

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН**

**В.В. Кузнецов**

## **ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ГОРЯЧЕЙ ЗЕМЛИ**

**Ответственный редактор чл.-корр. РАН А. В. Николаев**

**ИКИР, Камчатка, с. Паратунка.**

**2008**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора.....	4
Введение	
Глава I. Земля: горячая или холодная? .....	12
I.1. Земля: горячая или холодная; плутонисты или нептунисты.	
I.2. Почему Земля холодная?	
I.3. В чем ошибочна холодная модель и нужна ли новая физика Земли?	
Литература	
Глава II. Образование и эволюция Земли и планет.....	32
II.1. Сценарии возникновения Солнечной системы.	
II.2. Фрактальный характер расстояний планет от Солнца.	
II.3. Плотность вещества в Солнечной системе.	
II.4. Сжатие диска и критерий Джинса.	
II.5. Возможный механизм образования Солнечной системы.	
II.6. Почему не образовалась планета Фазтон?	
II.7. Куда “пропал” момент?	
II.8. Единая последовательность: звезда - планета – спутник.	
II.9. Сколько воды на Луне и Марсе?	
II.10. Есть ли другие планетные системы?	
Литература	
Глава III. Модель горячей Земли.....	56
III.1. Суть модели горячей Земли.	
III.2. Эволюция параметров Земли в контексте горячей модели.	
III.3. Упругие свойства вещества внутреннего ядра.	
III.4. Принцип минимизации гравитационного потенциала – основной закон эволюции планет.	
Литература	
Глава IV. Термодинамика горячей Земли.....	109
IV.1. Оценки величин термодинамических параметров.	
IV.2. Уравнение состояния вещества.	
IV.3. Распределение температуры.	
IV.4. Скорости процессов конденсации и испарения.	
IV.5. Цикличность.	
IV.6. Гидродинамика F-слоя.	
Литература	
Глава V. Химические аспекты Земли .....	130
V.1. Химический состав планеты.	
V.2. Роль водорода.	
V.3. Теория флуктуаций и концентрация элементов в земной коре.	
V.3. Проблема гранитов и базальтов.	
V.4. Нефть и газ в контексте модели горячей Земли.	
V.5. Могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли?	
Литература	

Глава VI. Геомагнитное поле.....	157
VI.1. Модели и гипотезы.	
VI.2. Модель генерации дипольного поля горячей Земли.	
VI.3. Магнитные аномалии, джерки, фокусы векового хода.	
VI.4. Движение магнитных полюсов.	
VI.5. Местоположение источника магнитного поля.	
VI. 6. Обсуждение модели.	
VI. 7. Магнитное поле планет и спутников.	
Литература	
Глава VII. Геодинамика горячей Земли.....	210
VII.1. Геодинамика внешнего ядра и фрактальный характер инверсий.	
VII.2. О чем говорят параметры фигуры Земли $\epsilon = 1/298$ , $C/Ma^2 = 0.333$ ?	
VII.3. Расширяющаяся Земля и парадокс Мезервея.	
VII 4. Парадокс в движении палеомагнитных полюсов.	
VII.5. Спрединг и субдукция в модели горячей Земли.	
VII.6. Течение литосферы и образование гор.	
VII.7. Высота гор.	
VII.8. Геодинамика и фундаментальные характеристики Земли.	
Литература	
Глава VIII. Сейсмичность Земли и физика землетрясения.....	245
VIII. 1. Образование акустически активных когерентных структур в литосфере.	
III.2. Ударно-волновая модель очага землетрясения.	
VIII.3. Особенности сильных движений при землетрясении.	
VIII.4. Глубокофокусные землетрясения.	
VIII.5. Афтершоки.	
VIII.6. К вопросу о прогнозе.	
VIII.7. Обсуждение ударно-волновой модели.	
Литература	
Глава IX. Солнечно-земные связи .....	287
IX.1. Фрактальные свойства и связь геооболочек.	
IX.2. Идеи самоорганизованной критичности в атмосфере.	
IX.3. Связь вариаций климата с экскурсами геомагнитного поля.	
IX.4. Роль инверсий и экскурсов геомагнитного поля в эволюции человека.	
IX.5. Электрические явления в атмосфере и унитарная вариация.	
Литература	
Заключение.....	358

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Эта книга - итог многолетних исследований автора, развивавшего свою независимую физическую концепцию происхождения и эволюции Земли. Создание этой концепции происходило в обстановке ожесточенных научных споров относительно основных гипотез, сущностей, лежащих в основе развиваемой космогонической и тектонической концепции: была ли Земля холодной или горячей, увеличила ли она в ходе геологической эволюции свой радиус.

Представления о происхождении Земли, ее эволюции от ранней фазы до наших дней постоянно изменяются, находятся в противостоянии и борьбе. Тектонические концепции, основываясь на практически одинаковых исходных данных - геологических свидетельствах и физических характеристиках Земли и планет, разнятся весьма сильно. Среди приверженцев различных, иногда противоположных точек зрения, известные геологи, геофизики, механики и физики. Непримируемая борьба ведет свое начало от споров непутистов и плутонистов, катастрофистов и эволюционистов. Как теперь, так и тогда, спорам не были свойственны попытки к примирению. Активная роль в них принадлежит физикам и математикам, которые имеют привилегию объявлять табу и на идеи геологов, и на их гипотезы.

Последние десятилетия отмечены почти полной победой гипотезы (которую уже стали называть теорией) глобальной плитовой тектоники, и гипотезы "холодной Земли". Господствующий методический принцип - примат физики над геологией: геологические свидетельства в пользу той или иной гипотезы признаются неверными, если они не могут быть объяснены физикой. Отсюда возникает часто используемый аргумент: "этого не может быть, потому что этого не может быть никогда". Такая логика постоянно мешала развитию гипотезы расширения земли, в свое время закрыла плодотворную идею "западного дрефта" литосферы и еще ряд геологических идей.

Так же в последние годы наблюдается рост противоречий, связанных с получением новой геологической информации, противоречащей гипотезе плитовой тектоники, возвращающей нас к модели "горячей Земли"; все слышнее становятся голоса геологов в пользу идеи "расширяющейся Земли".

Автор этой книги - физик, который, в отличие от большинства его коллег, относится с доверием к геологическим данным и стремится не к их критическому анализу с точки зрения общепринятых физических позиций, а к созданию физической модели, наиболее полно объясняющей неопровержимые геологические и геофизические данные о строении Земли, ее динамике и эволюции. Он нашел убедительное физическое объяснение феномену увеличения радиуса Земли и тем лишил противников гипотезы аргумента "этого не может быть потому, что не имеет физического объяснения".

На протяжении 20 лет автор работал в обстановке жесткой критики со стороны сторонников общепринятых представлений о "горячей Земле", мобилистов, которые построили свои глобальные тектонические модели на земном шаре постоянного радиуса. Хотя и считается, что критика - это необходимый и полезный элемент научного прогресса, однако история науки показывает, что это не всегда так: действительно полезный элемент - только критика умная, объективная, конструктивная. Именно такой и является критика общепринятых физических и геологических представлений, которая отстаивает новые физические и геологические идеи автора.

Книга обращена к широкому кругу читателей, которые не должны остаться к ней равнодушными. Геологи и геофизики найдут в ней физические объяснения многих непонятных фактов, касающихся строения, динамики и эволюции Земли; физики - новые подходы к решению задач геологии и физики Земли; просто интересующийся читатель - новые представления о происхождении и жизни нашей планеты, образования и эволюции Солнечной системы.

А.В. Николаев.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Науки о Земле и Космосе, об их устройстве и взаимосвязи относятся к разряду самых древних. Однако и в наши дни физика Земли, астрономия и астрофизика не дают однозначного ответа на многие вопросы, касающиеся образования, эволюции и внутреннего строения звезд, планет и спутников... Благодаря успехам астрономии в настоящее время с достаточно высокой точностью определены размеры, масса, моменты и средняя плотность планет и спутников, скорость их вращения вокруг Солнца и собственной оси. Однако даже такая деталь, как различие в средней плотности между планетами, не находит правдоподобного объяснения. Более 200 лет тому назад обнаружено, что орбиты планет, а точнее, большие полуоси орбит, подчиняются закону (правилу) Тициуса-Боде. Позже выяснилось, что этому же правилу подчиняется расположение орбит спутников Юпитера, Сатурна и Урана. Этот факт, казалось бы, свидетельствует, что Солнце, планеты и их спутники образовались в результате действия какого-то одного механизма. Однако и здесь, несмотря на широкую известность этого факта, он так и остался необъясненным.

Известно, что в течение всей истории Земли на ней происходили тектонические процессы: вулканизм, землетрясения, образование гор и впадин, движение материков и т.д. Однако до сих пор нет ясного представления о внутреннем источнике энергии Земли. Известно, что поверхность Земли пронизывает идущий изнутри тепловой поток, величина которого примерно постоянна по всей поверхности и приближенно одинакова на материках и океанах. Считается, что тепловой поток обязан своим происхождением радиогенному источнику, однако последние исследования по радиоактивности глубинных пород ставят под сомнение и эту гипотезу.

