вверх. Теряя из-за снятия давления по пути пары воды и газы, магма превращается в лаву. Подъем ее на дневную поверхность и вызывает извержение вулкана. Казалось бы, можно принять эту модель, но, однако, таких трещин в природе нет, и не может быть - в принципе. Известно, что нет и каналов, подводящих магму снизу к вулканическому очагу. Таким образом, физика образования вулкана остается далеко не ясной. А как же обстоят дела с физикой землетрясения? Физика землетрясения, несмотря на то, что эта проблема стоит перед человечеством более 100 лет, до сих пор также остается не ясной.

Глава 7. Физика землетрясения.

Общие представления.

Человечество более сотни лет пытается ответить на вопрос, что же такое землетрясение? Простого ответа на этот вопрос, как известно, - нет. По версии экспертов и читателей популярного журнала LiveScience одна из десяти тайн Вселенной сформулирована так: «Что происходит в сердце землетрясения?». Этот вопрос не случаен, - ответа на него современная сейсмология не имеет, тем не менее, попытаемся ответить, понимая, конечно, что точного ответа пока никто не знает, а любая попытка сделать это - может быть только некоторым к нему приближением.

Автором этой книги в 1990 г. предложена принципиально новая физика землетрясения, - т.н. ударно-волновая (УВ) модель. Явление землетрясения, согласно этой модели, - можно представить в виде трех последовательных стадий одного процесса: 1 – зарождение УВ в недрах Земли; 2 – транспортировка УВ от гипоцентра к поверхности Земли и 3 – выход УВ на поверхность Земли. При выходе УВ на поверхность образуется волна разгрузки (разрежения), которая, взаимодействуя с начальной УВ, приводит к генерации так называемых «сильных движений» (strong motion) на поверхности Земли, таких как: разрывы и отколы грунта, его разуплотнение, подъем и опускание уровня, колебания почвы подобные колебаниям жидкости, возникновение грифонов и т.п. Все эти процессы свойственны явлениям, возникающим при выходе УВ на поверхность твёрдого тела. Особенностью УВ является то, что в отличие от акустических волн, за фронтом УВ происходит перенос вещества со скоростью, значительно меньшей, чем скорость УВ. Перенос вещества, хорошо изученный факт, получивший в сейсмологии название slip (скольжение, сдвиг, сброс), обычно интерпретируемый как фрикционное скольжение материала вдоль образовавшейся трещины, является следствием распространения УВ по твердому телу. В общепринятой модели это явление получило название «выход на поверхность очага землетрясения». В принципе, такая трактовка применима и в нашей модели, только вместо выхода трещины понимаются процессы, сопровождающие выход УВ.

Почему и как образуется УВ в недрах Земли - это наиболее сложный вопрос в новой модели землетрясения. Образование ударных волн в природе обычно связано с возникновением быстрого и локального разрыва термодинамических характеристик среды, который характеризует фронт УВ. Чем короче фронт и больше величина различий плотности и давления среды, тем больше энергии несёт ударная волна. Как следует из математической модели образования УВ, разработанной в институте им. Стеклова (Жуков, 1960), в области генерации фронта УВ должно произойти т.н. «пересечение одноименных характеристик», суть которого состоит в синхронном (кооперативном) изменении параметров среды под воздействием внешних сил на больших размерах, достигающих, в случае очень сильных землетрясений, $L \approx 1000$ км.

Пересечение одноименных характеристик – это математическая абстракция. Имеется ли физическое явление, которое попадает под такое описание? Конечно, есть - это фазовый переход, в нашем случае – структурный переход первого рода, когда в веществе под действием внешних сил резко и одновременно на больших объемах меняются расстояния между узлами решетки, иначе, происходит резкое и повсеместное изменение плотности вещества. Такие вещества в природе известны и хорошо исследованы, они получили название сегнетоэластики (Гриднев, 2000). Вполне возможно, что такие вещества имеются и в литосфере.

Процесс, связанный с возникновением землетрясения и выходом очага на поверхность, согласно сейсмологическим наблюдениям, соответствует тому, что весь процесс, в реализации которого принимает участие огромные объемы литосферы (до 1000 км) ведет себя как точка. Это означает, что занятая в процессе образования УВ среда ведет себя как единое тело, так как наблюдаемые этот процесс сейсмостанции, расположенные

на различных от гипоцентра землетрясения расстояниях, фиксируют приход сейсмической волны с точностью, меньшей, чем секунда. (Секунда – период сейсмических волн). Отсюда следует, что скорость синхронизации движения для такого огромного тела (в 1000 км) должна быть выше скорости звука на два порядка, что, конечно, не укладывается в каноны механики сплошной среды. Этот вопрос – центральный в физике землетрясения, какова бы модель не рассматривалась. По-видимому, этот момент следует считать «сердцем» землетрясения. Правильно ответив на него, можно надеяться на то, что мы понимаем (в некотором приближении) – физику землетрясения.

Стоит задаться вопросом, имеется ли в Природе явление, которое заставило бы различные частицы, находящиеся друг от друга на огромном расстоянии (до 1000 км), вести себя как одна частица? Естественно, что такие частицы должны обладать т.н. кооперативными свойствами.

В последнее время в ряде университетов исследованы кооперативные свойства природных и искусственных материалов. В большинстве случаев этими свойствами обладают вещества, имеющие в своем составе водородные связи. Практически все горные кристаллические породы, в том числе и ряд сегнетоэластиков, имеют в своем составе воду и, естественно, водородные связи. Теоретически и экспериментально было показано, что эти породы при определенных давлениях и температурах способны синхронно изменить структуру водородных связей (расстояния между атомами), что приводит к изменению плотности пород. Если предположить, что такие явления могут развиться в тонком слое, в котором достигаются необходимые давление и температура, то в этом слое (гипоцентре землетрясения) может возникнуть ударная волна. УВ будет распространяться в направлении от гипоцентра к дневной поверхности геологической среды и, рассеиваясь (расщепляясь) на её неоднородностях, - генерировать объемные сейсмические волны, формируя, таким образом, очаг землетрясения. Выходя на поверхность Земли, УВ генерирует разрывы, отколы, волновые колебания почвы и другие явления, называемые «сильными движениями» землетрясения.

Попытаемся выявить «сердце землетрясения», т.е. найти тот главный основополагающий принцип, о котором, вероятно, шла речь выше. Для этого перечислим основные параметры и особенности землетрясений и определим их взаимосвязи и не всегда ясные моменты модели.

Основные параметры землетрясения.

Сейсмический момент **(M_o)** – наиболее фундаментальный параметр для измерения силы землетрясения, вызванного подвижкой по разрыву. Величина $M_o = \mu u A$ = модуль сдвига горных пород (порядка 30 ГПа) × средняя подвижка × площадь разрывов. Измеренные значения M_o лежат в диапазоне от ~ 10^{30} дин×см (Чилийское землетрясения 1960) до ~ 10^{12} дин×см для микроземлетрясений и ~ 10^5 дин×см для микротрещин в лабораторных экспериментах на нагруженных образцах горных пород. Канамори предложил эту оценку в 1977, а первая оценка сейсмического момента Ниигатского землетрясения 1964 по записям длиннопериодных волн Лява, зарегистрированных станциями мировой сети стандартизованных сейсмографов, была дана Аки. (В системе СИ сейсмический момент имеет размерность в Н×м, 1 Н×м = 10^7 дин×см). Магнитуда землетрясения по Канамори определяется как: $M_W = 2/3\ (\lg M_o - 9.1)$.

Интенсивность землетрясения - мера величины сотрясения земной поверхности при землетрясении на охваченной им территории. Интенсивность землетрясения определяется в баллах одной из принятых сейсмологических шкал интенсивности.

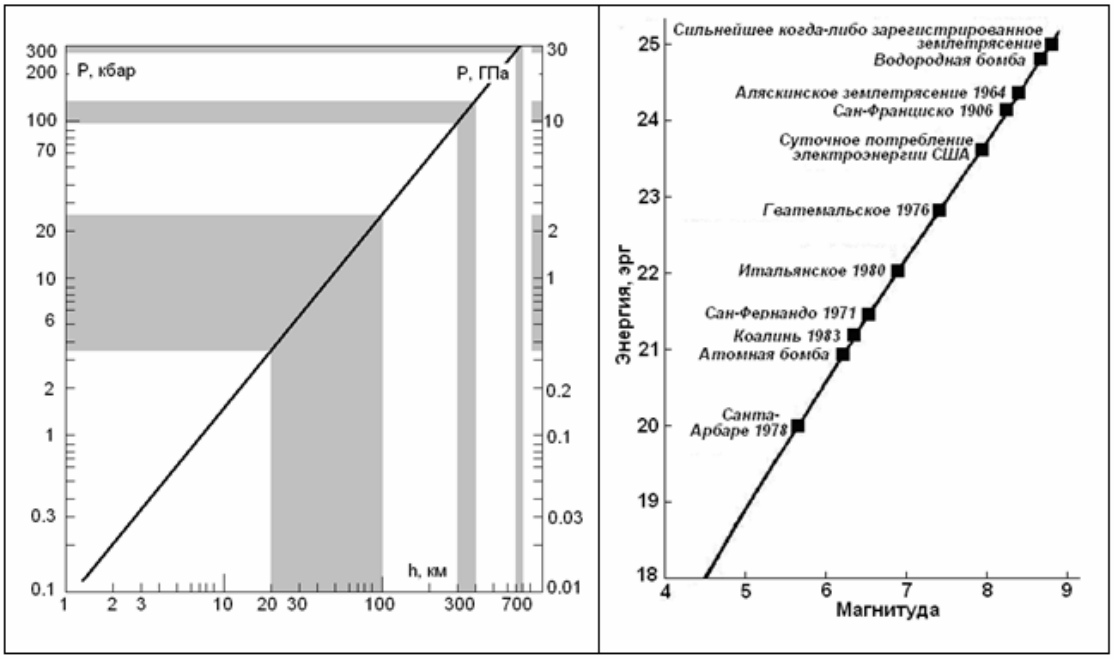


Рис. 45. Слева: глубина литосферы, на которой происходят землетрясения. Справа: сравнительная шкала энергии и магнитуды землетрясения и других высокоэнергетических процессов.

Таблица. **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.

Таблица. 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

Магнитуда землетрясения - 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:

$$M = \lg \frac{a}{T} + f(\Delta, h) + C,$$

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*(Δ, *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*(Δ, *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:

$$\lg E = A + BM$$

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 это уравнение записывается так:

$$\lg E = 11,8 + 1,50M$$

или для объемных волн

$$\lg E = 6,5 + 2,3m,$$

где магнитуда объемных волн *m* равна 2,5 + 0,63*M*.

Если подставить в $M = 8{,}7$, 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.

Длина разлома. Во время катастрофического землетрясения в Сан-Франциско 18 апреля 1906 общая протяженность поверхностных разрывов в зоне разлома Сан-Андреас составила более 430 км, максимальное горизонтальное смещение - 6 м. Максимальная зарегистрированная величина сейсмогенных смещений по разлому 15 м. Выявлена связь между магнитудой землетрясений и длиной разлома.

Закон повторяемости. Обратимся к каталогу землетрясений. Мы увидим, на первый взгляд, очень хаотическую картину, на которой, тем не менее, можно увидеть, что чем сильнее землетрясение, тем реже оно встречается в каталоге. Если построить в логарифмическом масштабе распределение числа землетрясений N по их энергии E (или магнитуде M), то осредняющий их график изобразится прямой линией с отрицательным наклоном. Закон повторяемости обычно записывается в следующей форме:

$\lg N = A - \gamma \lg E$ – для энергии;

$\lg N = a - bM$ – для магнитуды .

Параметры графика повторяемости – наклон к оси абсцисс (γ и b) и уровень (A и a) – относятся к важнейшим количественным характеристикам сейсмического режима. Наклон графика выражает соотношение между числом сильных и более слабых землетрясений. Наклоны графика различаются для различных регионов сейсмически активной поверхности Земли.

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. Спад числа афтершоков во времени после главного удара характеризуется гиперболической зависимостью (закон Омори):

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

Афтершоки, как правило, в течение некоторого времени после главного удара заполняют пространство, ранее занятое очагом главного землетрясения. Часто объем очага определяют именно по пространству, занимаемому афтершоками. Практически гипоцентры всех афтершоков, некоторые из которых сравнимы по магнитуде с главным ударом, расположены выше гипоцентра основного землетрясения.

Сейсмологам известно, что после глубокого землетрясения афтершоки практически отсутствуют, однако, хотя и редко, но эта закономерность 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.

Свойства сейсмических волн в дальней зоне. Определение положения гипоцентра.
Смещение частиц среды в P-волне:

$$u_P\,(x,\,t) \sim 1/4\pi\rho\alpha^2 \cdot 1/r \cdot X_0 \cdot (t - r/\alpha),$$

аналогично, для смещения частиц в S-волне:

$$u_S(x,\,t) \sim 1/4\pi\rho\beta^2 \cdot 1/r \cdot X_0 \cdot (t - r/\beta),$$

где α и β скорости V_P и V_S – соответственно.

Отсюда следует, что отношение амплитуд смещения частиц в этих волнах:

$$u_P\,(x,\,t)/\,u_S(x,\,t) \sim (V_S\,/\,V_P)^2,$$

примерно в 3 раза меньше в P-волне, чем в S-волне.

Разность времен прихода волн четко связано с расстоянием от источника до точки приема. Это свойство используется для оценки координат эпицентра землетрясения по данным сети сейсмостанций.

В качестве примера приведем оценку положения эпицентра Олюторского землетрясения 2006 г. по данным нескольких сейсмостанций Магадана, Якутска, Петропавловка-Камчатского и др. (рис. 46). Справа на этом рисунке приведены сейсмограммы первых вступлений сейсмических P- и S-волн на различных сейсмостанциях.

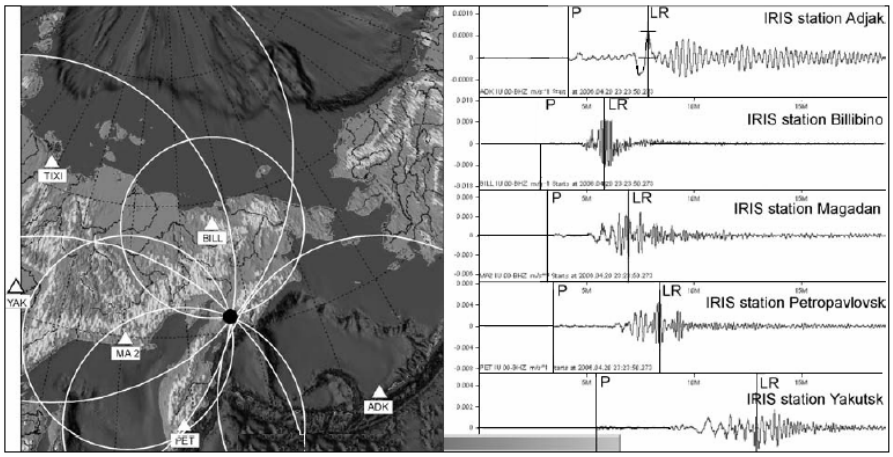


Рис. 46. Определение положения эпицентра Олюторского землетрясения 2006 г. (Сенюков и др., 2007).

Ударно-волновая модель землетрясения.
Сильные движения. Рассмотрим модель, в которой принимает участие не очень сильная ударная волна, она не может расплавить вещество среды, по которой распространяется и, тем более, его испарить. 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.

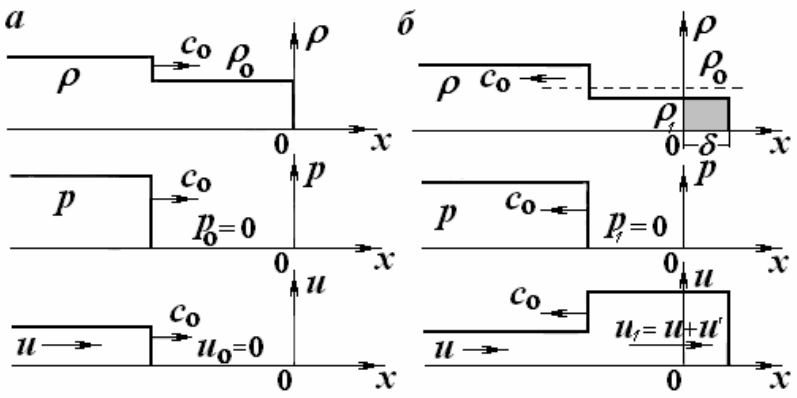


Рис. 47. Профили плотности, давления и скорости при выходе не сильной ударной волны на свободную поверхность. а) до момента выхода $t < 0$; б) после момента выхода $t > 0$. Выделенный серым цветом участок показывает, что на поверхности, после прохождения УВ, произошло разуплотнение среды, и сформировался слой толщиной δ с плотностью $\rho_1 < \rho_o$.

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 $t = 0$ 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. 47); 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: $u_1 = u + u' \approx 2u$.

Очаги землетрясений, ранжированные по магнитуде M, распределены упорядоченно не только по времени (закон Гуттенберга и Рихтера), но и в пространстве. Как оказалось, среднестатистические расстояния d_M (км) между эпицентрами ближайших пар сейсмических очагов размерами L_M (км) и магнитуды M описываются соотношениями:

$$d_M = 10^{(0.6M - 1.94)}; \quad L_M = 10^{(0.6M - 2.5)}$$

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. 48).

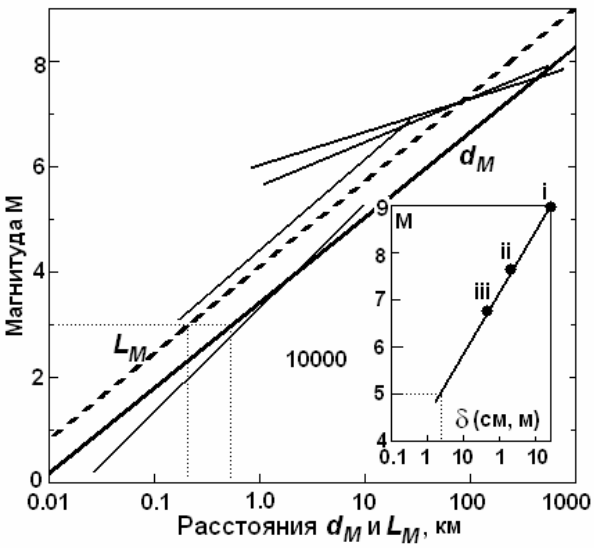


Рис. 48. Магнитуда землетрясения M – размер геоблока d_M, длина разлома L_M . Тонкие линии – данные по длине разломов различных авторов. На врезке: зависимость $M - \delta$. Точки показывают параметры землетрясений на Суматре (i), Алтае (ii) и в Калифорнии (iii).

Многочисленные наблюдения сейсмологов позволили выявить связь между магнитудой землетрясений и длиной разлома (тонкие линии на рис. 37). Оценим максимально возможные величины L_M и d_M учитывая известные размеры очага. Например, для землетрясения магнитудой $M = 6$, $L_M \approx 15$ км, а $d_M \approx 50$-60 км, В этом случае мы имеем дело 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.

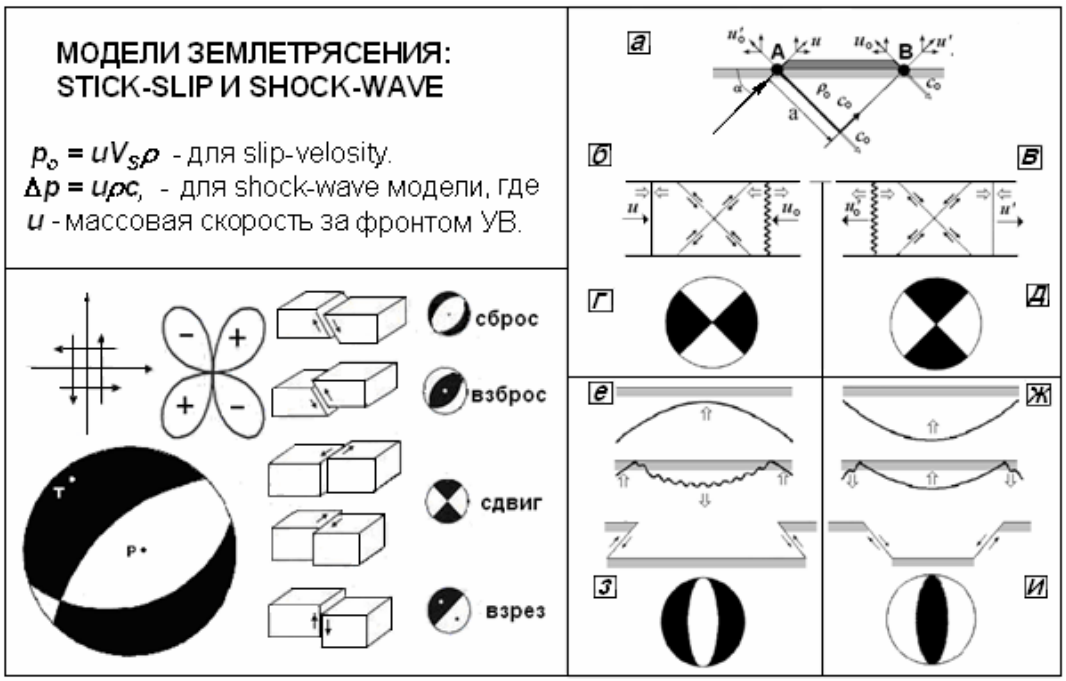


Рис. 49. Слева: силовая stick-slip модель очага землетрясения - двойная пара сил и диаграмма направленности для P-волн. Положение эпицентра и фокальный механизм землетрясения. Типы смещений по разломам и соответствующие им стереограммы фокальных механизмов. Справа: получение стереограмм фокальных механизмов при различной форме ударной волны (shock-wave) и угла её прихода к поверхности.

Оценим величину разуплотнения вещества – δ, образующегося после выхода УВ, 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. 48),

Стереограммы механизмов очагов, соответствующие основным типам смещений по разломам показаны на рис. 49. Чаще механизм 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.

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).

Нортриджское землетрясение. Нортриджское землетрясение, одно из наиболее изученных, 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, а так же результаты исследования величины и направления подвижек в очаге землетрясения.

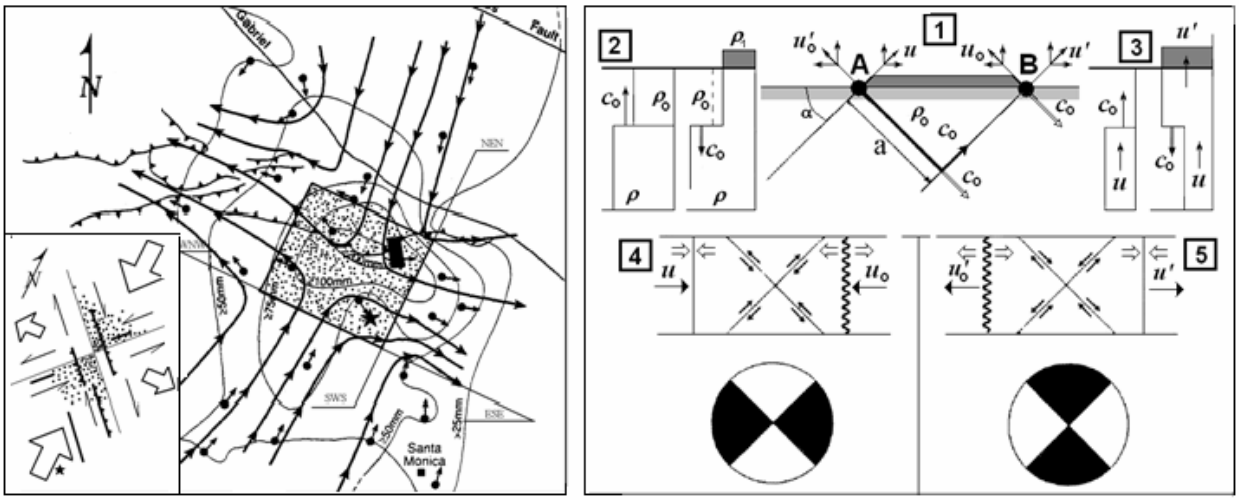


Рис. 50. Расположение GPS станций (точки) в момент Нортриджского землетрясения. Звезда – эпицентр землетрясения, выделенный прямоугольник – область сильных движений, черный прямоугольник – специальный полигон VNC, стрелки показывают

направления горизонтальных движений грунта. Слева, на вставке, - направление сжимающих и растягивающих сил в районе разлома Сан-Андреас. Справа – часть рис. 36 для сравнения с левой части рисунка.

Нортриджское землетрясение 6.7 баллов (энергия ~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.

На рис. 51 приведены картины смещений и скоростей смещений в момент Нортриджского землетрясения полученные на специальном полигоне VNC.

На рис. 52 показана расшифровка характера движения в горизонтальной плоскости, полученная по данным рис. 51. Из рисунка следует, что колебания почвы носят гидродинамический характер, что позволяет оценить вязкость грунта после прохождения мощной ударной волны. Интересно, что в начале колебания происходили против часовой стрелки, а в конце – ситуация изменилась и вращение, оно стало - по часовой.

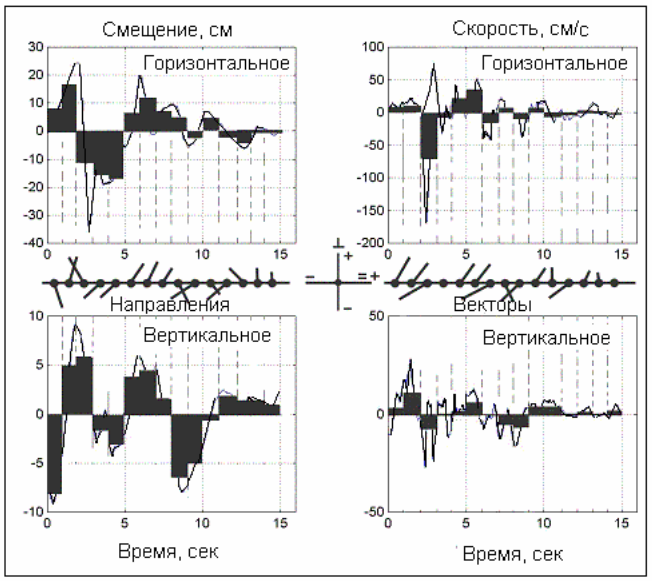


Рис. 51. Временная зависимость продольных компонент (transverse, vertical) скоростей и смещений, записанных на станции Van Norman Complex.

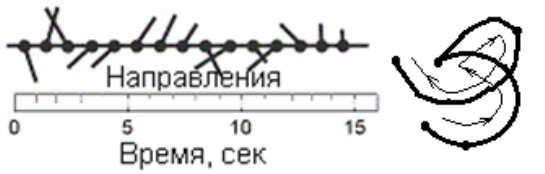


Рис. 52. Анализ направлений горизонтальных смещений.

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 очага 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.

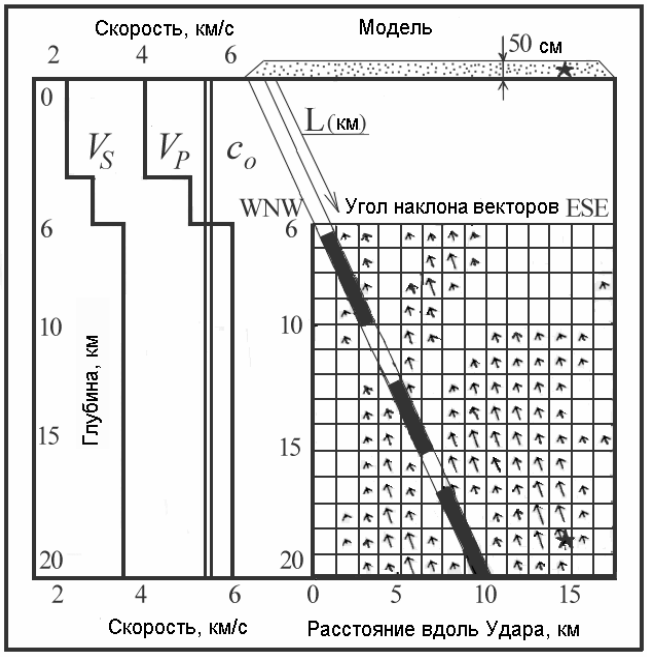


Рис. 53. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (справа). В левой части рисунка - распределение скоростей P-, S-волн и ударной волны c_o - по глубине.

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. 53 справа, изображена модель разрывов Нортриджского землетрясения. В левой части рис. 53 показано одномерное распределение скоростей сейсмических P- и S-волн по глубине. На рис. 53 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. 53), 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. 53), 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 ≈ 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.

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 незалечивающимися трещинами и перестает быть способным к генерации УВ. Эта идея является очевидным следствием нашей модели. В качестве подтверждения её правомерности приведем рис. 54 (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). Обычно 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.

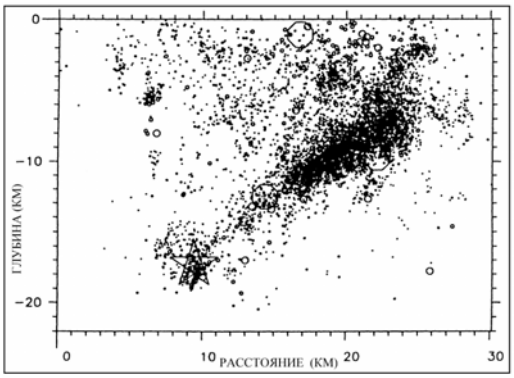


Рис. 54. Афтершоки Нортриджского землетрясения 1994 г. “повторяют” структуру “основного удара” этого землетрясения.

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, 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.

Ударно-волновая модель и принцип Рейда. Принцип упругой отдачи, предложенный Рейдом после известного землетрясения в Сан-Франциско 1906 г показан заключается в том, что в момент землетрясения сильные и резкие подвижки грунта повторяют направления медленного движения среды вдоль разлома. Рис. 55 иллюстрирует принцип упругой отдачи. Как показал столетний опыт наблюдения землетрясений, принцип Рейда обычно выполняется. Естественно, в тех случаях, когда очаг землетрясения «привязан» к действующему разлому. Поэтому, предлагаю ту или иную модель землетрясения, принцип Рейда необходимо учитывать.

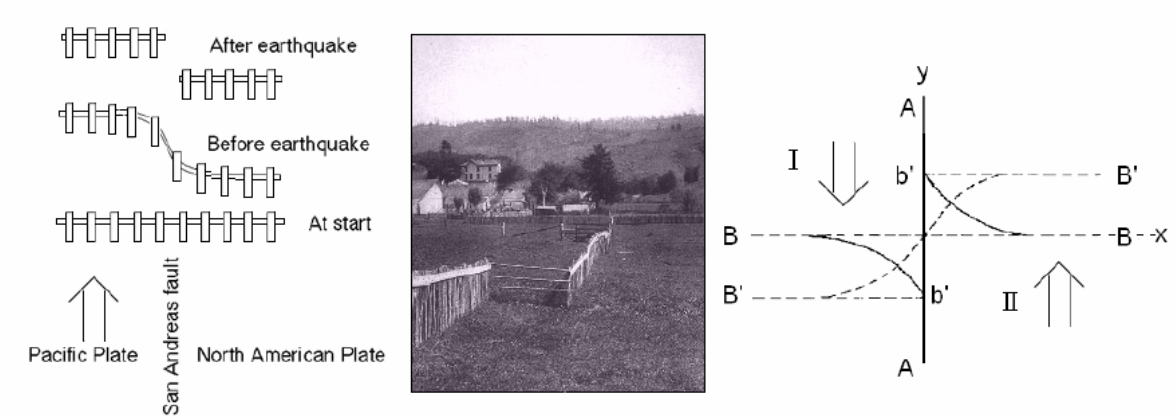


Рис. 55. Модель упругой отдачи Рейда.

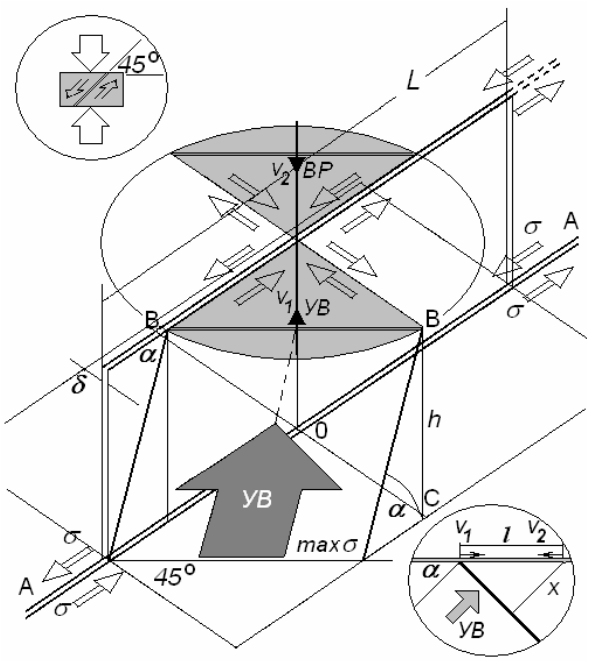


Рис. 56. Выход ударной волны (УВ) на поверхность под углом α к поверхности и углом 45°к направлению подвижек «σ» по разлому «АА» (закон Кулона-Мора). Взаимодействие УВ с волной разгрузки (ВР) приводит к подвижкам, повторяющим подвижки по разлому (выполнение принципа Рейда).