Земля обладает магнитным полем, причем выяснилось, что самые древние породы, обнаруженные на Земле и содержащие магнетит, показывают, что магнитное поле уже присутствовало на Земле, по крайней мере, 4 млрд. лет назад. Дипольное магнитное поле обнаружено почти на всех планетах Солнечной системы. Там же, где нет поля дипольного, т.е. генерируемого в момент наблюдения, обнаружены его следы в т.н. "каменной летописи". Поразительным фактом, обнаруженным в самое последнее время благодаря успехам в освоении космического пространства, оказывается то, что дипольное магнитное поле было раньше не только на Марсе, не только на Луне, но и на спутниках Юпитера: Ио, Ганимеди, Калисто, причем, на некоторых из них оно существует и в настоящее время. Эта загадка не имеет решения в рамках существующих представлений о Земле и планетах.

Развитие изотопных методов позволило оценить время образования Земли, Луны и Солнца. Оказалось, что Солнце, Земля, другие планеты и их спутники образовались одновременно 4.5 млрд. лет назад.

Модель холодной Земли общепринята и не подвергается сомнению. Остановимся на сути модели: Земля образовывалась путем «склеивания» холодных частиц (планетезималей) в течение 100 млн. лет, иначе тепло, выделяемое при этом диссипативном процессе, не будет успевать отводиться за счет радиационного охлаждения, и мы вынуждены прийти к горячей модели. Рассматривается два сценария образования Земли: согласно первому, сначала образовалось железное ядро, а затем на него стали «падать» силикаты, формируя мантию. Согласно второму, - Земля была «склеена» из силикатов и железа, потом «внутренности» Земли нагрелись, произошла дифференциация и выделилось жидкое ядро, центральная часть которого кристаллизовалась (?). В каждом из сценариев, внешнее ядро Земли железное, расплавленное. В нем возникает конвекция, причем такого вида, что хорошо проводящая жидкость (железо) захватывает (вмораживает) силовую линию магнитного поля из

окружающего Землю космоса и за счет эффекта гидромагнитного динамо происходит усиление и преобразование этого «затравочного» поля - в геомагнитное.

Дрейф материков обязан крупномасштабной конвекции, причина которой так и не выяснена, нет ни одного доказательства наличия такой конвекции на Земле. Тепловой поток, по модели, обязан наличию радиоактивных элементов и т.п.

подавляющее большинство геологов, интересующихся проблемами внутреннего устройства Земли, не сомневаются в том, что ядро Земли железное, а внутреннее тепло обязано радиоактивному распаду, иначе говоря, не сомневаются в том, что она «холодная». Тем не менее, анализируя геологический материал, реконструируя земной ландшафт по «остаткам» гор и вулканов, изучая палеомагнитные «записи» и химический состав пузырьков газа и воды, сохранившихся с давних времен в твердых породах, многие приходят к выводу, что Земля на ранних этапах своей эволюции была совсем не такой как сейчас.

Обратимся к статье известного русского геолога академика А. Л. Яншина, «Вероятная эволюция геофизических полей в истории Земли», опубликованной в сборнике «Эволюция геологических процессов в истории Земли» в 1993 г., посвященной эволюции геофизических полей в истории Земли и процитируем некоторые его высказывания:

1. «... на протяжении первых трех миллиардов лет истории Земли высокие горы на её поверхности не существовали»;

2. «... 2.2 млрд. лет, температура морской воды была определена в интервале от 50 до 60 °С»;

3. «... в раннем докембрии существовало более близкое к поверхности Земли положение более горячей, чем сейчас, астеносферы»;

4. «... приливные волны в литосфере, ... были, вероятно, основным динамическим фактором тектонических процессов на протяжении всего раннего архея, т.е. во времена, отстоящие от наших дней более чем на 3 млрд. лет»;

5. «... 1.8 млрд. лет тому назад скорость вращения Земли была в 2 раза больше современной ...»;

6. «... изучение напряженности магнитного поля Земли по палеомагнитным данным показывает, что оно не оставалось в истории Земли постоянным, в целом поле в более давние времена значительно возрастало».

Предположим, что все сказанное о раннем периоде эволюции Земли, верно. Вообще-то, у нас нет оснований, сомневаться в том, о чем пишет Яншин, так как он приводит геологические аргументы (опущенные нами здесь), подтверждающие каждую из приведенных здесь цитат. В таком случае, каким образом все перечисленные нами факты (с первого по шестой) можно «загнать» в «прокрустово ложе» общепринятой научным сообществом модели «холодной» Земли? Ведь согласно этой модели, на Земле практически «всегда было так, как сейчас».

«Переведем» сказанное Яншиным на язык физики Земли и представим, - какие же геофизические параметры и каким образом могли изменяться в течение времени её эволюции:

1) уменьшалась величина силы тяжести (например, за счет возрастания радиуса Земли);

2) земная поверхность остывала (Земля раньше была «горячее»);

3) температурный градиент раньше был выше (Земля горячее, а радиус меньше);

4) отсутствовала причина, вызывающая активную тектонику (если причина активной тектоники связана с расширением Земли, а Земля 3 млрд. лет назад еще не начала интенсивно расширяться);

5) одна из причин - радиус Земли был меньше;

б) одна из возможных причин - меньшая величина земного радиуса.

Возможно, наша интерпретация и комментарии относительно высказываний академика Яншина несколько предвзяты и не совсем объективны. Причина такого отношения станет очевидной после прочтения этой книги и ознакомления с моделью горячей Земли. Ведь, по сути, наша модель - модель расширяющейся Земли. Когда я много лет тому назад спросил А. Л. Яншина, как он относится к идее расширяющейся Земли, он ответил, что это абсолютно бредовая идея. Своё отношение к концепции расширения Земли Яншин аргументировал тем, что “мы же видим, что Земля не расширяется сейчас, значит, она не расширялась и раньше”. Я не нашел сразу, что ответить академику, но, подумав, нашел такой, как мне сейчас кажется, убедительный ответ: Если в течение последних 30 - 40 лет регулярно измерять мой рост (но не вес!), то можно прийти к выводу, что я таким и родился. (Справедливости ради отметим, что 100 лет инструментального наблюдения за величиной радиуса Земли эквивалентно примерно одной минуте жизни человека). Так же и с Землей: то, что она сейчас скорее сжимается (чем расширяется), вовсе не означает, что за миллиарды лет Земля преимущественно не расширялась. Кроме этого, научным сообществом не делалось даже попыток инструментально оценить, изменяется ли во времени радиус Земли, или он постоянен. Надо заметить, что все современные геодинамические проекты, связанные с перемещением материков и плит, исходят из постулата о неизменности величины земного радиуса. Правда, это нигде специально не оговаривается и считается само собой разумеющимся.

Приведенный нами выше пример демонстрирует, что у геологов, убежденных в правомерности модели холодной Земли, возникают и со временем накапливаются факты, которые, в принципе, находятся с ней в противоречии. Как правило, эти факты замалчиваются при написании монографий по физике Земли. Трудно назвать книги по физике Земли, издаваемые за рубежом и в России, в которых излагались бы идеи, противоречащие принятым догмам холодной модели. Одной из таких книг, оказавших на меня сильное впечатление, была книга австралийского геолога Керри «S.W. Carey, The expanding Earth. Amsterdam. Elsevier. 1976» о геологии расширяющейся Земли. Конечно, её нельзя считать книгой по физике Земли, но это, вероятно, одна из лучших книг, где автор убедительно показывает, что наша планета расширялась! Буквально все монографии по физике Земли “переписывают” друг у друга: планетезимали, как строительный материал для планеты, выделение железного ядра при дифференциации, генерацию магнитного поля за счет динамо-эффекта, конвекцию в мантии как движитель плит, радиогенный разогрев как источник теплового потока и т.п. Если внимательно не “присматриваться” к этой модели, то можно посчитать, что она самосогласованна и не имеет внутренних противоречий.

Если допустить, что планеты и спутники, как и Солнце, создавались по другому, - “горячему сценарию”, то оказывается, что практически ничего не удастся использовать из прежних “наработок” физики холодной Земли. Всю физику горячей Земли приходится создавать “заново”. Холодная модель интенсивно создавалась усилиями многих физиков многих стран не менее 50 лет. Модель горячей Земли в этом плане естественно уступает по глубине и тщательности проработки многих вопросов, за что я заранее прошу прощения у читателя, тем не менее, надеюсь, что прочтение этой книги стимулирует молодых исследователей на развитие концепции горячей Земли, как в плане построения теоретических моделей, так и в геологической практике.