Рис. 56. 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.

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:

$$D = \Delta\rho/\rho ÿ\ \Delta x/\ \Delta t.$$

Предположим, что нам, каким-либо способом, например, путем генерации спонтанной деформации кристаллической решётки в сегнетоэластике удалось резко увеличить плотность вещества, например, на 10 % ($\Delta\rho/\rho = 0.1$). Предположим, что увеличение плотности среды происходит в некотором 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 слое литосферы, расположенном на глубине, характерной для возникновения землетрясений. Наша идея состоит в привлечении физически допустимых механизмов для создания локального разрыва

термодинамических характеристик среды, в частности – плотности. Подобное явление может происходить при структурном фазовом переходе первого рода. Очевидно, что в основе такого явления должно быть выполнение условия возникновения некоторого синхронизма больших объемов среды, называемого - кооперативностью. Известно, что таким качеством обладают вещества, в составе которых имеются т.н. водородные связи.

Длительность фронта основного удара землетрясения. Длительность фронта основного удара землетрясения составляет около секунды. На рис. 57 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.

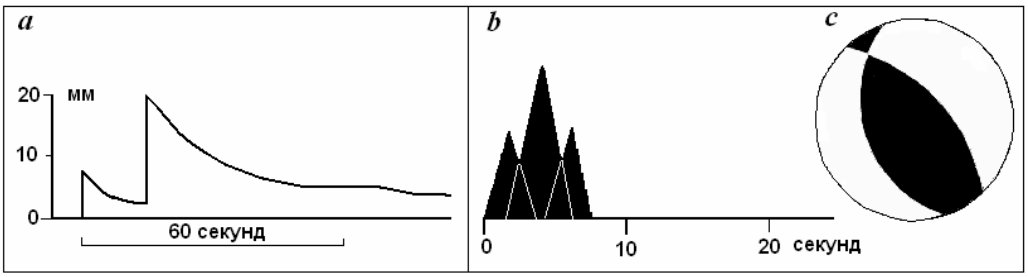


Рис. 57. Пример огибающих записей Спитакского землетрясения 7.12.88 с импульсным типом вступлений - *a*. Импульс Нортриджского землетрясения 17.01.1994 – *b*. Диаграмма первых вступлений (стереограмма) Нортриджского землетрясения (Механизм очага strike/dip/slip: 130/42/116) - *c* (Thio, Kanamori, 1996).

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.

Практически во всех случаях гипоцентры афтершоков были всегда выше, чем гипоцентр основного толчка, хотя в некоторых случаях это правило нарушается. Наиболее вероятная причина такого нарушения состоит в том, что произошло два различных землетрясения в одном месте. В качестве близкого примера приведем информацию о землетрясении в Тонга и Самоа, произошедшем в сентябре 2009 г.

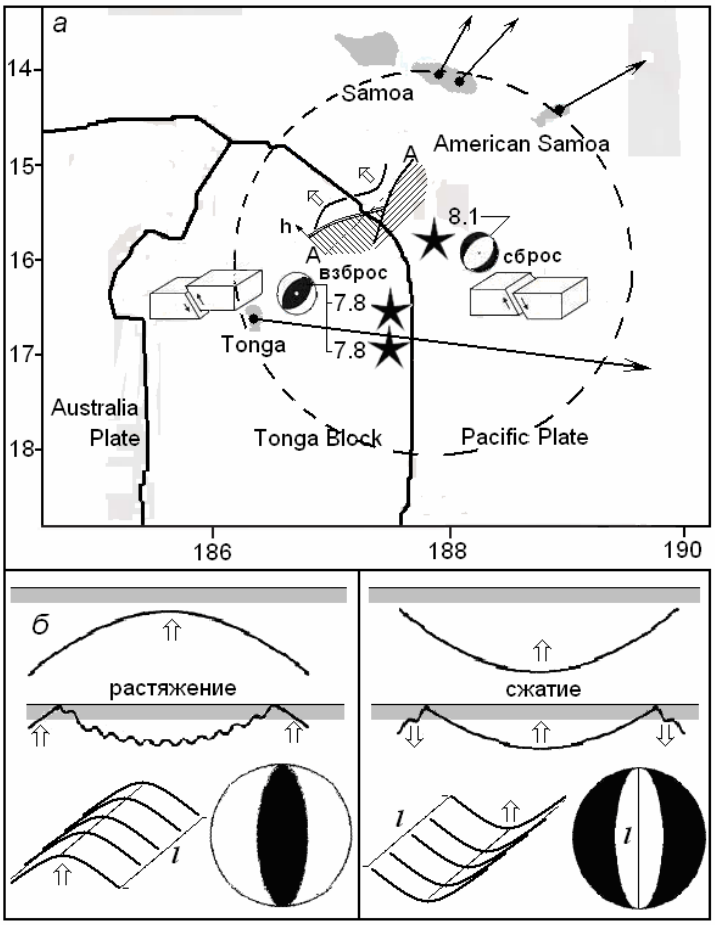


Рис. 58-а. Силовая модель очага землетрясения - двойная пара сил и диаграмма направленности для Р-волн. Положение эпицентра и фокальный механизм землетрясения. Типы смещений по разломам и соответствующие им стереограммы фокальных механизмов. Наша ударно-волновая интерпретация явления - 58- б.

Землетрясение в Тонга и Самоа (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. 58- а показано возможное положение литосферы вдоль профиля АА. В этой ситуации, согласно нашей ударно-волновой модели, должны возникнуть две сферических ударных волны, одна из них привела к растяжению, другая – к сжатию.

Этот пример иллюстрирует тот факт, что необходимо тщательнее разбираться с природе произошедшего события, а не упрощать его, оценивая некий средний гипоцентр, примерно так, как оценивается «средняя температура по палате». Очевидно, что физика явления от этого упрощения яснее не станет.

Итоги разработки УВ модели землетрясения. Разработана принципиально новая модель землетрясения. В основе модели положены три синхронно действующих механизма: - образование ударной волны в недрах Земли, - транспортировка УВ от гипоцентра до земной поверхности и – выход ударной волны на поверхность и генерация сильных движений. Второй и третий моменты модели известны и сравнительно детально проработаны. Основные вопросы вызывает идея образования ударной волны в земной литосфере. Причем, главный вопрос заключается даже не в самой идее возникновения УВ. Известно, что происходящий структурный фазовый переход, приводящий к резкому изменению плотности вещества литосферы, может быть причиной возникновения УВ. Основной, не решенный на сегодня вопрос заключается в том, как частицы среды, расположенные друг от друга на огромном расстоянии способны совместно и одновременно прореагировать на некоторое возмущение. Такие явления принято считать кооперативными. Причем, природа кооперативности до сих пор неизвестна. Этот вопрос, конечно, связан с образованием УВ, но он не снят и в любой другой модели землетрясения. Просто этому вопросу ранее не уделялось должного внимания.

Обратимся к рис. 46, где показано, что использование времен прихода сейсмических волн на различные сейсмостанции определяют координаты эпицентра как точку. С другой стороны, известно, что линейные размеры очага землетрясения могут достигать 1000 км, а точность определения времени события составляет доли секунды. Эти оценки показывают, что независимо от того, каков механизм землетрясения – ударная волна или выход трещины на поверхность, синхронность процесса (иначе, его кооперативность) должна быть очень высока. Понять суть этого явления – путь к решению проблемы физики землетрясения, его прогноза, управления землетрясением, пониманию механизма взаимного влияния землетрясений на вулканы и наоборот.

Идея многочастной квантовой сцепленности (запутанности) – возможный путь к решению проблемы, но пока путь непреодолимый. Необходимо: - разработать математическую модель многочастичной сцепленности, - расширить наблюдательную базу и - усилить лабораторные экспериментальные исследования и т.п.

В заключение несколько слов о возможности прогноза. В своей первой работе по физике землетрясения (1990) я написал такую фразу: «землетрясение, уже начавшись, само не знает, каким получится». За прошедшие четверть века я, продолжая работать над физикой землетрясения, все больше и больше убеждаюсь в справедливости этой фразы. Если соотнести её с задачей прогноза землетрясения, и учесть, что, прогнозируя землетрясение, необходимо предугадать: время, место и магнитуду. Тогда получается, что если первые два параметра ещё можно обсуждать, то третий параметр прогнозировать не имеет смысла.

Глава 8. Как образуются месторождения полезных ископаемых.

Итак, мы рассмотрели три наиболее важные аспекты новой модели земли. Во-первых, это проблема образования и эволюции горячей Земли и планет. Во-вторых, – принципиально новая модель генерации геомагнитного поля, в-третьих, – ударно-волновая модель землетрясения. На этом новая модель Земли совсем не исчерпывается. О чем следовало бы рассказать ещё? По-видимому, следует остановиться на некоторых следствиях горячей модели. Например, согласно нашей модели, температура поверхности Земли была очень большой. Сразу после образования наша планета имела температуру поверхности близкую к солнечной и тоже светилась. Правда, это был очень короткий период времени. Но, тем не менее, имеет смысл выяснить, какие же явления могли произойти на Земле.

Граниты и базальты. Земля, Луна и другие планеты, и спутники, состоят в основном из базальтов. Это исходные вещества. Их химических состав идентичен хондритам, которые по сути - метеориты. В геологии имеется не решенная проблема: откуда взялись граниты? Их нет на Луне, но они частично встречаются на Венере. Ответ может быть, например, такой. Нагреем базальты до температуры диссоциации на отдельные химические элементы и удалим летучие компоненты. Останутся только те, из которых получатся граниты.

Месторождения металлов. Почему на Земле имеются месторождения металлов? Где-то находя золото, где-то железо, или, например, ртуть. С точки зрения небулярной модели это может означать, что в Магаданскую область прилетел большой слиток золота, в Горный Алтай, к примеру, - огромный градусник с ртутью. Абсурд. Конечно. А можно ли найти решение в рамках горячей Земли? Попробуем. Критическая температура металлов известна. Известно, что при такой температуре термодинамические свойства их резко меняются. Они, как капли ртути способны сливаться в большие пребольшие «капли». Такие явления происходят при флуктуации плотности вещества – характерном явлении, происходящем при критических температурах. Температура поверхности Земли понижается за счет радиационного охлаждения. Это означает, что при температуре T_1 – сливаются в «капли» атомы золота, при более низкой температуре T_2, например, - железа и т.д. Если температура T_1 близка критическим температурам золота и серебра, то могут образовываться сплавы золота с серебром. Подобные явления в Природе известны.

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, считается, что 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.

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 °С. 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 (по стрелке на рис. 59), 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).

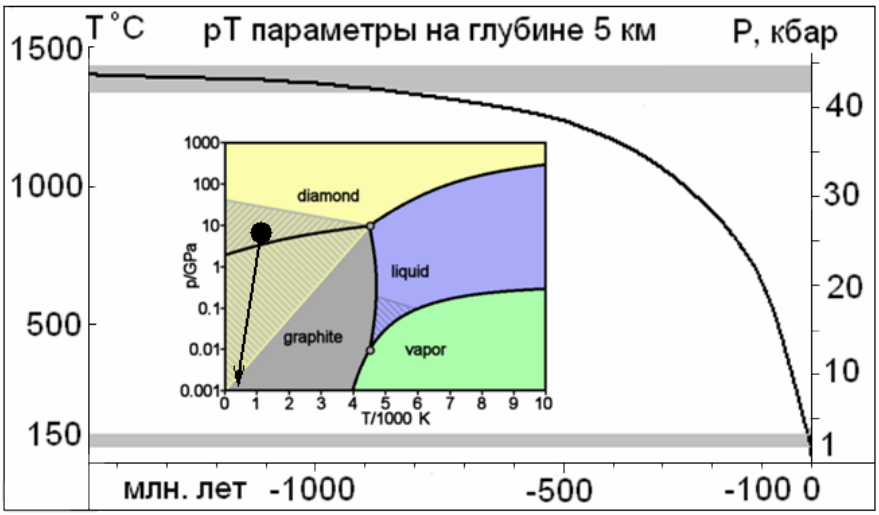


Рис. 59. Эволюция *pT* параметров Земли на глубине 5 км. Вверху - выделена зона оптимальных для образования алмазов параметров. На вставке фазовая диаграмма углерода. Точка – *pT* параметры на глубине 5 км от земной поверхности. Стрелка показывает «путь» транспортировки алмазов из мантии к поверхности Земли.

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. Однако заметим, что Соболевым и Шацким было показано, что алмазы образовались в породах земной коры (Sobolev, Shatsky, 1990). Напомним, что согласно нашей модели, 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 (Кузнецов, 2008). Это связано в основном с тем, что толщина мантии возросла примерно в 10 раз, а температура и давление в центре Земли практически не изменились. 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. 59). Как следует из модели ГРЗ, примерно 160-200 млн. лет назад началось довольно резкое охлаждение её оболочек, как внутренних, так и внешних. Земля располагает несколькими способами "«сброса"» энергии: расширение её радиуса путем наращивания мантии, генерация теплового потока и геомагнитного поля, землетрясения, горные удары, вулканизм, плюмы и т.п. Если ни один из этих способов по той или иной причине Земле «не подходил», ей следовало «изобрести» ещё один.

Углеводороды. 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.

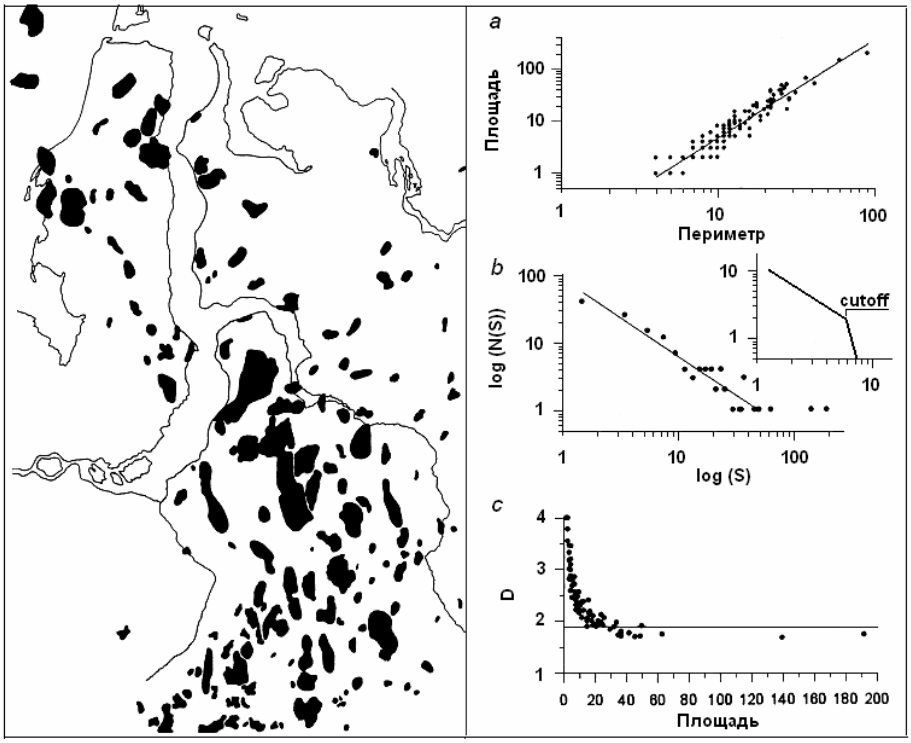


Рис. 60. Слева. Обзорная карта газовых и нефтяных месторождений севера Тюменской области. Справа. Фрактальный характер нефтяных месторождений: *a*) периметр *P* - площадь *S* в *lg-lg* масштабе; *b*) число месторождений *N* - площадь *S*; *c*) фрактальная размерность $D = 2lgP/lgS$, как функция *S*.

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 неорганический графит, или остатки органической жизни. 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.

Как известно, структура, включающая два взаимосвязанных механизма: дрейф и перколяцию, обладает способностью к самоорганизации. 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. Рядом авторов 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.

Воспользуемся картой месторождений УВ расположенных на севере Тюменской области (см. рис. 60). 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. 60-*a*). Число месторождений от их величины в log-log масштабе представлено на рис. 60-*b* (tg угла наклона прямой = -1.15), а на рис. 60-*c* изображена зависимость фрактальной размерности $D = 2\lg P/\lg S$ 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. 60 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.

Глава 9. Менялась ли сила тяжести в ходе эволюции?