Книга “построена” по традиционной для книг по физике Земли схеме: Предлагается и обсуждается альтернативный сценарий образования Солнца и солнечной системы (Глава 2), обсуждается принципиально новая модель горячей Земли (и планет), особенности образования планеты, внутреннего строения и эволюции параметров (Глава 3). Однако, прежде, делается попытка обосновать правомерность создания новой модели Земли, альтернативной общепринятой (Глава 1). Далее рассматриваются: термодинамика горячей Земли, где оцениваются величины термодинамических параметров, определяется

обобщенное уравнение состояния вещества, распределение температуры по радиусу и т.д. (Глава 4); рассматриваются химические аспекты горячей Земли, обсуждается роль водорода, проблема базальтов и гранитов и т.п. (Глава 5); предлагается принципиально новая модель генерации геомагнитного поля и физические модели, описывающие его особенности - дрейф полюсов, западный дрейф, фокусы векового хода и т.п. (Глава 6); обсуждается проблема геодинамики, вскрывается суть известных (и не очень известных) геодинамических парадоксов, предлагаются физические модели дрейфа материков, спрединга и субдукции (Глава 7); обсуждается и излагается новый подход автора к проблеме глобальной сейсмичности и физике очага землетрясения (Глава 8); обсуждается проблема взаимодействия геосфер: литосферы, атмосферы и ионосферы (Глава 9).

Подводя итоги, сформулируем основные моменты нашей концепции горячей Земли. Будем руководствоваться основными требованиями к новой теории, претендующей на то, что она более адекватна Природе, чем существующая. И, хотя нашу модель еще рано рассматривать как теорию Земли и Солнечной системы, тем не менее, постараемся учесть требования, характерные для любой теории, претендующей на признание научного сообщества:

Во-первых, теория не должна приводить к резко противоречащим друг другу выводам, то есть, теория должна быть самосогласованной.

Во-вторых, теория должна объяснять бесспорные результаты экспериментов и наблюдений.

В третьих, фундамент, заложенный в теорию, должен давать ей возможность оценивать любые конкретные ситуации и анализировать результаты любого нового эксперимента.

В четвертых, теория должна быть согласована со всеми физическими законами.

В пятых, теория должна давать возможность предсказывать события и результаты планируемых экспериментов и наблюдений.

Основная, базовая идея, заложенная в модели горячей Земли, состоит в том, что Солнце, планеты и их спутники образовались в едином достаточно быстром (длительностью менее 1 млн. лет) самоорганизующемся процессе самогравитации протосолнечного «облака», произошедшем 4.5 млрд. лет назад. Этот процесс во времени, и пространстве, можно условно разделить на две составляющие: формирование в протосолнечном «облаке» сгустков вещества, из которого впоследствии сформировались планеты, и бифуркации, произошедшей в области пояса Астероидов, в тот момент, когда Солнце ещё полностью не сформировалось, и его радиус был больше современного примерно в 7 раз. Бифуркация разделила вещество протосолнечного «облака» на две части: из одной сформировались планеты гиганты, вторая «пошла» на формирование Солнца и планет земного типа. Особенности внутреннего строения и эволюция планет и спутников определялись одним параметром – величиной их массы  $M$ . Температура  $T$  вещества планеты в момент их образования была пропорциональна:  $T \sim M^{2/3}$ .

Планеты и спутники (по величине их массы) можно условно разбить на три класса: 1)  $GM/R < U_1$ ; 2)  $U_1 < GM/R < U_2$ ; 3)  $GM/R > U_2$ .  $U_1$ ,  $U_2$  – удельные теплоты плавления и испарения, соответственно,  $G$  – гравитационная постоянная. К первому классу отнесём малые спутники и астероиды, ко второму, - Марс, Меркурий и большие спутники, к третьему, - Землю, Венеру и гигантские планеты. Первые в момент образования не были полностью расплавлены, вторые – полностью расплавлены и часть их вещества находилась в газообразном состоянии, третьи, - прошли фазу полностью газообразного состояния. Процесс сжатия (самогравитации) планеты прекращается, когда внутреннее газокинетическое давление её вещества становится равным гравитационному давлению (критерий Джинса). После этого планета эволюционирует, выделяется газообразное внутреннее ядро, жидкое – внешнее и формируется кристаллическая мантия. Планета при этом расширяется, т.к. начальная плотность вещества в газообразном состоянии была



выше плотности вещества в конденсированном состоянии. На границе внутреннего и внешнего ядра реализуется фазовый переход (ФП) «конденсация-испарение», а на границе ядро-мантия фазовый переход «кристаллизация-плавление». Оба ФП экзотермические, что обеспечивает планете источник внутренней энергии, который «расходуется» на тепловой поток, магнитное поле, геодинамику и т.п. Направления ФП могут меняться: от преимущества конденсации над испарением, что приводит к расширению Земли, к преимуществу испарения над конденсацией, что соответствует периоду её сжатия.

В области ФП на границе внутреннего ядра возникают электрические явления, образуется радиальное электрическое поле и двойной электрический слой (ДЭС). Суточное вращение ДЭС вызывает появление слабого магнитного поля, которое усиливается за счет проявления гальвано-магнитных динамо эффектов, подобных эффекту Холла, и является причиной генерации магнитного поля планеты и спутника. Смена режима преимущества ФП того или иного типа автоматически приводит к изменению полярности ДЭС и инверсии магнитного поля. Явления, связанные с деятельностью механизмов поддержания температуры в области ФП, «маркируются» магнитным полем и представляют собой всю гамму явлений геомагнетизма.

Температура и давление вещества Земли в ходе её эволюции уменьшаются, что является основной причиной происходящих в её недрах циклических процессов, находящихся отражение в палеомагнитной шкале и «каменной летописи».

Геодинамические явления, сейсмичность и вулканизм проявляются на Земле (и других планетах и спутниках), - открытой самоорганизующейся структуре, как «средства» достижения выполнения условия минимизации её гравитационной энергии, приводящие Землю, другие планеты и большие спутники, к шарообразной форме и стремящиеся минимизировать высоту их «геоидов».

Релаксация вещества внутреннего ядра уже произошла на Марсе и на некоторых больших спутниках, о чем говорит отсутствие дипольного магнитного поля в настоящем времени и наличие его в прошлом. Этот процесс ещё происходит на Меркурии, Земле, Ганимеди и других планетах. Отсутствие магнитного поля на Венере, где внутреннее ядро должно ещё сохраниться, может быть объяснено только тем, что она вращается очень медленно и её затравочное магнитное поле слишком мало для развития генерации.

Как будет показано в этой книге, модель горячей Земли самосогласованна, в ней используются известные законы физики, она находит объяснение всем бесспорным наблюдательным фактам, она позволяет прогнозировать явления, которые могут наблюдаться в будущем. Таким образом, модель горячей Земли удовлетворяет требованиям, предъявляемым теории.

Когда занимаешься разработкой принципиально новой идеи, возникает вечный вопрос: зачем создавать новые теории, если можно обойтись старыми? В нашем случае вопрос можно перефразировать: чем «плоха» общепринятая ныне модель холодной Земли, и действительно ли возникла необходимость в создании новой? По ходу книги мы будем постоянно отвечать на этот вопрос. Здесь же отметим только наиболее важные «нестыковки» этой модели. Во-первых, проблема с источником энергии, обеспечивающим тепловой поток, дрейф материков, генерацию геомагнитного поля. В модели холодной Земли такого источника нет. Каждый раз, занимаясь тем или иным разделом физики Земли, авторы вынуждены решать эту проблему и решения не стыкуются между собой. Во-вторых, эта модель не может ответить на огромное количество очевидных вопросов, таких как: почему магнитное поле было раньше на Луне и Марсе и почему оно исчезло? Или, сколько воды на Луне и Марсе и почему она там оказалась? Почему степень сжатия не соответствует степени сжатия «жидкой» Земли? Как может оказаться кристаллическое железо внутреннего ядра внутри расплавленного? Вязкость вещества внешнего ядра, оцененная по астрономическим данным, значительно выше, чем принимаемая величина вязкости расплавленного железа, необходимая для того, чтобы «закрутить» динамо

механизм? Высокая электропроводность вещества внешнего ядра, необходимая для генерации геомагнитного поля, не позволит «выйти из ядра наружу» таким явлениям геомагнетизма как джерки? И так далее, вопросы можно продолжать и продолжать. Ответов на них нет. Именно этот факт настоятельно требует того, чтобы разрабатывались принципиально новые модели, целью которых, было бы создание теории, связывающей воедино все разделы физики Земли и отвечающей на все вопросы, в том числе, и на те, которые мы перечислили выше.

Иначе, в физике Земли настала необходимость в создании той самой «редкой теории, которая выдерживает критику, укрепляется, усовершенствуется и затем постепенно включается в растущий объем научных знаний».