Наша модель предлагает решение двух - ключевых парадоксов в эволюции Земли. Суть первого состоит в том, что ещё 100 - 200 млн. лет тому назад на Земле росли громадные деревья, размеры которых были намного больше современных, обитали динозавры, максимальные размеры которых значительно превышали максимальные размеры современных животных. Однако, в тоже время, геологам известно, что 100 - 200 млн. лет тому назад на Земле не было высоких гор. Казалось бы, имеет место явное противоречие, т.к. и горы, и растения, и животный мир должны быть связаны с силой гравитации, причем, чем она сильнее, тем меньше размер объекта. Второй парадокс состоит в том, что на Земле в течение примерно 90 % времени её эволюции жизнь развивалась очень медленными темпами до тех пор, пока не наступил период (фанерозой) очень бурного развития жизни («кембрийский взрыв»). Рассмотрим, нельзя ли оба явления объяснить вариацией силы гравитации. Однако прежде следует выяснить, изменялась ли величина гравитационного поля Земли и, если изменялась, то, как и почему.

Общепринятая в науках о Земле точка зрения состоит в том, что сила тяжести на Земле всегда была такой как сейчас (принцип актуализма), и тогда найти объяснение этим феноменам, как предлагается, - нельзя. Однако в нашей модели горячей, расширяющейся Земли, сила тяжести уменьшается в течение времени её эволюции, причем резкое уменьшение силы гравитации происходит именно в течение последних 500 млн. лет.

Итак, в период существования на Земле динозавров росли громадные деревья, а больших гор не было. Если размеры некоторых древних животных были близки современным (например, слон и – мастодонт), то их скелеты были значительно массивнее, - чем у современных. Палеогиганты пресмыкающиеся имели мощные скелеты и относительно малый объем внутренних органов. Предположим, что это каким-то образом связано с силой тяжести на Земле. Тогда, казалось бы, размеры растений и животных (L) должны бы быть пропорциональны силе тяжести (g), если раньше она была другой, допустим, больше современной, то: $L \sim g$. Это могло бы означать, что ~200 млн. лет тому назад величина g на Земле была больше современной во столько же раз, во сколько раз древние животные были больше современных. С другой стороны, среди геологов бытует мнение, что такие гиганты как динозавры, могли комфортно существовать на Земле лишь при условии, что сила тяжести была меньше современной. В противоречии с этим мнением стоит известный опыт космической медицины по разрушению скелета живого существа при невесомости. Подобную идею о влиянии силы тяжести на развитие организма высказал фантаст Г. Уэллс в известной книге «Война миров», в которой он полагал, что там, где меньше сила гравитации (как на Марсе), там развиваются более хрупкие существа с плохо развитой мускульной системой.

Известно, что на Земле раньше не было высоких гор. Например, геолог академик А.Л.Яншин писал, что “... на протяжении первых трех миллиардов лет истории Земли высокие горы на её поверхности не существовали”. Вполне возможной причиной этого явления было то, что, как и следует из нашей модели, сила тяжести на Земле раньше действительно была больше современной.

Заметим, что высота горы на планете - величина не случайная, она может быть оценена из соотношения: $\rho g H = \sigma$, где σ - предел текучести материала литосферы. Эту величину можно принять 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. Казалось бы, есть основания считать, что $H \sim 1/g$.

Если допустить, что сила тяжести на Земле менялась со временем и, к примеру, раньше была больше, то налицо явный парадокс. Живая природа, в которой скорее

наблюдается $L \sim g$, по характеру зависимости от силы тяжести явно отличается от «неживой», в которой $H \sim 1/g$. Посмотрим, можно ли найти разрешение этого парадокса, однако, прежде обратимся к вопросу о том, какой из параметров, определяющих величину g, может изменяться в принципе, а затем выясним, что же известно о силе тяжести на Земле в прошлом.

Итак, изменялось ли гравитационное поле Земли в процессе её эволюции? Ответить однозначно на этот вопрос нельзя и в наше время. Прошло более четверти века с момента написания английским профессором А.Д.Стюартом обзора “Palaeogravity” на эту тему. Некоторые вопросы, затронутые им, были уточнены за прошедшие с той поры годы, 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. Возможно, это связано с тем, что согласно укоренившегося в геологии принципа актуализма (всегда было как сейчас), этот вопрос не возникал вовсе. Новых работ за истекшие годы появилось 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. 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 значение палеогравитационного поля, но дающий возможность оценить величину скорости уменьшения g со временем. 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 районе 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 – точка на рис. 61-а), то величина g не могла быть больше современной в два раза. Это означает, что максимально возможное уменьшение g за последние 26 млн. лет эволюции Земли, составляет 4×10^{-8} в год.

Для оценки энергетики (мощности) организма животного используется понятие интенсивность метаболизма. Под метаболизмом (от греч. metabole – превращение, обмен веществ) имеется в виду превращение определенных веществ (белков, глюкозы и т.п.) внутри клеток с момента поступления веществ до образования конечного продукта.

В отличие от биологии, метаболизм в геологии – перераспределение материала внутри одной системы (метеорита, вулканической или осадочной породы). В биологии интенсивность метаболизма измеряется в (ккал/сутки) и имеет смысл и размерность мощности.

Более 100 лет тому назад Е. Рубнер на примере собак показал, что интенсивность метаболизма (обозначим его q) линейно связана с площадью поверхности животных: $q \sim S$. Величина q для животных самых разных размеров (от крысы до быка) удивительно постоянно зависит от их веса, но заметно отклоняется от прямой зависимости по площади

поверхности. Многочисленные исследования подтвердили, что наклон прямой в зависимости интенсивности метаболизма от веса составляет 0,734: $q \sim (mg)^{0.734}$, или: $q \sim (mg)^{3/4}$. Зависимость: $q \sim (mg)^{3/4}$ давно известна для животных, однако недавно аналогичная зависимость получена и для растений. Под q здесь понимается величина, характеризующая интенсивность использования растениями ресурсов и их продуктивность.

С другой стороны, как показал Стюарт, $q \sim l$ (l - линейный размер летающего животного, в частности, птицы). Поэтому, полагая очевидными пропорции: $q \sim l \sim (mg)^{3/4}$; $(mg)^{3/4} \sim (lg)^{3/4}$ (если считать правомерной пропорцию: $m \sim l$, а не $m \sim l^3$, как в неживой природе); $l \sim (lg)^{3/4}$; величина l оказывается зависимой от g: $l \sim g^3$ ($q \sim g^3$). Следует оговориться: принятая нами пропорция: $m \sim l$ справедлива только для живых организмов, интенсивный рост которых завершился. Иначе, величина l характеризует размер взрослого животного. Для молодых, растущих организмов, - эта пропорция не выполняется.

Как это может показаться ни парадоксально, но с увеличением силы тяжести должен возрастать размер животных. Ведь, казалось бы, на первый взгляд, 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. Обратим внимание на 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, скелет мастодонта более громоздкий, чем у слона. Это так же свидетельствует в пользу того, что сила тяжести раньше была больше чем теперь.

Как следует из опыта, искусственное увеличение гравитационного поля приводило к усилению энергетического обмена животного, иначе, - к увеличению метаболизма: $q \sim g$. Учтем, что: $g \sim 1/R^2$, причем в нашей модели горячей расширяющейся Земли R на первом этапе эволюции Земли: $R \sim t^{1/2}$ и: $R \sim t^2$ – на втором. Граница между этапами совпадает с границей кембрия (рис. 61-b). Как известно, Вернадский считал, что биомасса Земли остается постоянной ($B = const$) и пропорциональной массе Земли, которая так же постоянна. Примем: $B \sim qN$, здесь N - численность биологической популяции. Отсюда следует, что $N \sim 1/q \sim 1/g \sim R^2$, тогда, получаем интересную зависимость: $N \sim t$ - на начальном этапе эволюции Земли (в докембрии), и $N \sim t^4$ - на заключительном этапе эволюции (см. рис. 61-b). Заметим, что полученная нами оценка временной зависимости численности биологической популяции соответствует наблюдаемому характеру эволюции биосферы Земли (рис. 61-c). В свою очередь, метаболизм животного мира q уменьшается со временем линейно на начальном этапе эволюции и резко уменьшается - на современной стадии.

Если замеченные нами свойства метаболизма ($q \sim l$, $q \sim g$) действительно имеют место в Природе, то всё это должно приводить к весьма важным последствиям:

1) Интенсивность метаболизма древних растений, организмов и животных, была выше, чем у - современных. Она понижается по мере уменьшения на Земле величины силы тяжести. Этот вывод перекликается с (Таирбеков Г. Гравитация и организм. 2007. http://oficery.ru/all-articles/item/25385 http://www.federalspace.ru/u-st.asp), где показано, что с уменьшением напряженности гравитационного поля, снижаются и общие затраты энергии живой системы.
2) Жизнь на Земле может возникнуть только при наличии силы тяжести, следовательно, она не могла быть привнесена на Землю из Космоса.

3) Причина глобальных исчезновений видов живых организмов, происходивших ранее на Земле, возможно, связана с резкими изменениями силы тяжести, которые, в свою очередь, могли происходить в моменты изменения величины земного радиуса. Вымирание динозавров и исчезновение больших деревьев, возможно, связаны с резким уменьшением силы тяжести 160 млн. лет тому назад, когда начался процесс быстрого расширения Земли роста её радиуса, образования современных океанов и раздвижения материков.

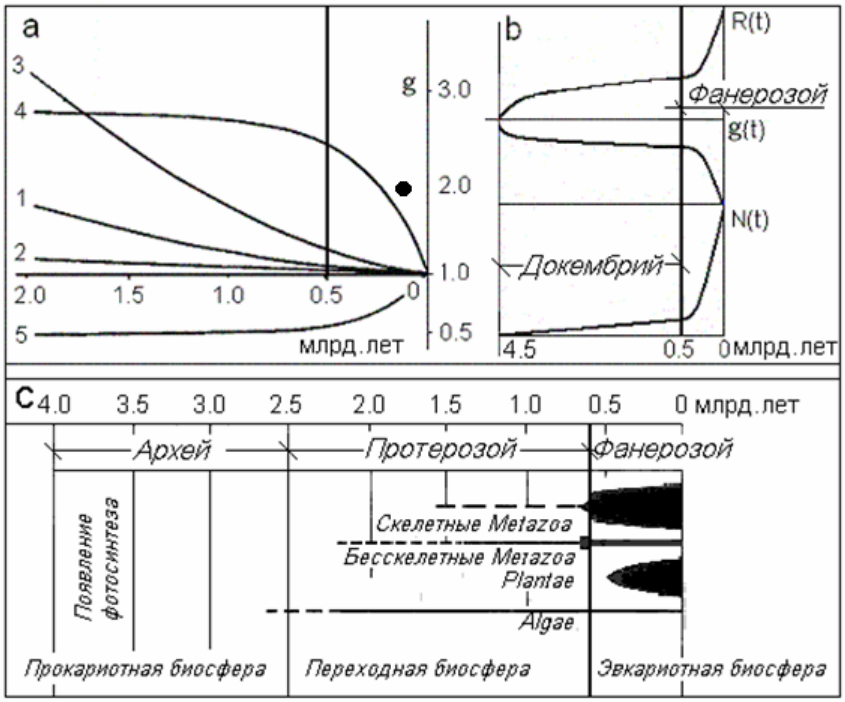


Рис. 61. a - Изменение силы тяжести во времени по различным моделям: 1 – Дике, 2 – термического расширения. 3 – Каппа, 4 – наша, 5 – Веселова и др.
b – Изменение радиуса Земли $R(t)$, силы тяжести $g(t)$, численности биопопуляции $N(t)$;
c – биоразнообразие (численность биологической популяции) на Земле в течение эволюции.

4) Зависимость относительной массы скелета животных от силы тяжести, при изменении её в течение эволюции Земли, может оказывать значительное влияние на смену биологических систем и видов животных.
5) Определение величины силы тяжести на Земле в различные периоды её эволюции не представляет сложной задачи. Например, для грубой оценки этой зависимости достаточно было бы измельчить разновозрастные образцы осадочных пород, а затем сжать их на прессе до прежней плотности, фиксируя при этом величину нагрузки. Знание этой зависимости может оказать решающее значение при выяснении вопроса о происхождении жизни на Земле.

В заключение ещё раз обратимся к статье «гравитация и организм»:
«Гравитационные силы - самые загадочные силы в природе. Необычно малые на уровне атомов, молекул и биологических микроструктур, именно эти силы явились первопричиной объединения масс до размеров гигантских небесных тел, формирования порядка (Космоса) во Вселенной, возникновения самой нашей планеты и зарождения жизни на ее поверхности».

Глава 10. О физике 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 во многих работах, 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 напоминают поднимающийся в атмосфере тороидальный вихрь (Лаврентьев, Шабат, 1973) (рис. 62).

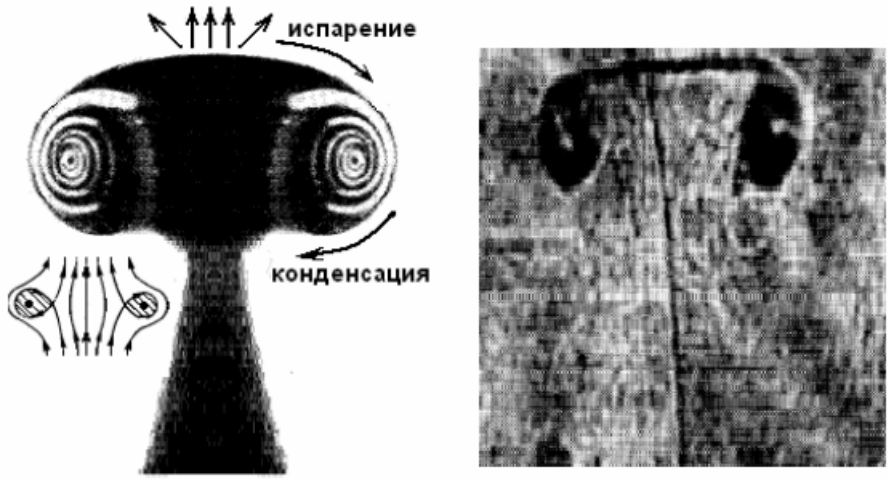


Рис. 62. Тороидальный вихрь (Лаврентьев, Шабат, 1973) - слева. Результат эксперимента по образованию двухфазной вихревой структуры при воздействии струи воздуха на расплав парафина в узком канале (Ковалев и др. 2007) - справа.

В этой книге 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. 62 (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. 62, обычно получается в опыте Вуда, который состоит в том, что вихрь возникает при ударе по гибкой стенке ящика, заполненного дымом, и выбросе дыма через отверстие в противоположной стенке ящика. Заметим, что, по существующим моделям, не все плюмы похожи на вихрь Вуда. Например, в работе (Ni et al, 2002) плюм является практически копией вихря изображенного на рис. 62. Однако, по мнению других авторов, 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.

То, что высказанные идеи имеют реальное основание, можно проиллюстрировать результатом лабораторного моделирования, полученного авторами (Ковалев и др., 2007) (рис. 62 справа) при исследовании механизма образования двухфазной вихревой структуры, возникающей при воздействии струи воздуха на расплав парафина в узком канале. «Гантелька», видимая на рис. 62 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 $\rho = 4$ г/см^3. Тепловая энергия $Q = \rho VU$, где V – объём вещества мантии, участвующего в прохождении плюма, $\approx 3\cdot10^{20}$ см^3, а $Q \approx 10^{24}$ 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.*

Рассмотрим подробнее распределение температуры по радиусу Земли. Как и выше, будем полагать, что ядро и мантия Земли состоят из одного материала и, для модельных оценок, примем, что это вещество SiO_2. Это предположение позволяет нам изобразить уравнение состояния вещества Земли и выделит на нем характерные температуры. На рис. 63 показана фазовая диаграмма вещества Земли и зависимости dT/dp (кривые 1-3). Эти кривые - адиабаты Гюгонио, т.к. использование адиабаты Пуассона, описывающей состояние идеального, бездиссипативного газа, в модели горячей Земли (как, собственно, и в любой модели диссипативной Земли) - не правомерно. Пересечение адиабаты 2 с кривой уравнения состояния земного вещества «отбивает» границы земных оболочек: мантии и внешнего ядра, а так же внешнего и внутреннего ядра. В первом случае адиабата (2) пересекает линию фазового равновесия «твердое – жидкость», во втором - "жидкость - газ", здесь: С и Б – спинодаль и бинодаль.

Зная характер поведения Р-волн в области F-слоя и полагая температуру на границе F-слоя и внешнего ядра равной T_o, температура, соответствующая минимуму скорости Р-волн, будет равна 0.8 T_o, а температура на границе F-слоя с внутренним ядром - 1.25 T_o. Если, к примеру, считать, что T_o порядка 10 000 К, то $\Delta T \approx 2000$ К, а $\Delta T/T \approx 0.2$.

Заметим, что аналогичная ситуация с поведением температуры вдоль кривой распределения фаз должна 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 в настоящее время происходит ламинарная конвекция. Во внешнем ядре мы выделили 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.