Как и почему возникла идея заняться этой темой? Начну с того, что в 1980 году известный сибирский геолог академик Ю.А.Кузнецов предложил мне прочитать книгу Ларина о гидридной модели Земли «Ларин В.Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. М. Недра. 1980». Юрий Алексеевич объяснил свое предложение тем, что он, будучи учеником и соратником академика М.А.Усова, разделял его взгляды на то, что Земля в течение своей эволюции расширяется. Однако ни он сам, ни М.А.Усов, понять причины этого явления были не в состоянии. Физическая концепция, положенная в основу книги Ларина, показалась Юрию Алексеевичу не совсем понятной, в чём-то она его не устраивала, и он попросил меня, как физика, в ней разобраться. Несостоятельность концепции Ларина стала ясной для меня при первом прочтении, о чем я и рассказал Юрию Алексеевичу. Тогда он предложил мне придумать более ясную и физически непротиворечивую концепцию расширяющейся Земли. Сделав элементарные оценки удельной гравитационной энергии Земли и температуры её вещества, модель расширяющейся Земли возникла у меня буквально в один вечер. Позже, после знакомства с литературой по физике Земли, оказалось, что правильнее назвать гипотезу - моделью «горячей» Земли. Дело в том, что расширение (и пульсации объема) Земли является обязательным следствием именно того, что в момент образования её вещество было нагрето до температуры, превышающей критическую температуру, и сжато до плотности, превышающей плотность конденсированного вещества. После того, как я рассказал Юрию Алексеевичу о пришедшей мне в голову идее, он рекомендовал мне распространить модель горячей Земли на другие планеты и спутники Солнечной системы. Он считал, что Солнце, планеты и их спутники должны подчиняться единым законам и модель может оказаться верной лишь тогда, когда все особенности этого «ансамбля» будут находить объяснение с единых позиций. С тех пор я неукоснительно слеую его советам.

Модель горячей Земли поддержали в свое время, академики: математик А. С. Алексеев, физик С.С. Кутателадзе, геологи: Ю. А. Кузнецов, В. А. Кузнецов, А. А. Трофимук, Б. С. Соколов, Ю. А. Косыгин; геофизики: Н. Н. Пузырев, чл. корр.: Э. Э. Фотиади, С. В. Крылов, А.В. Николаев и др.

Работая над моделью горячей Земли в институте геологии и геофизики СО РАН, я ощущал постоянную поддержку его бывшего директора академика А.А. Трофимука. На различных этапах мои идеи неоднократно обсуждали геологи и геофизики доктора наук: В.А. Соловьев, В.К. Кучай, В.Н. Шарاپов, А.К. Башарин, Ю.П. Казанский, А.Ф. Белоусов, А.Н. Дмитриев, В.С. Вышемирский, А.Д. Дучков и др. Идею горячей Земли поддержали физики: чл. корр. РАН С.Г.Раутиан и С.Т.Васьков, доктора физ-мат. наук: В.Г. Мартынец, В.К. Малиновский, В.Р. Белослудов, Б.М. Шевцов и др. Всем им я выражаю глубокую благодарность. Я благодарен так же за многолетнюю совместную работу, помощь и поддержку моему коллеге к.ф.-м.н. С.Ю.Хомутову.

Суть идеи горячей Земли я докладывал на многих семинарах и конференциях в России и за рубежом. Общаясь с иностранными коллегами, я неоднократно высказывал им свои взгляды на физику Земли. Надо признать, что не нашлось ни одного ученого, их

полностью разделившего, хотя по ряду вопросов, в основном, по проблемам геомагнетизма, у меня нашлось довольно много доброжелателей. Среди тех, что отнёсся с пониманием и поддержкой моих идей, мне хотелось бы выразить благодарность профессорам: Дону Тарлингу - из Лондонского университета, Хьюго Оуену - из Британского музея истории природы, Сан-ихиро Карато - из университета Мериленда, С. Херейро-Бревейро - из Гавайского университета, Роберту Геллеру - из университета Токио, Владимиру Папиташвили - из Мичиганского университета, а так же моим друзьям магнитологам: канадцу Ларри Ньюитту и австралийцу Чарли Бартону. Мои исследования модели горячей расширяющейся Земли поддержал, в свое время, прислав мне несколько писем, профессор Сэм Уоррен Кери, однако, он всегда оставался противником столь тривиальной, по его мнению, идеи, - как расширение Земли за счет конденсации сжатого во внутреннем ядре газа.

Первый вариант этой книги, которая называлась: «Физика горячей Земли», был подготовлен в Новосибирске, во время работы в институте геофизики СО РАН в 2000 г. Рукопись была сдана в печать в издательство «Вузовская книга». Издательство отредактировало книгу и отправило её в типографию, но из-за финансовых трудностей прекратило существование. Книгу можно прочитать: <http://www.uiggm.nsc.ru/~kuz/site.htm> Второй вариант книги: «ФИЗИКА ЗЕМЛИ (Обоснование и разработка модели «горячей» Земли)» был подготовлен мной во время работы в институте космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН (Камчатка) в 2005 г. Я отправил книгу в издательство Наука, ДВО. Книгу приняли и включили в план издательства на 2005 г. Затем, по предложению Московской Науки книга была передана им и прошла редакционную подготовку, но перед отправкой книги в типографию, было принято решение, запрещающее печатать книги бесплатно. От ИКИРа потребовали полмиллиона рублей, что было выше институтских возможностей. Снова напечатать книгу мне так и не удалось. Книгу можно прочитать на сайте: <http://www.ikir.kamchatka.ru/vvk/> Третий вариант книги я назвал: «Введение в физику горячей Земли». Эта книга несколько сокращена по сравнению со вторым вариантом, однако некоторые разделы 9-ой Главы изменены и немного расширены.

Я глубоко благодарен научному редактору книги чл.-корр. РАН А.В.Николаеву за его Предисловие редактора.

Выражаю благодарность директору ИКИР д.ф.-м.н. Шевцову Б.М. и сотрудникам этого института: Ю.С. Шумилову, Н.В. Черновой, А.В. Бузевичу, В.В. Богданову и многим другим, за предоставленную возможность и поддержку при подготовке настоящей рукописи в печать. Я благодарен ученому секретарю НИСО ДВО РАН к.ф.н. Г.Ф. Низяевой за участие в попытке публикации второго экземпляра книги.

И, наконец, я глубоко и искренне благодарен своей жене Наташе, за веру в меня и постоянную поддержку в моём нелегком пути к пониманию физики Земли, и в Новосибирске, и на Камчатке. Я так же благодарен ей за активное участие в нашей совместной работе над проблемой выяснения роли инверсий и экскурсов в изменениях климата и генетических мутаций.

## Глава I. ЗЕМЛЯ: ГОРЯЧАЯ ИЛИ ХОЛОДНАЯ?

*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.*

### I. 1. Земля: горячая или холодная; плутонисты или неплутонисты?

*Ранние гипотезы.* Проблему внутреннего устройства Земли по праву можно считать одной из древнейших и наиболее актуальных для человечества (Батюшкова, 1966). Естественно, еще самые древние мыслители задумывались над тем, как устроена Земля и изобретали на эту тему подчас совершенно невероятные модели. Согласно Гомеру [900 лет до н.э.], Земля представляла собой выпуклое блюдо, окруженное Океаном. Впервые о том, что Земля шар, стали говорить в древней Греции примерно 600 лет до н.э. Аристотель [350 лет до н.э.] знал точные размеры Земли. Оценкой размеров Земли занимались арабы, а так же в Египте и Китае. Со времен Аристарха [300 лет до н.э.] ведется дискуссия о суточном вращении Земли. Впервые идея о сплюснутости Земли была высказана географом Страбоном в 5 г. до н.э. Внутреннее устройство Земли всегда интересовало древних ученых. Наблюдения за вулканами и ростом температуры при спуске в шахты, привели их к выводу о том, что недра Земли горячие.

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

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

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

*Научный подход.* В 1672 г. Рише обнаружил, что часы, верно отсчитывающие секунды в Париже (49°N), отстают приблизительно на 2.5 мин в сутки, в Кайенне (5° N), 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 (как мы покажем ниже, не совсем правильному) 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:  $e = (a_1 - a_3)/a_1$ , так и по теории тяготения (см. рис. 1-1).

В 1690 г. Гюйгенс, оценивая величину  $e$ , получил уравнение поверхности Земли в виде:

$$g(x_1^2 + x_2^2)^{1/2} - 1/2 \Omega^2 x_1^2 = const,$$

Здесь  $g$  - сила тяжести, а  $\Omega$  - частота вращения Земли.

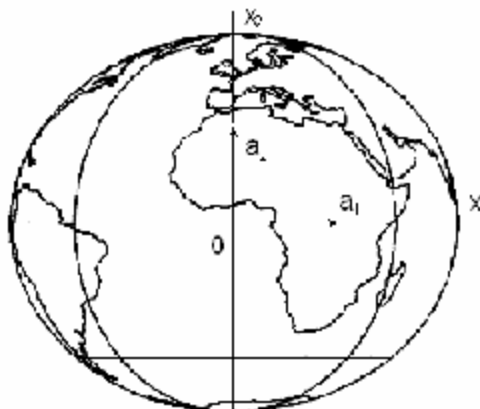


Рис. 1-1. Сжатие Земли (Буллен, 1978).

На основе выведенных французским математиком А. Клеро уравнений, оказалось возможным определить сжатие земного сфероиды. 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. Этим 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, подымавшая такую тягость, ничему приписана быть не может, как господствующему жару в земной утробе”.

Конец XVIII века в истории геологии проходил под знаком борьбы двух течений - нептоунизма и плутонизма. Нептунисты считали, что особенности поверхности Земли обязаны действию воды, не интересуясь при этом внутренним устройством Земли, внутренними силами и источниками энергии. Надо полагать, к таким выводам можно прийти, изучая осадочные породы и учитывая их практически повсеместное расположение на земной поверхности, а так же то, что 2/3 Земли покрыто Океаном. В противоположность нептоунистам, 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 исключаящим 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 С.Ю. Хомутовым (1995), который показал, что четкой зависимости сейсмичности Земли от фазы Луны, - реально не наблюдается.

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 изучения 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.

*Газообразное ядро.* 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].

*Современные представления.* 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 эпицентрными расстояниями более 80° от сейсмостанции Геттинген, обнаружил, что на глубине 2900 км скорость продольных волн уменьшается от 13.5 км/с до 8.5 км/с и что радиус ядра равен приблизительно 3500 км. В 1936 г. датчанка-сейсмолог Ингре Леман выдвинула предположение, что ядро состоит из двух частей: внешней и внутренней, и что скорость сейсмических волн во внутреннем ядре больше, чем во внешнем.

Гутенберг и Рихтер сделали попытку определить радиус границы между этими двумя частями ядра [1938] и нашли, что переход от внешнего ядра к внутреннему начинается на расстоянии примерно 1500 км от центра Земли и охватывает зону протяженностью около 300 км. Джеффрис (1960) в 1939 году установил, что в слое между внешним и внутренним ядром скорость волн уменьшается и что в подошве этого слоя, относящегося к внешнему ядру, на границе с внутренним ядром имеет место разрыв скорости (рис. 1-2). В 1957 г. Гутенберг, 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 (1978) предложил выделить и обозначить оболочки Земли [1953], используя границы отражений сейсмических волн. Эта классификация существует и в наше время (см. рис. 1-2).

Вопрос о том, твердое ли внутреннее G-ядро, до недавних пор оставался не ясным. Единственная до недавнего времени публикация о регистрации РКЖР-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 Р-волн на границе внутреннего ядра. Как известно, внешнее ядро жидкое, скорость распространения Р-волн в нем:  $v_p = (K/r)^{1/2}$ . 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 Р-волн:  $v_p = [(K + 4/3m)/r]^{1/2}$ , где  $m$  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).

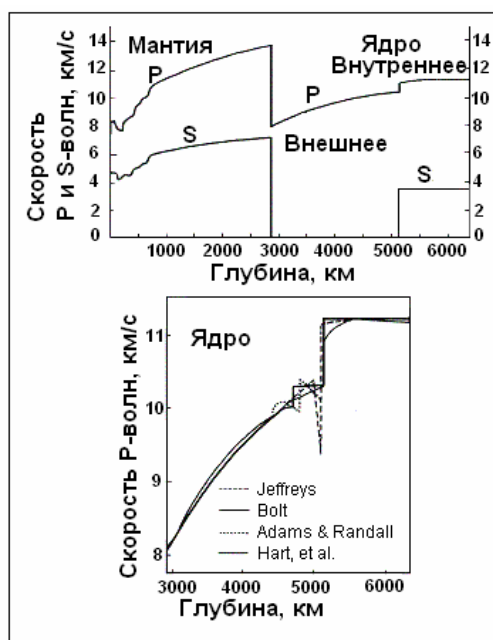


Рис. 1-2. Распределение скоростей сейсмических волн (Браун, Массет, 1984).

Совсем недавно ситуация резко изменилась. Был найден, наконец, “святой грааль сейсмологии” (Tromp, 1995; Кузнецов, 1997): т.е. экспериментально обнаружена волна, проходящая через внутреннее ядро, как сдвиговая (РКЖКР). Авторы этой работы (Okal, Cansi, 1998) идентифицировали РКЖКР-волну, распространяющуюся через внутреннее ядро Земли с периодом колебаний 2-10 секунд, возникшую в результате глубокофокусного землетрясения Flores Sea 1996 года. Эта РКЖКР-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 РКЖКР-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 рРКЖКР-волны. Французы считают, что большая величина коэффициента Пуассона (0.44) может быть объяснена нормальной кристаллической структурой внутреннего ядра без того, чтобы привлекать идею частичного плавления, якобы возникающего из-за громадного давления в центре Земли.

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

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

Идея железного ядра имеет очень давнюю историю. С момента открытия земного магнетизма и магнетизма железа, это сопоставление представлялось очевидным. Одним из первых научных трактатов на эту тему, по-видимому, была книга В.Гильберта “Земля - большой магнит”, изданная в Англии в 1600 г. Значительно позже 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” (Гутенберг, 1963, стр. 141).

*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, стр. 142). 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.

Можно привести общепринятые возражения относительно всех этих гипотез. В настоящее время предпочтение отдается гипотезе железного ядра. Согласно этой гипотезе, внешнее ядро состоит из расплавленного железа, а внутреннее - из твердого. Б. Гутенберг еще 40 лет назад написал слова, которые не потеряли своей актуальности и в наше время: “Будущие наблюдения и теоретические исследования вещества, составляющего ядро, при давлениях 1.5-3.5 млн. атм. и температурах в тысячи градусов Цельсия, *могут привести к изменению прежних взглядов*” (Гутенберг, 1963, стр. 142, подчеркнуто мной).

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

1. Плотность внутреннего (G, по Буллину) ядра ниже, чем плотность железа при условиях, существующих в области внутреннего ядра.
2. Скорость S-волн в G-ядре очень мала и, если бы там было железо, то она должна бы быть около 6 км/с.
3. Скорость P-волн практически не возрастает к центру Земли (см. рис. 1-2), оставаясь постоянной вдоль радиуса ( $v_p^2 = dp/dr$ ), что не характерно для конденсированного вещества, а соответствует состоянию сжимаемого газа, т.к. скорость звука в газе практически не зависит от  $p$  и  $r$ , которые однозначно связаны друг с другом ( $p = rkT/mn$ ,  $m$  - молекулярный вес,  $m$  = масса протона).
4. Практическое совпадение измеренной величины скорости S-волн с вычисленной по модели Земли и уравнению Адамса и Вильямсона означает, что внешнее (E) ядро и внутреннее (G), состоят из одного вещества. Однако вязкость вещества внешнего ядра, оцененная по астрономическим данным, значительно (на несколько порядков) больше, чем измеренная в лабораторных условиях вязкость расплавленного железа.
5. Мы уже отмечали, что внутреннее ядро не может быть кристаллической фазой вещества внешнего ядра, т.к. такой экзотермический процесс кристаллизации без отвода тепла из центра Земли термодинамически не возможен.
6. Земля открытая диссипативная, самоорганизующаяся структура, включающая два фазовых перехода: конденсацию и кристаллизацию. В системе, на фазовых переходах происходит постоянный рост энтропии. Энтропия центральной части Земли, где, согласно нашей модели, находится вещество в газообразном, плазменном состоянии, должна быть самой большой, и она должна скачком уменьшаться в области фазовых переходов, по мере увеличения радиуса Земли при перемещении от её центра к периферии. Этому очевидному правилу из необратимой термодинамики противоречит модель кристаллизации внутреннего ядра внутри расплавленного железного внешнего ядра.
7. Чтобы железо было бы твердым, необходимо, чтобы температура внутреннего ядра была бы ниже, чем температура внешнего, что представляется абсурдным даже разработчикам модели холодной Земли. Поэтому в принятой холодной модели используется адиабата Пуассона. Это неверно, т.к. адиабата Пуассона характеризует только идеальный газ, участвующий в бездиссипативных процессах, что не может быть применено для Земли. В оценках температурного хода в недрах Земли необходимо пользоваться адиабатой Гюгонио, и т.п.

*Магнитное поле.* 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 (Буссе, 1984).

*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 считают, 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. Янковским. Модель в современном виде берет начало от работ О.С. Хильденберга [1933]. Идея расширяющейся Земли нашла наиболее полное и законченное развитие в трудах австралийского геолога С. Кери (Carey, 1976). В развитие этой идеи существенный вклад внесли геологи Б. Линденман [1929], М. Боголепов [1922], Д.К.Е. Халм [1935], Л. Эдьед [1956], Х. Оуэн [1973] и др. Однако все авторы, и в том числе С. Кери, не могли найти причин, согласно которым Земля может расширяться. Заканчивая свою замечательную книгу, Кери написал: “Я знаю, что Земля расширяется, но я не знаю почему”. Разные авторы задумывались над этой проблемой и многие из них приходили в своих предположениях к весьма экзотическим (и неверным) идеям. Возможные аспекты физики расширения Земли рассмотрены В.Ф. Блиновым (1984). Он полагал, что все схемы расширения и возможные причины можно рассмотреть применительно к формуле гравитационного ускорения в центрально-симметричном поле тяготения:

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

Блинов полагает, что параметры в этой формуле связаны с изменением земного радиуса  $R$ . Он выделяет три возможных причины изменения  $R$ : Первая связана с увеличением массы со временем. Это направление основано Янковским, 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 пришла по душе многим геологам, в частности, на кафедре геофизики МГУ. По

поводу этой идеи мне пришлось выступить с критикой (Кузнецов, 1996). Второе направление связано с уменьшением гравитационной постоянной со временем. В свое время с этой идеей выступил известный физик, Нобелевский лауреат П. Дирак. Это направление было поддержано Л. Эдьеом, Р. Дике, Д.Д. Иваненко, М.У. Сагитовым и др. 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.