Область температур между бинодалью (Б) и спинодалью (С) соответствует (рис. 63) метастабильному перегретому состоянию жидкости. В нашей модели, эта область F-слоя. Линия между Б и С, - это линия достижимого перегрева. Если объем жидкости имеет температуру ниже равновесной на бинодали, т.е. с недогревом, то пузыри пара, попадая при их миграции в холодные слои схлопываются. В сильно недогретой жидкости пузыри, формирующиеся на нагреваемой поверхности, не достигают отрывного размера вследствие конденсации пара. Объёмное кипение происходит во всем объеме при достижении температуры спинодали. Отсюда следует, что перегрев вещества F-слоя приведет к образованию пузырей, т.е. «кипению» вещества внешнего ядра.

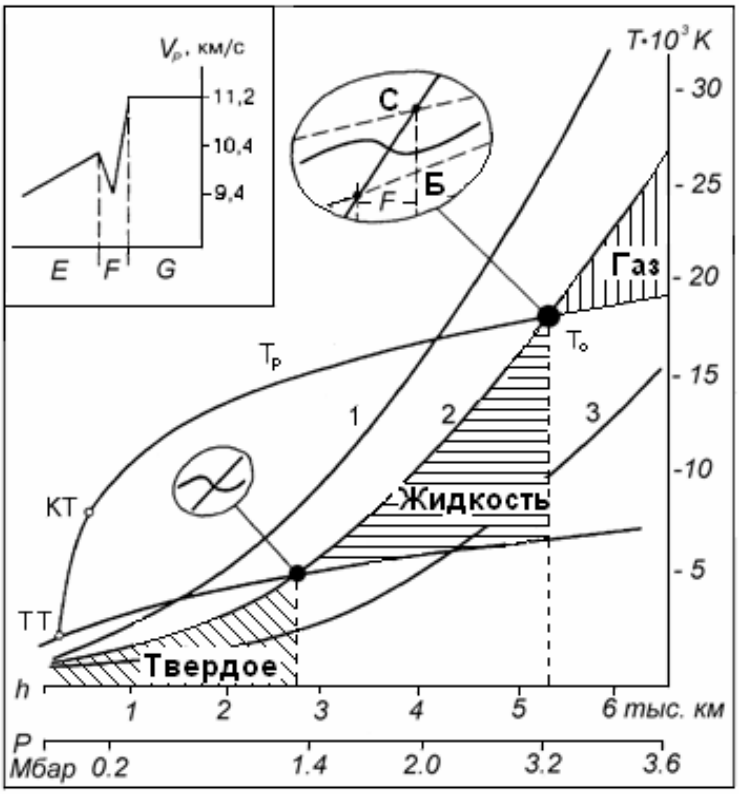


Рис. 63. Диаграмма фазового равновесия вещества Земли: ТТ - тройная точка, КТ - критическая точка, T_p - линия разделяющая фазы при T > КТ и p > $p_к$, T_o – температура F-слоя. Адиабаты Гюгонио: 1-я кривая рассчитана по формуле Зельдовича и Райзера, 3-я - рассчитана по формуле Brown и McQueen. Кривая 2 пересекается с линиями фазового 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).

Аналогичным образом, можно оценить ΔT на слое мантии. Здесь, по всей видимости, происходит турбулентная конвекция в зонах спрединга, 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 P-волн во внутреннем ядре можно оценить по формуле для идеального газа: $Vg = (\gamma R_g T/\mu)^{1/2}$, то и того меньше, поэтому максимальное значение температуры в центре Земли может составлять, ориентировочно, не более 15 000 К.

По модели, 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.

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, 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. 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 $U = 10\text{-}15$ 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 работ автора, 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. 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 $\Delta T \approx 2000\text{-}4000$ 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 $6\cdot10^{27}$ кДж, а оцененная нами выше минимальная энергия, необходимая плюму: $Q \approx 10^{24}$ Дж. Энергии $Q \approx 10^{24}$ кДж вполне достаточно для того, чтобы, например, испарить массу мантии $M = Q/U = 10^{23}$ г и объемом $V = 2\cdot10^{22}$ см^3, что определяет, при толщине мантии $3\cdot10^8$ 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 схлопывании, 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, составляет несколько секунд, что так же совпадает по времени основного удара сильного землетрясения.

Начальная плотность вещества плюма выше плотности земной коры, поэтому выход плюма на поверхность сопутствует разуплотнению вещества Земли, при этом радиус Земли возрастает на $\triangle R \approx m/\rho S \approx 2\cdot10^{22}/5\cdot5\cdot10^{18} \approx 10$ 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. 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 и раскрытия срединно-океанических хребтов (СОХ).

Глава 11. О возможной причине усиления вулканизма и сейсмичности в наше время.

В последние годы средства массой информации и, в меньшей мере, научные публикации обсуждают проблему увеличения количества природных катастроф. Более осторожные ученые полагают, что возможная причина этого явления заключается в том, что со временем увеличиваются возможности наблюдений, расширяются и модернизируются средства мониторинга, в одном случае, а так же улучшаются технические средства анализа палеоданных. Не будем обсуждать справедливость таких сомнений и примем тезис о реальности усиления вулканизма и сейсмичности на Земле и попытаемся отыскать причину этого явления.

Согласно данным института Вулканологии и Сейсмологии на Камчатке по вариации интенсивности вулканизма в течение последних 12 тыс. лет (Акманова, 2007), есть основания считать, что такая тенденция действительно наблюдается (рис. 64-а). Это подкрепляется данными по изменению вулканизма за последние 400 лет (Pyle, 1998). Аналогичные данные по палеосейсмичности (рис. 64-б) нам не известны, так что в дальнейшем, обсуждая периодичность тектонической активности Земли, будем пользоваться данными по вариации интенсивности вулканизма.

Периодичность изменения интенсивности вулканизма, в частности, вулканических событий Тихоокеанского обрамления (Селиверстов, 2004) и Калифорнии (Glazner et al., 1999) авторы объясняют климатической модуляцией нагрузки-разгрузки вулканической подложки литосферы льдом или водой. Возможно, они правы. Однако, мы хотим обратить внимание на удивительное совпадение очередности увеличения вулканизма и периодов кратковременных обращений геомагнитного поля – экскурсов (верхняя панель рис. 65). Проведенный нами анализ вулканической активности в течение примерно 500 тыс. лет, совместно с данными по вековым вариациям геомагнитного поля – экскурсам (см. Таблицу), показал, что наблюдается значимая корреляция между временными, сдвинутыми между собой, рядами этих явлений.

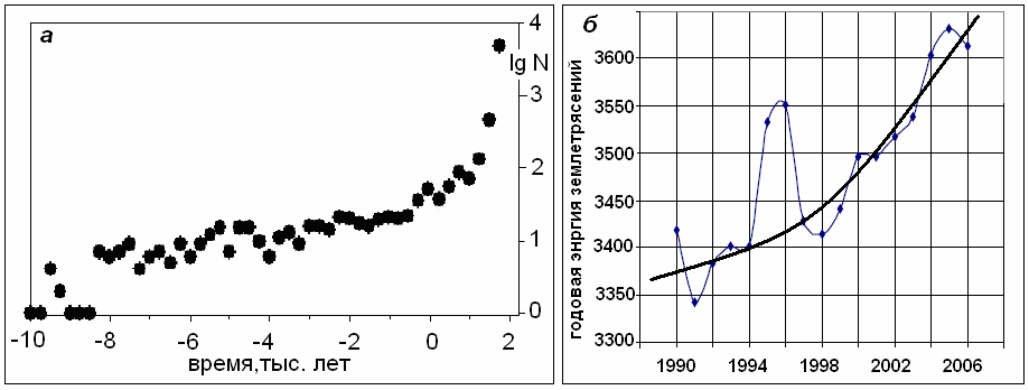


Рис. 64. Увеличение количества извержений вулканов (а) и годовой энергии землетрясений (б) со временем.

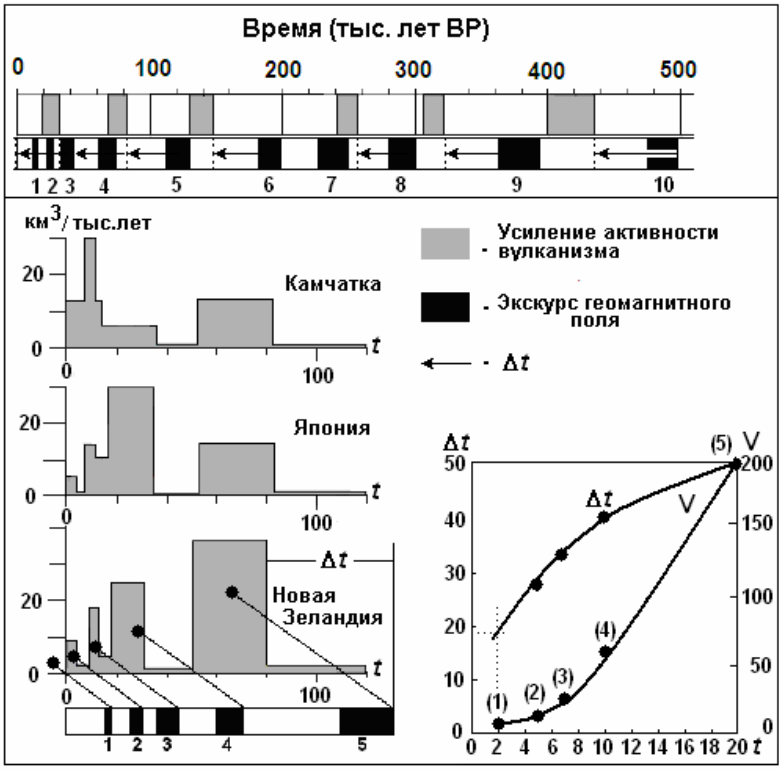


Рис. 65. Периоды усиления вулканизма и экскурсы геомагнитного поля (верхняя панель). Тоже для пяти последних экскурсов и трех вулканически активных регионов (нижняя правая панель). Справа внизу – график, связывающий длительность экскурса (*t,* в тыс. лет), *V* - объем вулканических извержений (в отн. ед.) и Δt (в тыс. лет) - время задержки между началом экскурса и началом этапа усиления вулканизма.

Таблица экскурсов геомагнитного поля в период хрона Брюнес.

№	Geomagnetic excursions, ago (kyr)		Duration (kyr)
1	Gothenburg	- 13-11	0.05
2	Mono Lake	- 33	1.2
3	Laschamp	- 41	2.5
4	Norwegian-Greenland Sea	- 70	
5	Blake	- 120	5.3 ± 0.6
6	Iceland Basin	- 188	7-8
7	Pringle Falls	- 211	
8	Calabrian Ridge 0	- 260	
9	Calabrian Ridge 1	- 318 ± 3	
10	Calabrian Ridge 2	- 515 ± 3	
11	West Eifel 4	- 555	
12	Big Lost	- 560-580	
13	West Eifel 2	- 626 ± 24	
14	West Eifel 1	- 722 ± 38	
15	Stage 17	- 670	9
	Matuyama-Brunhes reversal	- 780	

На нижней панели рис. 65 показано распределение интенсивности вулканизма (объем магмы в единицу времени) в трех регионах Тихого океана во времени, в течение 100 тыс. лет (Селиверстов, 2004) и экскурсов геомагнитного поля, проходивших в этот отрезок времени. Из рисунка следует, что в течение этого периода времени на Земле

произошло 4 цикла усиления вулканизма и 5 экскурсов геомагнитного поля. Если предположить, что каждый экскурс каким-то образом связан и предшествует периоду усиления вулканической активности, то, как и на верхней панели этого рисунка, можно видеть, что время опережения между началом экскурса и началом цикла усиления вулканизма не одинаково. Оно, как следует из правой панели рис. 65, уменьшается с уменьшением длительности экскурса (t) и уменьшением объема извергаемы пород (V). Аппроксимируя график Δt к моменту начала экскурса Гетенборг (1), получает величину Δt порядка 18 тыс. лет, иначе, к настоящему моменту.

Таким образом, т.к. со времени прохождения последнего экскурса Гетенборг до настоящего времени прошло около 15-18 тыс. лет, то причина современного усиления вулканизма может состоять именно в том, что в наше время мы фиксируем начало цикла тектонической активности, связанной с поведением ядра Земли во время этого экскурса. Нам остается только найти механизм, связывающий экскурсы геомагнитного поля с тектонической активностью Земли

Экскурс Гетенборг был самым коротким из всех ему предшествующих. Это означает, что нас ожидает усиление тектонической активности, которая, вполне возможно, уже началась, но интенсивность её может быть заметно ниже, чем последняя вспышка вулканизма, связанная с экскурсом Моно Лайк (2).

Вековые вариации геомагнитного поля, в том числе и экскурсы и инверсии возникают в результате процессов, протекающих в ядре Земли. При этом синхронно с изменениями полярности геомагнитного поля происходят, как следует из развиваемой автором модели, процессы фазовых переходов первого рода на границе внутреннего ядра. Фазовые переходы сменяют друг друга, при этом меняется характер эволюции не только геомагнитного поля, но и тектонической активности. В момент прохождения экзотермического перехода выделяется тепло и происходит разуплотнение вещества внутреннего ядра – Земля при этом расширяется. Во время прохождения эндотермического перехода тепло поглощается и внутреннее ядро и, следовательно, вся Земля – сжимается. В настоящее время - Земля сжимается, при этом полярность геомагнитного поля – нормальная. Однако в периоды экскурсов (кратковременной смены полярности геомагнитного поля на-обратную) происходило импульсное расширение Земли, возникающее в результате разуплотнения и возникновения сил расширения на границе ядро-мантия (Кузнецов, 2008). В рамках этой модели можно попытаться найти причину вспышек вулканизма именно в те моменты времени, когда импульс давления успеет передаться через толщу мантии (L) от ядра к поверхности Земли.

Как известно, в непроводящей среде, такой как мантия Земли, геомагнитное поле инерционностью не обладает. Все явления геомагнетизма происходят (по модели горячей Земли) на границе внутреннего ядра. Именно здесь возникает избыточное давление, которое передается на границу ядро-мантия и, релаксируя в литосфере, вызывает её упруго-пластическое течение, результатом которого является усиление вулканизма.

Оценим характерное время вязкоупругой релаксации вещества мантии на воздействие геодинамического импульса вызванного кратковременным циклом расширения Земли: $t_o = \mu/G$, 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 можно принять характерное время: $t_o \approx 10^{12}$ с = 30 000 лет, что неплохо совпадает с характерной задержкой начала усиления вулканизма после экскурса (рис. 64). Это некая средняя оценка, учитывая неточность данных μ и G, диапазон вариаций величины t_o составляет от 3 до 300 тыс. лет.

Оценим характерное время передачи импульса расширения-сжатия через мантию, толщиной L для двух моделей Земли: упругой и вязкой. Скорость передачи сигнала в упругой среде равна скорости звука: $V_1 = \sqrt{G/\rho}$, или $V_1 \sim \sqrt{G}$.

Представим себе, что в гидродинамической модели вязкой среды мантии тектонический импульс трансформировался в виде «пузыря», который «всплывает» с гидродинамической скоростью: $V_2 = gR^2/\upsilon\ (1- \rho_1/\rho_2)$, где g – ускорение силы тяжести; R – характерный размер пузыря; υ – кинематическая вязкость среды ($\upsilon = \mu\rho$); ρ_1, ρ_2 – соответственно плотности пузыря и среды ($\rho_1 \approx \rho_2$). Отсюда $V_2 \sim 1/\mu$. Время передачи «сигнала» через мантию толщиной L в первом случае: $t_1 \sim L/V_1 \sim L/\sqrt{G}$, во втором: $t_2 \sim L/V_2 \sim L\mu$. Отношение этих величин: $t_2 / t_1 \sim \mu\sqrt{G}$. Подставим μ из формулы $t_o = \mu/G$ и получим отношение времен: $t_2 / t_1 \sim t_o\, G^{3/2}$. Отсюда следует, что гидродинамическое время значительно больше, чем время вязкоупругой релаксации. Наши оценки показывают, что возможным механизмом передачи импульса через мантию является вязко-упругая релаксация.

Анализируя рис. 65, можно прийти к заключению о том, что чем продолжительнее экскурс (t), тем больше время задержки (Δt) и интенсивнее вулканизм (V). Экскурс Гетерборг был самым коротким из всех ему предшествующих. Это означает, что нас ожидает усиление тектонической активности, которая, вполне возможно, уже началась, но интенсивность её может быть заметно ниже, чем последняя вспышка вулканизма, связанная с экскурсом Моно Лайк (2).

Вернемся к идее климатической модуляции нагрузки-разгрузки вулканической подложки литосферы льдом или водой. Связь между вулканизмом и климатом известна. Достаточно упомянуть работы по «вулканической зиме». Это явление обычно связывается с извержением супервулканов. Мы не имеем информации, имеется ли связь между супервулканами и геомагнетизмом, однако такая связь вполне возможна. Более того, из нашей модели следует, что на Земле может произойти не только усиление вулканизма, но и пробуждение супервулкана. В вулканизме, так же как в сейсмологии, самое сильное суперземлетрясение, или извержение супервулкана, - вносят основной вклад, значительно превышающий вклад большого числа более слабых событий.