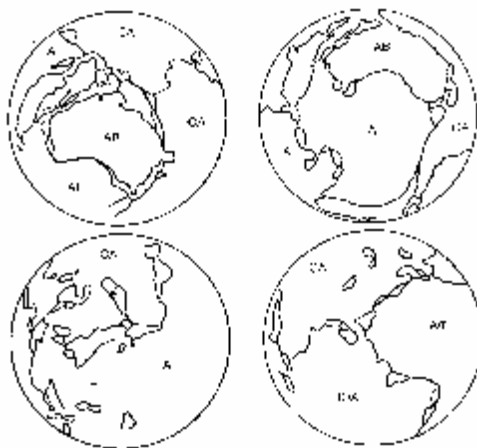


Рис. 1-3. Расположение материков на сфере внешнего ядра Земли (Гораи, 1984).

Надо заметить, что практически все разработчики модели расширяющейся Земли стремились “уложить” континенты один к другому таким образом, чтобы не оставалось “зазора” между ними. Рис. 1-3 демонстрирует один из таких вариантов, предложенный в книге Гораи (1984). Наибольшего успеха в этом деле достиг немецкий инженер из Потсдама К. Вогель, создавший прозрачный глобус, на внешней поверхности которого были расположены материки, а внутри размещался еще один шар, меньшего диаметра, на котором материки занимали положения, примерно так же, как это изображено на рис. 1-3. Профессором Британского музея натуральной истории Х.Оуэном был создан атлас, в котором представлено расположение материков в различные эпохи и т.п. В каждой из моделей расширения авторы придерживались некой общей схемы, изображенной на рис. 1-4 и заимствованной мной из книги Кери. Этот рисунок отражает тот факт, что материки в процессе расширения Земли не претерпели существенных изменений, а само расширение обязано образованию океанов, заполнивших пространство между ними.

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

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

развития и, более того, были отвергнуты. Абсолютное и бесспорное преимущество получила модель холодной Земли.



Рис. 1-4. Модель расширения Земли по Кэри (Fig 25, с. 48, Carey, 1976)

## I. 2. Почему Земля холодная?

К началу второй половины нашего века, в связи с успехами сейсмологии был построен скоростной разрез Земли. Выяснилось, что земная мантия твердая на глубину почти 3 тыс. км. Возникло непреодолимое в то время противоречие: каким образом первоначально расплавленная Земля могла остыть и кристаллизироваться на такую большую глубину за столь “короткое” время ее существования (4.5 млрд. лет). По оценкам, выполненным с учетом величины теплопроводности земного вещества, за это время (которое было оценено благодаря развитию методов “радиоактивных часов”), земное вещество могло “успеть” кристаллизироваться на глубину, никак не большую чем 800 км. Эта загадка оказалась неразрешимой, что практически свернуло исследования модели горячей Земли.

Другой, не менее существенный аргумент против горячей Земли был сформулирован В.А.Магницким (1965). Магницкий оценил величину гравитационной энергии Земли. Затем, поделив энергию на приемлемое значение теплоемкости, он оценил начальную температуру вещества Земли, равную  $\approx 30\ 000^\circ\text{K}$ . Магницкий писал: “однако такая оценка бессмысленна, т.к. разогрев Земли целиком определяется принятой схемой образования планеты из протопланетного облака, поскольку при этом возникают огромные потери тепла через излучение” (Магницкий, 1965. стр. 41).

Повторим еще раз, что в течение последних примерно 50 лет в науках о Земле безраздельно господствует модель “холодной” Земли. В значительной степени её преимущество (над “горячей” моделью) обязано работам О.Ю. Шмидта. В 1952 г. Шмидт писал: «Идея первично горячей Земли была внесена в геологию не столько по геологическим, сколько по космогоническим соображениям, на что, в частности, давно указывал В.И. Вернадский. Сейчас среди геологов начинается отход от этой позиции. Те же из геологов и геофизиков, которые продолжают держаться за отмирающие представления, теряют ориентировку и заходят в тупик, как, например, Б. Гутенберг, в 1952 г. писавший, что в 1939 г. внутреннее строение Земли представлялось более ясным, чем сейчас» (Шмидт, 1955).

Теория образования Земли и планет, развитая Шмидтом, его учениками и последователями, базировалась на ряде посылок:

- столкновения частиц от пылинок до тел астероидных размеров сопровождается рассеянием энергии при переходе механической энергии в тепловую,
- протопланетное облако было существенно неоднородным, что и определило различный химический состав планет,
- тепловая энергия планет определяется наличием радиоактивности,

- после радиоактивного разогрева планеты и после того, как её недра стали пластичными, началось перемещение вещества – опускание тяжелых глыб и всплывание легких.

Скорость роста массы планеты, по Шмидту, дается выражением:

$$dM/dt = \pi R_E^2 r v (-R_E^2 s),$$

где  $r$  и  $s$  - соответственно объемная и поверхностная плотность участвующего в аккреции вещества,  $v$  – средняя скорость планетезималей относительно растущей планеты,  $R_E$  её «текущий» радиус, который увеличивается с уменьшением величины  $v$ , согласно формуле, приведенной Рингвудом (1982):

$$R_E^2 = R^2(1 + 2GM/Rv^2) = R(1 + v_e^2/v^2),$$

где  $R$  – геометрический радиус растущей планеты,  $v_e$  – скорость “ускользания” вещества с её поверхности (1-я космическая скорость).

Главный постулат модели холодной Земли, это её железное ядро. Все другие модели были отмечены в ходе развития физики Земли, как науки. Вопрос о том, железное оно, или нет, не подвергается сомнению. Речь может идти только о том, какие могут быть примеси и в каком количестве, например, никель, сера или кислород. Внутри жидкого железного ядра находится твердое, кристаллическое и то же железное. Эта аксиома определяет всю «термодинамику» холодной Земли. Очевидны т.н. «реперные» точки на температурной зависимости. Внутреннего источника энергии быть не должно: ведь Земля холодная. Для объяснения теплового потока предлагается учитывать радиоактивность гранитов. Материки и плиты раздвигаются и источник разрастания океанической коры – спрединг, обнаружен. Самое простое решение, это предположить наличие глобальной конвекции. Несмотря на совершенно очевидный вывод об отсутствии и даже о невозможности такой конвекции в мантии, плитная тектоника, как парадигма продолжает завоёвывать научные геологические школы во всех странах мира. В этой проблеме особое место занимает субдукция, где якобы плита должна «утонуть», каким-то образом «просочиться» сквозь нижнюю мантию, жесткость которой выше чем у стали и, затем, - «всплыть» в зоне действия спрединга. Сама же мантия при этом остается строго стратифицированной, а имеющиеся на Земле гравитационные аномалии на два порядка меньше, чем те, которые должны были бы получаться, если такая конвекция имела бы место.

Одна из главных проблем физики Земли, это проблема генерации её магнитного поля. Очевидно, что если эта задача будет понята, то все остальные вопросы должны быть решены автоматически. Ситуация с этой проблемой очень близка к положению с холодной Землей. Сегодня «в законодательном порядке» определено, что генерация геомагнитного поля обязана действию магнитогидродинамического динамо во внешнем ядре. Этот тезис не дискутируется, обсуждается только, какое динамо:  $\alpha$ -,  $\Omega$ -, или  $\alpha\Omega$ -имеют предпочтение. Такая ситуация с «проблемой № 1» физики Земли продолжается более 50 лет. В течение этого времени модель динамо не смогла объяснить ни одной из особенностей геомагнетизма.

Наконец, Земля образовалась 4.5 млрд. лет назад такой, согласно холодной модели, какая она сейчас. И эта идея не подвергается сомнению, несмотря на то, что геологами фиксируются тектонические, магматические и прочие циклы, трансгрессии и регрессии, глобальные вымирания, оледенения и потопы, смена полярности геомагнитного поля, суперхроны и суперплюмы и много других различных глобальных и повторяющихся явлений. Как всё это можно объяснить, если на Земле нет источника энергии, способного обеспечить протекание всех этих грандиозных процессов. Земля, согласно холодной модели, – закрытая система, в которой нет причин для эволюции и саморазвития. Согласно модели “холодной” Земли, она находится в равновесном состоянии, и её термодинамические параметры – суть константы. Однако линейная термодинамика необратимых процессов заставляет нас признать, что циклические колебания не могут происходить относительно равновесного состояния. Это означает, что холодная модель в

принципе не способна найти объяснение большинству наблюдаемых глобальных процессов динамики геосфер.