Сказанное выше позволяет считать взаимосвязь: «экскурс ГМП – вулканизм – стратосферная пыль – похолодание» - вполне обоснованной. Этот результат будет использован в дальнейшем, при построении теории климата.

Глава 12. Новая модель атмосферного электричества.

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.

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 ниже.

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.

Новая модель атмосферного электрического поля. 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:

$$E = \partial V/\partial n = 4\pi\sigma,$$

где σ – поверхностная плотность заряда Земли в данной точке. Это выражение 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: $\sigma^* \approx 7\cdot10^5$ 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: $d \approx 60$ 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, разряды молний, дожди, снег и туманы 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 доказательства, 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.

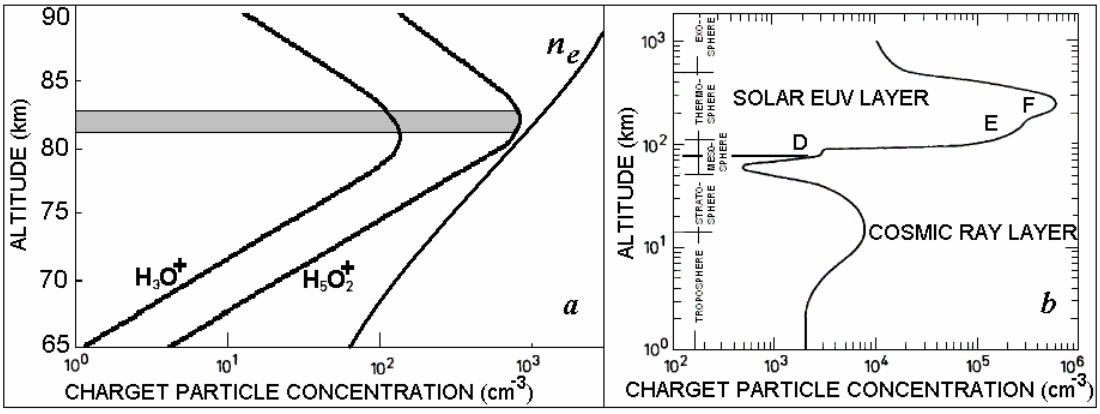


Рис. 66. Вертикальные профили плотности: водных кластеров $H_5O^+_2$ и H_3O^+, и ионизированных частиц в атмосфере: (Ferguson, Fehsenfeld, 1969) – *a*, (Marsh, Svensmark, 2000) – *b*.

Во-вторых, наша модель требует наличия в атмосфере Земли, на высоте примерно 60 км, положительно заряженного слоя, плотность зарядов в котором должна быть не ниже $\sigma^* \approx 7\cdot10^5$ 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. 66-а). Для обеспечения величины $\sigma^* \approx 7 \cdot 10^5$, толщина слоя, при концентрации $10^3 см^{-3}$, должна быть не менее 700 см. В действительности, толщина этого слоя значительно больше, - достигает нескольких км, что позволяет считать положительно заряженный слой гидроксония, - второй обкладкой сферического конденсатора «Земля – электросфера». Таким образом, можно считать, что верхняя положительно заряженная граница электросферы- это слой ионов гидроксония. Нижняя граница – поверхность Земли, она всегда отрицательна. Известно несколько механизмов объясняющих, почему она отрицательна. Общепринятое представление это наличие на поверхности Земли отрицательный ионов воды – гидроксила. С этим никто не спорит, а вот найти причину этого явления пока не удавалось. В этом плане стоит привести идею, высказанную Даниловым (2010). Суть его идеи состоит в том, что в воде всегда существуют «свободные» протоны, которые постоянно перемещаются вдоль водородных связей. Эти протоны легко испаряются с поверхности и соединяются с молекулами воды, находящимися в виде пара, образуя при этом ионы гидроксония (H_3O^+). При этом поверхностные слои воды обогащаются отрицательно заряженными ионами, что, по мнению автора, может быть истинной причиной отрицательно заряженной поверхности Земли и положительно заряженных облаков – природного процесса, описанного в знаменитых лекциях Ричарда Фейнмана по физике. Разделение зарядов и образование большой разности потенциалов между Землей и облаками Фейнман относит на счет радиоактивности Земли возле земной поверхности и радиации Солнца в верхних слоях. Это предположение вызывает ряд вопросов, на которые трудно ответить, в то время как испарения с Земли, обогащенные протонами, переносящими положительный заряд в атмосфере, дают довольно простые представления об этом механизме.

Таким образом, следуя модели Данилова, отрицательный заряд Земли связан с образованием в поверхностном слое Земли «облака» гидроксония, которое может «всплыть» и достичь, по крайней мере, грозовых облаков. Гидроксоний – летучий газ, в принципе, он может накапливается в атмосфере на высоте порядка 85 км. Авторы (Ferguson, Fehsenfeld, 1969) предполагали, что гидроксоний образуется в верхних слоях атмосферы и затем опускается до этих высот и накапливается. Можно допустить и другой механизм появления слоя ионов гидроксония. Они могут «всплывать» от поверхности Земли и достигать не только высоты грозовых облаков, но и накапливаться в D-слое ионосферы. Если учесть эти обстоятельства, то можно сделать вывод о том, что источником атмосферного электрического поля Земли является ионы гидроксония. Они, испаряясь, создают отрицательный потенциал около поверхности Земли и, накапливаясь в D-слое ионосферы,- создают положительный заряд. Возможно, что именно два слоя ионов гидроксония ограничивают т.н. электросферу Земли.

Гидроксил (OH^-), оставшийся после его выноса из системы нейтральных молекул воды, коагулирует на себя пары воды, превращается в водный аэрозоль, который поднимается восходящим потоком нагретого воздуха, и, в конечном счете, - превращается в облака. Перенос отрицательных зарядов вверх определяет направление электрического тока (рис. 67) – вниз, Иначе, выпадение отрицательно заряженных водных капель в виде дождя – это ток вниз (рис. 67) положительных – ток вверх. Вполне возможно, что именно эти два процесса являются ничем иным как токами, называемыми токами Шмидта-Бауэра (ШБ). Можно предположить, что именно эти токи приводят к тому, что геомагнитное поле оказывается не совсем потенциальным.

Отметим, что плотность токов ШБ (10^{-9}-10^{-8} А/м^2) примерно равна плотности тока дождя (10^{-8} А/м^2). Как следует из рис. 67, ток дождя может менять своё направление, оставаясь в основном – отрицательным.

Очевидно, что в атмосфере должен существовать и ток, обратный току дождя. По-видимому, это ток, обязанный переносу зарядов в восходящих потоках нагретого и влажного воздуха. Такие потоки возникают, как правило, в теплых лесистых и влажных

регионах материков. Согласно работе (Stolzenburg et al., 1998), восходящие потоки, так же как и токи дождя могут нести как положительные, так и отрицательные заряды.

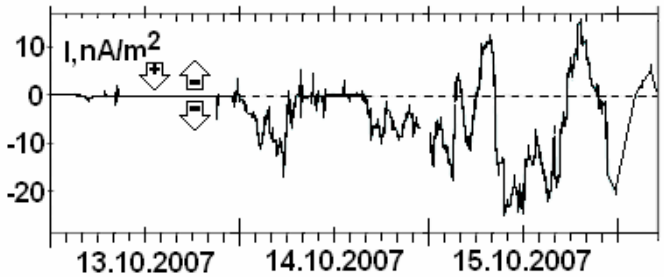


Рис. 67. Ток дождя (Канониди, 2010). Стрелки показывают направление переноса зарядов токов дождя.

В этом представлении убедились радиолюбители, которые проводили измерения атмосферных токов, принимаемых их телевизионными антеннами. (см. например, Polaykov V. T., Atmospheric Current: practical experiments. http://grp.ru). Они получили, что во время ясной и сухой погоды ток был всегда положительным (от антенны к земле), при отсутствии облаков 0,1…0,3 нА, по мере развития облачности флуктуации увеличивались, и иногда ток доходил до 7 нА. В ненастье ток был всегда отрицательным, во время тумана и легкой мороси –0,2…–1 нА, при дожде больше, максимальное зарегистрированное значение –14 нА. Электрически заряженные капли тумана, мороси и дождя, осаждаясь на антенне, отдавали ей свой отрицательный заряд. Если допустить, что эффективная площадь поверхности телевизионной антенны достигала 1 м^2, то результаты измерений тока дождя близки по величине общепринятой величине токи, текущие в атмосфере Земли, известны:

- Плотность атмосферного тока ионов в районах с ясной погодой составляет 2-3·10^{-12} А/м^2.
- Плотность тока, обусловленного переносом зарядов на каплях дождя, града, снега, при спокойных ливнях составляет 10^{-7}-10^{-6} А/м^2
- Плотность тока, обусловленного переносом зарядов на каплях дождя, града, снега, при грозовых ливнях и граде составляет до 10^{-6}-10^{-4} А/м^2
- Сила тока в молнии - до 500 кА, (с наибольшей вероятностью - в диапазоне 20-40 кА). Напряжение в молнии составляет до 10^{9}В, длина молнии достигает 10 км, диаметр канала молнии достигает 20 см.

Сравним величины электрических зарядов в атмосфере Земли:

- Средний заряд грозового облака 50 кулон.
- Заряд циклона, по нашим оценкам, достигает Q =5·10^3 Кл. Площадь его 100×100 км^2.
- 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$^{-3}$ ×5·10^{18} см^2×10^5 ×1.6·10^{-19} Кл = 10^9 Кл, где N - концентрация зарядов, S - площадь поверхности Земли, h - толщина слоя, e - заряд электрона (Ferguson. Fehsenfeld, 1969).
- 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^2×5·10^{18} см^2×10^{-3}×1 сутки (≈ 10^5 с) = 5·10^{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×3·10^5 В = 1.5·10^4 Кл.

Сравнение величин зарядов Q_1 и Q_4, имеющих непосредственное отношение к АЭП, с величинами зарядов слоя положительных ионов (ионов гидроксония - H_3O^+) Q_2 и зарядов

дождевого облака Q_3, показывает, что электрические заряды атмосферы значительно (более чем на 4 порядка) превышают заряды, приписываемые 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 близки токам дождя. Предположим, что ток дождя и есть ток ШБ, тогда ток обратного направления, - это ток зарядов, поднимаемых в атмосферу восходящим потоком. Дождевые капли, как правило, заряжены отрицательно, они падают вниз, что означает направление тока вверх. Подъем отрицательных капель восходящими потоками определяет ток вниз. Смена знака заряда капель приводит к смене направления токов ШБ.

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 водяной пар, то величина АЭП значительно возрастает.

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, энергия слоя ионов $W_2 = 5{\cdot}10^7$ Дж, заряда дождя $W_3 = 2{\cdot}10^9$ джоулей. Энергия конденсатора $W_4 = 5{\cdot}10^2$ джоулей.

Полученные значения величин сравним с энергией атмосферы. Согласно (Борисенков, 1977), внутренняя энергия всей атмосферы оценивается цифрой 8,6 $\cdot 10^{23}$ Дж, потенциальная = 3,6 $\cdot 10^{23}$ Дж, 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 готовые изменения данных обсерваторий за последние пол века, можно будет обнаружить тенденцию изменения токов ШБ.

Роль космических лучей. Распределение плотности электрических зарядов по высоте атмосферы представлено на рис. 66-*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.

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. 68-*б*, 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, этот рисунок - 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.

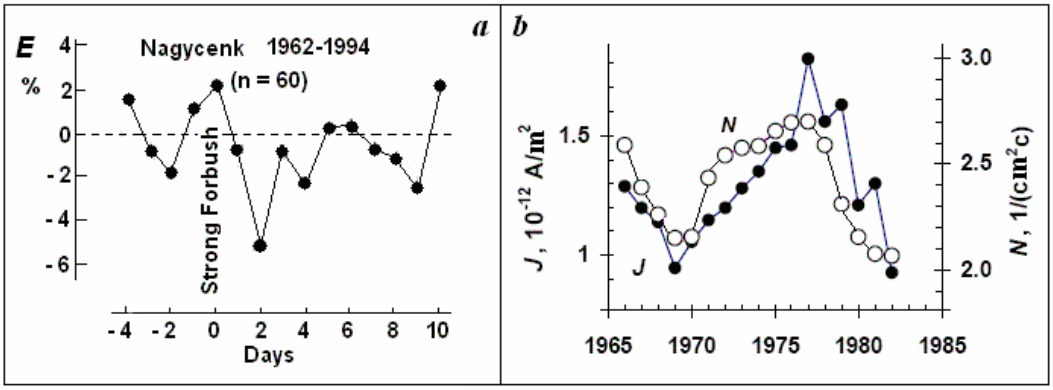


Рис. 68-*а*. Изменение атмосферного электрического поля E_Z в момент Форбуш понижения и восстановление величины E_Z в последующие дни (Märcz, 1997). Рис. 68-*b*. Зависимости величины плотности атмосферного тока j (темные кружки) (Roble, 1985) и потока космических лучей N на средних широтах на высоте $h \approx 22$ км; светлые кружки (Stozhkov, 2003; Ермаков, Стожков, 2004).

Природа атмосферного электрического поля остается до сих пор не совсем ясной, несмотря на большое количество исследований проводимых в течение многих лет в различных странах. Многие авторы до сих пор полагают, что возникновение АЭП в значительной степени определяется грозовой деятельностью (Harrison, 2005). Такой подход, несмотря на то, что идея источника АЭП общепринята и, за редким исключением,

(например, Kasemir, 1956, 1977), практически не подвергается сомнению, приводит к очевидному недоразумению. Суть его состоит в следующем: Хорошо известно, что 11-летняя периодичность солнечной активности четко коррелирует, совпадая по фазе, с частотой гроз и, в тоже время, находится в противофазе с временным ходом интенсивности потока ГКЛ. Известны работы, в которых отмечается корреляция между плотностями потока ГКЛ и атмосферного тока (Roble, 1985; Stozhkov, 2003; Ермаков, Стожков, 2004). В работе (Märcz, 1997) показано, что корреляция ГКЛ - АЭП имеет место в моменты Форбуш понижений на интервалах ≈ 2 – 5 дней (рис. 68-*а*). Возникает очевидное противоречие: если АЭП обязано грозам, то временная зависимость её должна находиться в противофазе с потоком ГКЛ. Это может означать только то, что грозы не могут быть основным источником АЭП. Кроме этого, согласно общепринятой модели АЭП, уменьшение потока ГКЛ в моменты Форбуш понижений должно соответствовать увеличению АЭП (Апсен и др., 1988). Однако, как показано в (Märcz, 1997), величина АЭП (E_Z), в моменты Форбуш понижений плотности потока ГКЛ, не увеличивается, а, наоборот, понижается. Этот факт так же противоречит общепринятым представлениям об АЭП.

Известно из наблюдений, что величина АЭП тем больше, чем ниже температура. В качестве иллюстрации приведем рис. 69. Эта зависимость прямо следует и из нашей модели АЭП, т.к. величина АЭП определяется отношением скоростей испарения и конденсации воды. Чем выше скорость конденсации (она повышается при более низкой температуре), тем больше АЭП.

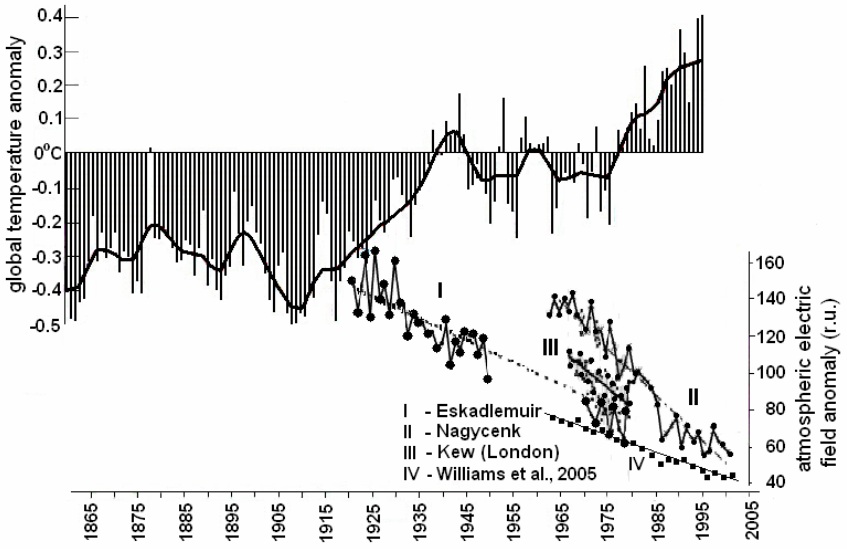


Рис. 69. Изменение глобальной температуры Земли. Уменьшение величины E_Z на обсерваториях Венгрии и Великобритании (Märcz , Harrison, 2003; Williams et al., 2005).