### 1.3. В чем ошибочна холодная модель и нужна ли новая физика Земли?

В первом приближении модель холодной Земли убедительна и непротиворечива. Она принята научным сообществом и опубликована во всех учебниках, даже школьных. На все поставленные нами выше вопросы найдены ответы. Если не разбираться в сути этих ответов, то, казалось бы, нет проблем и нет причин к поиску других, альтернативных вариантов. В частности, нет причин возвращаться к модели горячей Земли, которая была «закрыта» 50 лет назад.

Однако попытаемся ответить на вопрос, поставленный в заголовок этого параграфа. О некоторых проблемах модели холодной Земли мы уже упоминали выше. Что можно добавить? Начнем с того, что эта модель представляет собой набор разрозненных объяснений наблюдаемых явлений. В преобладающем большинстве случаев, для объяснения того или иного факта, используется каждый раз новый физический принцип, подчас несовместимый с другим принципом, привлеченным для объяснения другого явления, хотя объясняемые ими факты и явления из истории Земли, явно связаны. Приведем несколько примеров.

1.3.1. Продолжим критику холодной Земли с модели её образования. Распространим теорию Шмидта на другие планеты. Будем придерживаться нити рассуждений Рингвуда (1982): «Эта теория приводит к заключению, что аккреция Земли (на 98 %) происходила на протяжении около  $10^8$  лет, и это значение широко используется в литературе. Однако согласно этой теории время аккреции Урана и Нептуна оказывается порядка  $10^{11}$  лет, т.е. более чем 10 раз больше возраста Солнечной системы. Попытки обойти эти трудности, - неубедительны. Кроме того, возникает сложность и с оценкой времени аккреции Марса, для которого оно составляет  $2.6 \times 10^9$  лет. Подсчет кратеров, хотя и не очень точный метод, указывает на гораздо более древнюю его поверхность. Если принять столь сравнительно молодой возраст завершения аккреции Марса, то приходится предполагать сильную бомбардировку Земли и Луны вплоть до  $2 \times 10^9$  лет тому назад. Однако изучение Луны показывает, что период частой бомбардировки закончился, по крайней мере, около  $3.9 \times 10^9$  лет тому назад» (с. 95). Как видно из этой цитаты, даже сторонники и разработчики холодной модели сами сомневаются в правомерности модели её образования путем слипания холодных частиц.

Более того, как было недавно обнаружено с помощью космических телескопов Хаббл и Спитцер, процесс образования планет у «молодых» звезд возрастом  $\sim 100$  тыс. лет уже закончился, у очень «старых» звезд, с возрастом больше солнечного - ещё существуют пылевые кольца

1.3.2. Считается, что тепловой поток Земли обязан наличию радиоактивных элементов, которые в основном сосредоточены в гранитах материковой коры. В базальтах, покрывающих морское дно и в значительной мере соответствующих химическому составу вещества мантии, их почти нет. В связи с этим возникают вопросы. Почему тепловой поток на материках и океанах практически одинаков? Почему, если источник тепла находится на поверхности Земли, чем глубже, тем теплее? Почему раньше Земля была значительно горячее, и около 4-х миллиардов лет тому назад, по выражению некоторых геологов, океаны кипели? Если источник тепла – радиоактивность, то температура Земли со временем должна возрасти, тогда почему она явно уменьшается?

Высказанные рядом геологов предположения о том, что Земля, за счет радиоактивного нагрева, - расплавилась, а потом уже развивалась как - горячая, тоже не выдерживает критики. Дело в том, что этом случае действует тот же самый аргумент, из-

за которого отклонили модель горячей Земли: мантия, за 4.5 млрд. лет эволюции Земли, не может кристаллизироваться на всю её толщину.

1.3.3. Общепринятое значение скорости РКЖР-волны  $v_s = 3.56$  км/с практически совпадает с его измеренной величиной ( $v_s = 3.65$  км/с). По-видимому, имеет смысл остановиться на том, как была оценена величина этой скорости до её прямого измерения. Воспользуемся уравнением Адамса и Вильямсона. Оно следует из вполне разумных предположений об однородности химического состава Земли и допущении, что гидростатическое давление выражается формулой:

$$dp = -rgdr,$$

где  $r$  и  $g$  плотность и ускорение силы тяжести при радиусе  $r$ . Модуль сжатия  $K$  представляет собой отношение приращения давления к величине возникшего при этом сжатия (при условии, что количество тепла и масса вещества не изменяются), т.е.

$$K = r dp/dr.$$

Учитывая, что  $v_s^2 = m/r$ ;  $K/r = v_p^2 - (4/3)v_s^2 = f$ , здесь  $f$  - сейсмический параметр, получаем:

$$dr/dr = -rg/f.$$

Это и есть известное в физике Земли уравнение Адамса и Вильямсона. Решение этого уравнения совместно с  $g = Gm/r^2$ , если известен сейсмический параметр, находит распределение плотности по радиусу Земли ( $G$  – гравитационная постоянная).

Известно, что на границе внутреннего ядра скорость Р-волн возрастает примерно на 6 %. Считается, что внешнее ядро жидкое и  $m = 0$ , а  $v_p^2 = K/r$ . Невозможно представить, чтобы плотность уменьшалась с увеличением глубины. Имеется ряд соображений, что модуль сжатия  $K$  не может быть настолько выше, чтобы обеспечить скачек скорости Р-волны. Ситуация легко разрешается, если предположить, что внутреннее ядро, в противоположность внешнему, имеет конечное значение модуля сдвига  $m$ . Подставляем  $m$  в выражение для скорости Р-волн и определяем его значение, а, заодно, и величину  $v_s$  скорости РКЖР-волн.

Факт практического совпадения вычисленной и измеренной величин скорости сдвиговых волн подтверждает важный вывод, следующий из уравнения Адамса и Вильямсона об однородности состава ядра внешнего и внутреннего. И, скорее всего, **это не железо**. В пользу такого заключения говорит очень высокое значение коэффициента Пуассона: он намного больше, чем у железа ( $\sigma = 0.28$ ). (К примеру,  $\sigma$  SiO<sub>2</sub> = 0.18; льда = 0.35; резины = 0.47; жидкости = 0.5). Если бы во внутреннем ядре находилось железо ( $v_p = 11.2$  км/с), то скорость S-волн должна бы быть около 6 км/с.

Кроме этого, оцененные величины вязкости вещества внешнего ядра значительно превышают вязкость расплава железа. Этот факт так же не находит объяснения в модели холодной Земли.

1.3.4. Принято считать, что внешнее ядро Земли жидкое, а мантия и внутреннее ядро – находятся в кристаллическом состоянии. Известно, что энтропия вещества, находящегося в газообразном состоянии максимальна, она меньше у вещества в конденсированном состоянии и ещё меньше, если оно кристаллизовалось. Следовательно, энтропия вещества в центре Земли меньше, чем на периферии, во внешнем ядре, а затем, в мантии она снова уменьшается. Для равновесной системы, а именно такой должна быть Земля после медленного накопления своего вещества в процессе образования, эта ситуация неприемлема. Здесь явно нарушаются теорема Гиббса и Н-теорема Больцмана, согласно которым в системе должно наблюдаться естественное изменение энтропии, и её производство в процессе эволюции такой диссипативной структуры как Земля.

Для обсуждения модели Земли с позиции второго начала термодинамики, запишем основное термодинамическое равенство:

$$dE = T dS - p dV,$$



откуда следует выражение для энтропии системы:

$$S = 1/T \int dE + 1/T \int p dV .$$

Охлаждение системы, и следующие за этим конденсация и кристаллизация вещества, приводят к росту энтропии. К примеру, производство энтропии при кристаллизации вещества из пересыщенного раствора, согласно (Мартюшев, Селезнев, 2000), выражается формулой:

$$dS/dt = -j \tilde{N}m$$

где  $j$  – поток кристаллизующегося компонента,  $\tilde{N}m$  – градиент химического потенциала.