Унитарная вариация. Одной из важнейших особенностей АЭП является унитарная (UT) вариация АЭП, смысл которой заключается в том, что вертикальная компонента АЭП E_Z возрастает на 20 % одновременно по всей Земле - в 19 UT. Принято считать, что UT-вариация E_Z проявляется обычно в океане и Антарктиде (Corney et al., 2003), хотя некоторые обсерватории, расположенные на материке так же обнаруживают эту вариацию (Israelsson, Tammet, 2001). Попытка выделить UT-вариацию предпринималась и на Камчатке в обсерватории Паратунка (Бузевич и др., 2003) и, по мнению авторов, была ими обнаружена. Более тщательный анализ данных показал, что этот вывод не совсем корректен. Дело в том, что на Камчатке время в 19 UT приходятся примерно на утренние

часы, совпадающие с восходом Солнца, тогда, как это было показано ещё 50 лет тому назад (Kasemir, 1956), происходит увеличение поля E_Z. Особенности поведения АЭП в моменты Форбуш понижений, а также обнаруженное нами увеличение АЭП в утренние и дневные часы, стимулировали проведение работы, результаты которой представлены в предлагаемой статье.

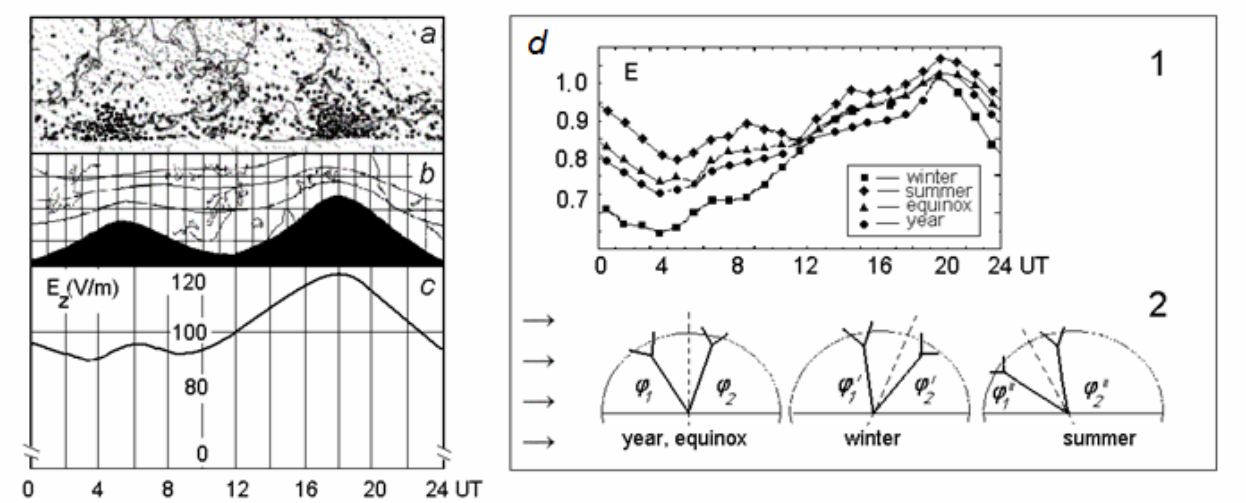


Рис. 70: *a* – Распределение интенсивности космических лучей, полученное с помощью космического аппарата UoSAT в период с 09.1988 по 05.1992 (Glassmeier et al., 2002) в северном полушарии (север – внизу); *b* - Изолиния величины H-компоненты геомагнитного поля 10 мкТл (выделена черным цветом, север – внизу); *c* – Величина АЭП. *d* - Величина АЭП (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.

Глава 13. Климат, роль инверсий геомагнитного поля и вариаций космических лучей.

Климат (греч. κλίμα, κλίματος) - означает *наклон солнца*, иначе сказать, полуденную высоту солнца. Древние географы делили Землю на климатические пояса в зависимости от этого явления и длины дня, принимая в расчет так называемые *астрономические климаты*, зависящие от положения Земли относительно Солнца. В настоящее время называют *физический* или *метеорологический* климат или среднее состояние атмосферы в данной стране, которое зависит, кроме причин астрономических, еще от высоты над уровнем моря, близости моря, расположения горных цепей и т. д. Можно сказать, что климат - выражение совокупности погоды в данное время и в данном месте.

Взаимосвязь между вековыми изменениями климата, солнечной активностью, космическими лучами и другими различными геофизическими параметрами обсуждается геофизиками в течение многих лет. В настоящее время принято считать, что главная причина вековых климатических изменений вскрывается теорией Дж. Кролла (1864) и М. Миланковича (1930). Согласно этой теории климатические изменения на Земле являются откликом на вариации в её орбите. Считается, что причина вариаций, происходящих с основными периодами 19, 23 и 41 тыс. лет, связана с возмущениями орбиты Земли за счет её эксцентриситета (периоды: 95, 136 и 413 тыс. лет), прецессии (19 и 23 тыс. лет) и наклона плоскости эклиптики.

Известно, что в течение последних 400 тыс. лет эволюции, на Земле произошли четыре глобальных похолодания - с периодичностью примерно в 100 тыс. лет (рис. 71) (Petit et al., 1999: Vimeux et al., 2002). Последнее похолодание (ледниковый период) сменилось резким потеплением примерно 12 тыс. лет тому назад, что привело к быстрому таянию льда и увеличению уровня океана на 50 - 100 м. Возможно, именно это событие было отражено в истории как Библейский Великий Потоп.

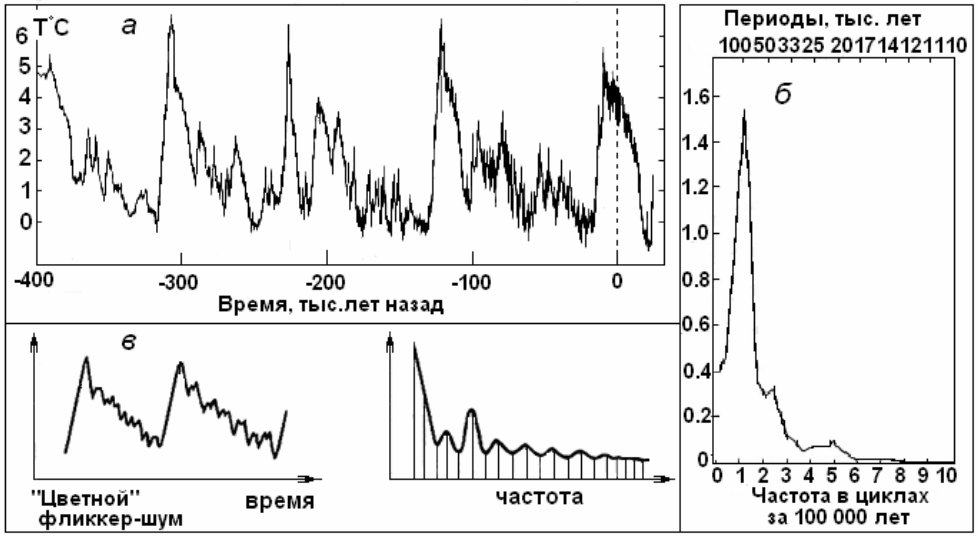


Рис. 71. Изменения температуры в «нормальной» шкале времени – *а*; спектр колебаний климата в плейстоцене по Дж. Имбри и Н. Шеклтону – *б*; «цветной» фликкер-шум и его спектр (Жвирблис, 1983) - *в*.

Что ждет Землю: дальнейшее потепление, или начало похолодания?

Что же происходит в настоящее время на Земле: нагревается она или остывает? По данным американских спутников “Tropical Rainfall Measuring Mission” и “Earth Observing System Terra” предназначенных для изучения баланса поглощаемой и излучаемой Землей энергии, показано, что за период 1985-2000 гг. тепловое излучение Земли возросло более

чем на 5 Вт/м^2, в то время как количество отраженной энергии солнечной радиации упало на 2 Вт/м^2. (Поток солнечной энергии, падающий на Землю составляет 1360 Вт/м^2). Эти данные показывают, что Земля скорее охлаждается, чем нагревается. По-видимому, причина дисбаланса потоков тепла состоит в усилении циркуляции в тропической атмосфере. Очевидно, что в настоящее время обозначить механизм климатических перемен с полной уверенностью - ещё невозможно.

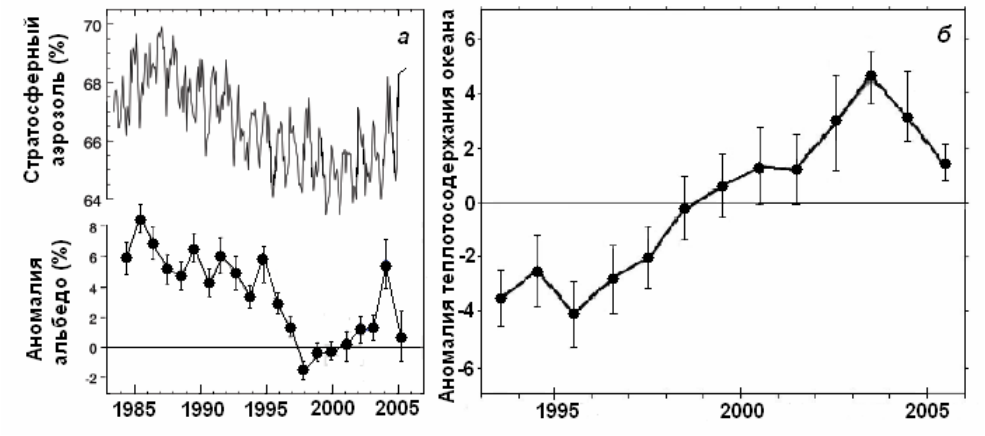


Рис. 72. Вариации концентрации стратосферного аэрозоля % и альбедо Земли (*а*), аномалии теплосодержания океана (*b*).

Этот вывод был подкреплен исследованиями, проведенными в течение последних пяти лет (рис. 72-а). Выяснилось, что Земля все интенсивнее отражает солнечные лучи. Аналогичным образом ведет себя и теплосодержание океана, в то время как температура Земли продолжает увеличиваться. Каким образом происходит непрерывное потепление, если количество солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, сокращается?

Головко рассматривает наличие отрицательного тренда коротковолнового отраженного солнечного излучении как климатический сигнал, показывающий, что Земля не находится в тепловом равновесии с окружающим пространством. Когда будет исчерпана аккумулирующая способность Мирового океана, может начаться резкое изменение климата, например, - увеличение скорости потепления. По нашему мнению, из неустойчивого положения климата на Земле возможны два выхода. О первом говорит автор, однако, анализ палеоданных по температуре и концентрации стратосферной пыли позволяет рассматривать и другой ход развития событий.

Обратимся к данным по палеоклимату. Оказывается, что такая ситуация происходила и ранее. Конечно, точно определить величину альбедо Земли примерно 100 тыс. лет тому назад невозможно. Однако если допустить, что альбедо может быть связано с концентрацией пыли в стратосфере, то окажется, что в конце периода потепления, концентрация пыли, после достижения нулевого значения, уже начинает возрастать, хотя температура ещё продолжает увеличиваться, как бы «не замечая» возрастания пыли, иначе, переводя на современную ситуацию, «не замечая» возрастания «альбедо». Связь альбедо с концентрацией стратосферного аэрозоля подтверждает рис. 72-а и 72-б, а связь температуры и концентрации пыли - общеизвестна. По всей видимости, обсуждаемое явление связано с тем, что Земля в такой ситуации нагревается не столько солнечным излучением, которое уменьшается, сколько переносом тепла к твердой Земле от океана.

Глава 14. Расширяющаяся Земля и её автор - «еретик» С. Уоррен Кэрри.

Заканчивая эту книгу, посвященную развитию модели расширяющейся горячей Земли, нельзя не упомянуть об известном геологе - еретике С. У. Кэрри – главном специалисте по расширяющейся Земле, авторе фундаментальных книг и статей на эту тему. Цитирую его вторую книгу:

«С еретиками в науке - сущая беда. Их шпыняют, над ними надсмехаются, к ним относятся презрительно... Однако, статус "еретика" получает почти всегда тот ученый, который своими исследованиями оказался "не попавшим" в широкий поток традиционных - считающихся "правильными" - направлений и взглядов нормальной науки. В нормальной науке работает 95-99% ученых, а потому еретикам очень тяжело. Где уж и удается ученым-еретикам "оттягиваться", так это в научно-популярных статьях и книгах... Вся история науки пестрит примерами, когда над еретиком потешались, - если он еще не достиг звездной величины, либо просто активно противостояли, если "еретик" к тому моменту уже имел солидный авторитет. Мы хотим примеров? - Пожалуйста:
- Тихо Браге был великим астрономом, но он с презрением отверг идеи Коперника;
- Ньютон - очевидно, самый выдающийся ученый всех времен - убрал портрет Гука со стены здания Королевского общества и игнорировал его далеко идущие идеи в области геологии.
- Вернер был поистине величайшим в свое время преподавателем геологии, но его влияние на толпы сбегавшихся на его лекции студентов сдерживало развитие основных вопросов в геологии в течение нескольких десятилетий.
- А.Эйнштейн в течение 17-ти лет был в одиночестве, веря в фотон.
- А.Эйнштейн и сам был категорически против идей квантовой механики и идей Н.Бора о принципе дополнительности.
- П.Дирак повергался шуткам друзей-физиков (Н.Бор и В.Паули!) за свою идею "физического вакуума".
- Антуан Лавуазье, ведущий французский минералог и химик своей эпохи, отвергал свидетельства крестьян, приносивших ему метеориты, которые они видели, падают с неба и светятся в полете: "Камни не могут падать с неба, там нет ничего такого!"
- Лорд Кельвин, виднейший физик XIX века, на десятилетия закрыл путь признанию огромной длительности геологического времени.
- Благодаря работам Бейли Уиллиса громадный скачок вперед сделала структурная геология, но он осыпал насмешками и издевками идею дрейфа материков и в большой степени ответствен за слепоту целого поколения геологов».

- В течение многих лет подвергался насмешкам один из известнейших геологов XX столетия - У. Кэри за свою идею расширяющейся Земли, решающую чуть ли не все основные проблемы геологии. (http://www.integro.ru/system/eretic.htm).

Сэмуэль Уоррен Кэри родился 1 ноября 1911 на ферме в трех милях от небольшого городка Campbelltown (в New South Wales - юго-восточном штате Австралии в 50 км от Сиднея). В этот городок его родители переехали, когда сын пошел в школу. В школе Кэри больше всего интересовали физика и химия. Эти предметы определили его интересы при поступлении в университет Сиднея. Математика была третьим обязательным предметом в университете. Четвертым обязательным предметом - Кэри выбрал геологию. Дело в том, что, учась в университете, он прочитал книгу Альфреда Вегенера «The Origin of Continents and Oceans», недавно (1924) переведенную на английский язык. Идея движущихся материков захватила молодого геолога на всю его жизнь. Необходимо учесть, что в то время когда Кэри читал эту книгу, идеи Вегенера большинством геологов были неприемлемы. Кэри окончил университет и получил степень магистра (MSc) в 1934.

Кэри: в Новой Гвинее в 1942, в расцвете сил, медаль имени Кэри.

Во время второй Мировой войны Кэри служил лейтенантом в австралийском специальном подразделении особых войск Z Force, занятым дерзким планом минирования кораблей во вражеской гавани с помощью небольших групп. Эта операция была завершена, но Кэрри секретно проверил его план, проникнув в Таунсвилльскую гавань и разместив холостые круглые мины на американские корабли.

После войны Кэри стал известным специалистом в области геологии и теории возникновения Земли. Его основные результаты в виде новых теорий и предложений часто опережали общепринятое мнение. К картам и данным по его полевым работам в Новой Гвинее позднее обращались инженеры и коллеги. Он поддерживал гипотезу Альфреда Вегенера о движении материков. Когда гипотеза Вегенера стала общепринятой, Кэри предложил альтернативную модель расширяющейся Земли, которая имеет много общего с существующей теорией тектоники плит: разделение суперконтинента и дрейф его частей, образование новой коры в глубинно океанических хребтах и многие другие явления геологически активной коры и мантии. В теории расширяющейся Земли Кэри - нет субдукции. Похожая модель расширяющейся Земли была предложена гораздо раньше в 1933 году в работе геолога Отта Кристофа Хильгенберга "Vom wachsenden Erdball" ("Расширяющаяся Земля"). С этой работой Кэри познакомился только 1956 году.

Несмотря на общемировое признание парадигмы субдукциии, с именем Кэри связаны важные результаты по обоснованию движения плит и континентального дрейфа. В 1946 году он стал профессором университета Тасмании. В этой должности Кэри проработал 30 лет. В 1977 году Кэри получил орден Австралии за научный вклад в геологию.

Публикации. Книги:

The Expanding Earth, 448 pp., Elsevier, Amsterdam 1976
Theories of the Earth and Universe, 206 pp., Stanford University Press. 1988
Earth Universe Cosmos - University of Tasmania. 1996

Статьи:

1958: The tectonic approach to continental drift. In: S. W. Carey (ed.): Continental Drift – A Symposium. University of Tasmania, Hobart, 177-363 (expanding Earth from p. 311 to p. 349)
1961. Palaeomagnetic evidence relevant to a change in the Earth's radius. Nature. 190, pp 36.

1963: The asymmetry of the Earth. Australian Journal of Science 25, pp 369-383 and 479-488.
1970: Australia, New Guinea, and Melanasia in the current revolution in concepts of the evolution of the Earth. Search 1 (5), pp 178-189
1975: The Expanding Earth – an Assay Review. Earth Science Reviews, 11, 105-143.
1986: La Terra in espansione. Laterza, Bari.

Первая книга Кэри. Я стал интересоваться физикой расширяющейся Земли по настоятельной рекомендации геолога академика Ю.А. Кузнецова в 1980 году, уже после защиты докторской диссертации в 1978. Пришедшая мне в голову, сразу после постановки задачи, идея расширения Земли, образовавшейся в результате её быстрого сжатия за счет самогравитации, - базировалась на известных представлениях о физике явлений, связанных с введением в вещество энергии высокой плотности. Согласно теории Зельдовича и Райзера, если в вещество вводится энергия, удельная величина которой равна удвоенной теплоте испарения, вещество превращается в горячий пар, точнее в частично ионизованную плотную плазму. После сжатия до высокой плотности, если силы сжатия ослабевают, или уравновешиваются внутренним давлением газа (как в нашем случае), вещество начинает адиабатически расширяться и при этом охлаждаться, переходя в конденсированное состояние и, охлаждаясь дальше, в - кристаллическое. Физика этих явлений хорошо известна и придумывать мне ничего нового, не было нужды. Вещество в состоянии переуплотненной плазмы (т.н. астрофизической плазмы), может достигать очень высокой плотности.

Например, в экспериментах по лазерному синтезу, проводимых в ФИАНе, на осколок бутылочного стекла направляли пучки мощных лазеров таким образом, чтобы пучки равномерно облучали мишень со всех сторон. Вещество мишени испарялась и сжималась образующейся в этом эксперименте сходящейся к центру ударной волной. При этом оно сжималось до плотности в 100 г/см^3. Таким образом, физика расширения при охлаждении нагретого до высокой температуры вещества - была известна, мне предстояло только оценить, выполняется ли критерий Зельдовича для Земли. Для Земли критерий - действительно выполняется.

Меня заинтересовал вопрос, насколько идея расширения Земли не противоречит геологическим данным. Мне повезло, т.к. на следующий год (1981), я купил книгу С. Кэрри: «Расширяющаяся Земля». Написана она геологом совсем не чуждым физике. Заканчивая свою замечательную книгу, Кэри написал: “Я знаю, что Земля расширяется, но я не знаю почему” (Empirically I am satisfied that the Earth is expanding. I do not know). Я давал прочитать эту книгу всем знакомым геологам и по прочтении задавал один и тот же вопрос. Никто из моих знакомых геологов не нашел в книге геологических противоречий. Незадолго до кончины Ю.А.Кузнецова, я принес книгу ему. По телефону он сообщил мне, что книга ему как геологу – понравилась.

Хочу сказать, что именно в книге Кэрри я нашел массу примеров, на которые ссылаюсь в своих книгах и статьях. Приведу пару ссылок. Во-первых, речь пойдет об «убийственной» для плитной тектоники статье Мезервея. Во-вторых, я ссылаюсь на работу Хоупа по поводу влияния глобальных магнитных аномалий на дрейф северного магнитного полюса и т.п. Как я понял по прошествии лет и Кэри, и Мезервей, и Хоуп, да и я сам – все мы еретики.

Причины расширения Земли.

Я написал Кэрри несколько писем, и он на них ответил. Кэрри высказался, что он приветствует вливание свежих сил в решение проблемы расширяющейся Земли. Когда я рассказал ему основную идею, в основе которой была использована далеко не тривиальная физика, он написал мне, что мою идею он не понимает, и ему больше импонирует идея, высказанная ещё в 1889 г. русским ученым И.О. Ярковским. Кэри в

одном из своих писем сообщил мне, что в 1991 выходит одна из его книг в переводе на русском. В этой книге он писал, что из пяти возможных причин расширения Земли он принял пятую, которая показалась ему более обоснованной, чем другие.

Вторая книга Кэри. Пять возможных причин расширения.

Кэри рассматривает такие возможные причины расширения Земли:
1. пульсации размера – альтернатива расширению, но не объяснение причины,
2. присоединение к Земле метеоритов,
3. ядро из сверхплотного вещества,
4. уменьшение гравитационной постоянной со временем,
5. вековое увеличение массы.

Первую, вторую и четвертую причины Кэри обоснованно - отвергает. Отвергает и третью. Кэрри в своей книге пишет (с. 355-356):

Третья причина.

«Третья и наиболее популярная среди ученых теория постулирует, что первоначально у Земли было ядро из сверхплотного вещества, которое медленно превращалось "нормальный" материал, вызывая постепенное расширение планеты. Различные модели такого рода предлагались многими авторами из США, Канады, Австралии, Венгрии, Великобритании, Германии и России. В предыдущих главах этой книги было сказано, что твердые вещества в результате перекристаллизации по мере возрастания всестороннего давления превращаются во все более плотные материалы:
графит становится алмазом с увеличением плотности на 50%, кварц переходит в коэсит, из него - в стишовит с таким же уплотнением, базальт (состоящий из полевого шпата и авгита) превращается в более плотный эклогит, состоящий из граната и жадеита. Давления на глубинах всего в несколько десятков километров достаточно, чтобы вызвать такие изменения, и предполагается, что при тех давлениях, которые достигаются в ядре, плотность может быть во много раз больше. Конечно, фантастически высокие плотности существуют, как полагают, в белых карликах и нейтронных звездах, но критики утверждают, что давление внутри Земли никогда не было столь большим, чтобы могло появиться постулируемое сверхплотное ядро.

Стремясь уйти от ударов критики, некоторые ученые заявляют, что сверхплотное ядро было унаследовано от какой-то более ранней стадии (до того, как Земля выделилась из своего звездного прародителя) и оставалось с тех пор в метастабильном состоянии. Например, метастабильно обыкновенное стекло: его девитрификация, т.е. переход в кристаллическое состояние, происходит на протяжении нескольких столетий. Точно так же метастабильны на земной поверхности эклогит, стишовит и алмаз, однако время релаксации (число лет, за которое рекристаллизация захватит около трети всего вещества) для них очень велико. Поэтому, согласно данной гипотезе, вещество метастабильного сверхплотного ядра постепенно переходило в менее плотные материалы, что вызывало значительное расширение Земли. Остается, однако, роковое препятствие для всех таких теорий - постулат о том, что первичная Земля обладала такой же массой, как сейчас, но ее диаметр был вдвое меньшим. В этом случае сила тяжести на поверхности была бы примерно вчетверо больше современного значения, и это проявилось бы во многих геологических процессах. Профессор Стюарт из Рединского университета в Англии отверг идею расширения Земли именно по этой причине. Но важной предпосылкой его позиции было допущение, что масса Земли существенно не менялась».

Комментарии. Последняя фраза Кэри, по всей видимости, - ошибочна. Выше мы обращались к работам Стюарта, который пытался выяснить, менялось ли гравитационное поле Земли в процессе её эволюции? Ответить однозначно на этот вопрос нельзя и в наше время. Прошло 40 лет 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 годы, 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.

Пятая причина. «Предположение о том, что расширение вызвано некой космологической причиной, связанной с вековым увеличением массы, впервые было высказано в России и затем постоянно развивалось в этой стране (Ярковский в 1889 г. и его последователи - Кириллов, Нейман, Блинов и Веселов). В 1933 г. в Берлине независимо Хильгенберг пришел к идее о вековом возрастании массы, а в 1976 г. к этому же выводу пришел и я, убедившись в неприемлемости высоких значений силы тяжести на поверхности Земли, когда ее диаметр был меньше. Хотя другие объяснения выше, хорошо обоснованы и предполагаемые в них процессы должны были в какой-то мере способствовать расширению, ограничения на величину силы тяжести на поверхности в прошлом не оставили мне альтернативы, кроме как присоединиться к русским ученым и Хильгенбергу в их заключении, что не только объем Земли увеличивался, причем с возрастающей скоростью, но и ее масса.

Тогда же я понял, что эта загадка относится не только к Земле. Расширение Вселенной было открыто полвека назад, но следствия закона Хаббла (о котором будет говориться позже в этой главе) заставили меня сделать вывод, что все тела во Вселенной испытывают такое же ускоряющееся увеличение массы. Поэтому чтобы понять расширение Земли, надо стремиться понять расширение Вселенной. Должен ли я, будучи всего лишь геологом, просто развести руками и оставить решение проблемы расширения Земли космологам? К сожалению, если бы я так поступил, то интерес к этому делу зачах бы и увял.

С академической точки зрения наука делится на физику, химию, геологию, геофизику, астрономию и т. д. Развитие науки сейчас идет в направлении все большей специализации, и ученые, знание которых в других областях все сокращаются, с насмешкой отзываются о тех, кто вторгается в чужие сферы деятельности, и не терпят их вмешательства. Доктрины вырастают в убеждения и преподносятся другим уже как факты. Фундаментальные проблемы, как правило, замалчиваются и откладываются на неопределенное время. Но Природа сама по себе не знает таких барьеров. Вся наука - это по существу не что иное, как просто здравый смысл и, будучи освобождена от ученого жаргона и непонятных обозначений, должна быть доступна для понимания любого мыслящего человека. Ученые обязаны обеспечивать согласованность представлений, причем не только в пределах собственной специальности, но и по отношению ко всей природе. Для решения наиболее фундаментальных проблем требуется приток информации из различных источников. Данные геологии содержат столь же важные обоснования для формулирования новых физических законов, сколь и физические лабораторные эксперименты; более того, масштабы размеров, массы и времени в геологии выходят далеко за пределы, достижимые в лабораторных опытах. Физика себя обедняет, если пренебрегает потенциальным вкладам геологии. Так было, когда Ньютон с презрением относился к доводам Гука, Кельвин игнорировал выводы геологов о возрасте Земли, Джеффрис отвергал идею о материковым дрейфе, а современные палеомагнитологи упрямо строят свои траектории миграции палеополюсов, не допуская значительного изменения земного радиуса. В 1970 г. я закончил свою президентскую речь на собрании Австрало-Новозеландской ассоциации содействия развития науки следующими словами: «Наши предки в течение тысячелетий считали очевидной истиной, что Земля плоская. Позднее мы считали очевидным, что - поскольку Солнце, Луна и звезды восходят на востоке и заходят на западе - Вселенная обращается вокруг Земли.

Тысячелетиями мы считали очевидным, что диаметр Земли существенно не изменился со времени ее первичного формирования, кроме как в результате сжатия при остывании. Но теперь мы обнаруживаем, что Земля постепенно расширялась и продолжает расширяться с возрастающей скоростью. Чем скорее физики усвоят урок, вытекающий из таких примеров, тем скорее они найдут новые законы, необходимые для объяснения этих фактов. Здесь лежит ключ к важнейшему новому открытию» (с.357-358).

Общее уравнение для законов Ньютона и Хаббла.
В своей книге Кэрри 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. 73.) 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.

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».

Рис. 73. Модифицированный закон тяготения.

Комментарии. Идея творения материи, которую принял Кэри, связана с увеличением массы Земли со временем. Направление обосновано Ярковским, оно развивалось Хильденбергом, И.В.Кирилловым, В.Б.Нейманом, В.Ф. Блиновым (на Украине) и др. 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.

Замечу, что идея увеличения массы M звезды или планеты или произведения массы на гравитационную постоянную MG была отвергнута астрономами, которые показали, что и M и GM постоянны с точностью до 10^{-15} в год. По модели Кэри, величина $dM/dt{\cdot}M$ должна быть порядка $\equiv 10^{-8}$ год$^{-1}$, что показывает её очевидную ошибочность. Но то, что Земля расширяется – очевидно. Этот факт доказывается в настоящей книге.

Кэри заканчивает свою книгу так:
«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 Симпсон и Дж. Уилсон, не преминули внести свою лепту в беспощадную травлю отвергаемых ими новых идей. Дело не 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 также 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 и энтузиазмом или упрямством, с какими 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» (с. 399).

Заключение. Популярная геономия.

Обсуждая проблемы физики Земли, приходим к выводу, 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. Вероятно эти закономерности можно отнести к такой науке как геономия:

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 материков вдоль по градиенту высоты геоида. Высота геоида (как положительная, так и отрицательная) при этом - уменьшается.

3. Внутренняя тепловая энергия планеты и спутника реализуется путем функционирования 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 раз выше, чем второго. Энергия ФП расходуется на создание теплового потока, дрейф континентов, образование океанов, генерацию магнитного поля, сейсмичность, вулканизм и т.п.

4. Геомагнитное поле возникает за счет переноса вещества в проводящей среде области фазового перехода на границе внутреннего ядра. Здесь возникает образование и разделение электрических зарядов. Суточное вращение зарядов приводит к генерации очень слабого дипольного магнитного поля, которое усиливается за счет гидродинамических процессов, протекающих в области F-слоя. Смена направления действия ФП (смена режима конденсации на режим испарения) приводит к смене полярности радиального электрического поля и, как следствие, к инверсиям и экскурсам геомагнитного поля. 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. Модель геомагнитного поля находит простое и очевидное решение таких вопросов, как современный дрейф магнитных полюсов и прогноз их местоположения, физика инверсий и длительных

перерывов между инверсиями – суперхронов, природа связи «суперхрон-суперплюм», физика магнитного поля Меркурия и т.п.

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 раздвигаются один от другого. 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. При этом возрастает размер и масса мантии и количество воды в океанах. Этот подход решает, например, такую проблему: есть ли на Луне и Марсе вода, а если есть, то откуда она взялась и сколько её на планете или спутнике?

7. Климат Земли определяется физикой процессов, происходящих в водной среде атмосферы под влиянием Солнца, геомагнитного поля, вулканизма и космических лучей (как солнечных, так и галактических). Существенную роль в формировании климата играет атмосферное электрическое поле Земли, которое, с одной стороны, является «продуктом» климата, а, с другой, - климатообразующим фактором.

8. 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.

Направление дальнейших исследований.

Происходящее на Земле явления, такие как землетрясения, вулканы, циклоны и антициклоны в атмосфере, в океане или во внутреннем ядре Земли, свечения и странные звуки в этих же оболочках и т.п. обладают некоторым свойством, состоящем в том, что множество однотипных процессов происходят одновременно и синхронно. Такие явления, - 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 сцепленности (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, 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.

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 ещё начал заниматься физикой 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. Таким образом, мы имеем основание полагать, что дальнейшее развитие физики Земли будет базироваться на использовании подходов квантовой механики в решении задач классической физики, как это происходит в настоящее время в отрасли кибернетики, занимающейся проблемой квантовых компьютеров, в квантовой биофизике, квантовой химии и т.п.

Остановимся на ещё одном перспективном направлении дальнейших исследований. Как мы неоднократно отмечали, все явления, происходящие на Земле, как открытой самоорганизующейся структуре, описываются фликкер-шумом и имеют зависимость амплитуды A от частоты повторения f как: $A \sim f^{-D}$. В логарифмическом масштабе, - эта зависимость представляет собой прямую (рис. 60-*b*). На практике такой зависимости никогда не наблюдается. Эта прямая линия на больших амплитудах резко увеличивает наклон. Этот эффект получил название *cutoff*. Он показывает, что какой бы малой величиной не была частота f, величина A всегда имеет ограничение. Это означает, что существует ограничение на магнитуду землетрясения, означает так же, что не может образоваться бесконечно большого месторождения полезных ископаемых и т.п. Компьютерное моделирование этого явления, называемой самоорганизованной критичностью, показало, что эффект *cutoff* связан с размером системы. В нашем случае, это ограничение связано с размером Земли. Но физика такой связи пока не совсем ясна. Казалось бы, Марс меньше Земли, а высота гор (кстати, тоже фрактальная зависимость) на Марсе значительно превышает высоту гор на Земле, и т.д. Ясное понимание физики ограничения амплитуды событий, происходящих на Земле, это тоже перспективное направление исследований физики Земли.