В процессе эволюции диссипативной, открытой, самоорганизующейся системы, такой как Земля, происходит увеличение энтропии ( $S$ ). Как известно, Земля состоит из внутреннего ( $G$ ), внешнего ( $E$ ) ядра и мантии ( $D$ ). Энтропия Земли складывается из суммы энтропий её компонент:  $S = S_G + S_E + S_D$ . Распределение температуры по радиусу Земли очевидно:  $T_G > T_E > T_D$ . Именно таким должно быть и распределение энтропий:  $S_G > S_E > S_D$ . (Несмотря на то, что  $S \sim 1/T$ , а связанная энергия  $TS \sim U$ , т.е.  $S \sim U$ , где  $U$  – теплота фазового перехода). Следствием этого распределения должно быть газообразное (плазменное) состояние вещества внутреннего ядра. Представляется логичной идея строения Земли: мантия – кристаллическое вещество, внешнее ядро – жидкость, а внутреннее ядро – газ. Такая система может эволюционировать посредством “работы” двух фазовых переходов первого рода: “конденсация-испарение” ( $U_k$ ) – на границе внутреннего ядра и “кристаллизация-плавление” ( $U_n$ ) – на границе ядро-мантия. На каждом таком фазовом переходе происходит резкое уменьшение энтропии ( $U_k > U_n$ ), если “смотреть” из центра Земли к её периферии. Совсем не так выглядит распределение энтропии в случае т.н. модели холодной Земли, согласно которой внешнее ядро представляет собой расплав, а внутреннее ядро и мантия – кристаллическое состояние:  $S_G < S_E > S_D$ , что невозможно.

1.3.5. Рассмотрим, может ли вообще реализоваться процесс кристаллизации железа внутри расплавленного железного шара. В модели холодной Земли утверждается, что в однородном жидком сферическом ядре происходит затвердевание, кристаллизация его центральной части. Считается, что ядро Земли, в основном, железное, однако имеется примесь (Fe-X), концентрация которой ( $\zeta$ ) может меняться. Будем придерживаться канвы рассуждений, изложенных в (Fearn, 1989). В модели кристаллизации внутреннего ядра принимается несколько вполне разумных предположений. Например, таких как, 1) температура возрастает с глубиной (и величиной давления)  $T = T(p)$ ; 2) температура жидкости  $T_L$  зависит от давления и концентрации  $\zeta$  примеси X:  $T_L(p, \zeta)$ ; 3) градиент  $dT_L/dp$  не может быть круче, чем адиабатический  $dT_A/dp$ ; 4) концентрация примеси в твердом внутреннем ядре меньше, чем в жидком внешнем; 5) в центре ядра температура всегда выше, чем температура кристаллизации:  $T > T_L$ ; 6) изменение концентрации примеси приводит к росту внутреннего ядра:  $I = (\zeta - \zeta_s) dM/dt$ , здесь  $\zeta_s$  – концентрация примеси во внутреннем ядре (эта величина равна нулю, если внутреннее ядро состоит из чистого железа); 7) на границе внутреннего ядра:

$$dT_L/dp = (\partial T_L / \partial p)_\zeta + (\partial T_L / \partial \zeta)_p d\zeta/dp.$$

Температура  $T_L$  уменьшается, когда  $\zeta$  возрастает так, что  $(\partial T_L / \partial \zeta)_p < 0$ . Так как  $dM/dt$  и  $d\zeta/dp$  возрастают,  $dT_L/dp$  уменьшается. В результате, на границе внутреннего ядра может возникнуть ситуация:

$$dT_L/dp < dT/dp,$$

т.е. температура будет ниже, чем температура замерзания. Эта ситуация эквивалентна хорошо известному в химии структурному фазовому переходу. Казалось бы, можно считать доказанным возможность образования твердой кристаллической фазы внутри расплава, однако это не совсем верное доказательство. Покажем, что эта задача имеет совсем другое решение.

Предположим, что фронт затвердевания движется по переохлажденной жидкости с постоянной скоростью (задача Стефана). В системе координат, в которой фронт покоится на сферической поверхности ( $r = const$ ), можно записать уравнение теплопроводности для движущейся среды (решение Лангера, изложенное Ждановым и Трубниковым, 1991):

$$rc_p T + div q_T = 0, \quad q_T = -k\nabla T + rc_p Tv.$$

Здесь  $r$  - плотность,  $c_p$  - удельная теплоемкость,  $q_T$  - количество тепла,  $Tv$  - скорость изменения температуры ( $dT/dt$ ). Обозначим амплитуду возмущения фронта фазового перехода (ФП) через  $a(t, x, y)$ , тогда поверхность возмущенного ФП имеет нормаль  $N = (N_x, N_y, N_z)$ ,  $N \sim a$ .

На фронте ФП (рис. 1-5): 1)  $T_1 = T_2 = T_{пл}$ . Температуры жидкой (1) и твердой (2) фаз равны температуре плавления. 2) условие согласования скачка тепловых потоков:

$$-cN\nabla T_2 = -cN\nabla T_1 + rUv,$$

где  $c$  - коэффициент теплопроводности;  $U$  - теплота ФП плавления,  $U = T(S_1 - S_2)$ ;  $S$  - энтропии соответствующих фаз;  $1/v$  - характерное время процесса. Отсюда следует очевидное условие:  $T_1 > T_2$ , что не выполняется на границе внутреннего ядра, где реализуется ФП. Это условие говорит о тривиальном факте, что твердое тело всегда холоднее его расплава. Очевидно, что на Земле:  $T_1 < T_2$ , что противоречит идее «нормальной» кристаллизации внутреннего ядра из материала внешнего.

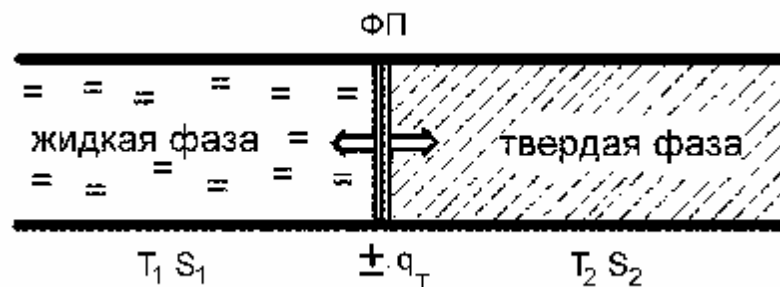


Рис. 1-5. Схема промерзания: ФП – область фазового перехода, кристаллизации.

Далее Жданов и Трубников показывают, что к аналогичной системе уравнений сводится задача о поведении на фронте промерзания некоторой примеси (с концентрацией  $n_{1,2}$ ), описываемой уравнением диффузии для движущейся среды:

$$n'_t + div q_n = 0, \quad q_n = -D\nabla n + nv.$$

При этом в отличие от потоков тепла, имеющих скачок на фронте, обусловленный выделением теплоты плавления, потоки примеси не должны иметь скачка (!), и поэтому для них должно выполняться граничное условие

$$-DN\nabla n_2 = -DN\nabla n_1 + (n_1 - n_2)(v - a'_t)n,$$

где  $v = an$  - вектор скорости границы фазового перехода.

На фронте контакта фаз их химические потенциалы должны совпадать  $m_1 = m_2$ . Химические потенциалы фаз зависят от концентрации, вообще говоря, различным образом. Однако при длительном контакте фаз в системе должно установиться термодинамическое равновесие и концентрации должны принять такие равновесные значения  $n^o_{1,2}$ , чтобы выполнялось равенство  $m_1(n_1^o) = m_2(n_2^o) = m^o$ , где  $m^o$  - общий для всех фаз равновесный химический потенциал. Полученные Лангером решения задачи Стефана показывают, что только за счет изменения концентрации примесей достичь эффекта кристаллизации невозможно. Поэтому, общепринятый в физике Земли подход к проблеме кристаллизации внутреннего ядра из расплава внешнего, по всей видимости, не верен.

1.3.6. Принято считать, что земной радиус постоянен. Утверждается, что это экспериментальный факт (ведь мы видим, что он не меняется). Какой физический закон “заставляет” земной радиус сохраняться постоянным в течение всего периода эволюции? В физике такого “закона” нет, а в геологии есть – это принцип актуализма, согласно которому “всегда было так, как сейчас”.

Однако геологи сами признают, что раньше горы были меньше, а тепловой поток (мы уже говорили об этом) был больше; раньше, например, магнитное поле на Луне было, а потом оно исчезло. Почему?

1.3.7. Принято считать, что выяснение механизма генерации геомагнитного поля, - это «проблема № 1» в физике Земли. Более того, (как мы уже упоминали) Буссе утверждает (1984), что Эйнштейн считал эту проблему одной из трех важнейших проблем физики. Несмотря на колоссальные усилия сотен физиков, занимающихся этой проблемой, нет ни одного достаточно серьезного успеха в этом деле. Проследим еще одну цепочку. Если магнитное поле на Земле обязано динамо-эффекту в жидком железном ядре (что не подвергается сомнению), то почему магнитное поле раньше было на Марсе, Луне, Ио, Ганимеди, а потом исчезло? (Похоже, что на Ганимеди поле ещё существует). Почему оно обнаружено на Меркурии, но его нет на Венере? Почему магнитное поле имеется на больших планетах (по своей структуре, однотипное с земным), где нет железного ядра? Разговоры относительно того, что, дескать, динамо на этих планетах “раскручивается” в жидком водороде, и вообще эти планеты “холодные”, “разбиваются” результатами наблюдений космической станцией Вояджер, которая обнаружила, что тепловой поток на этих планетах значительно превышает поток тепла от Солнца на их расстояниях.

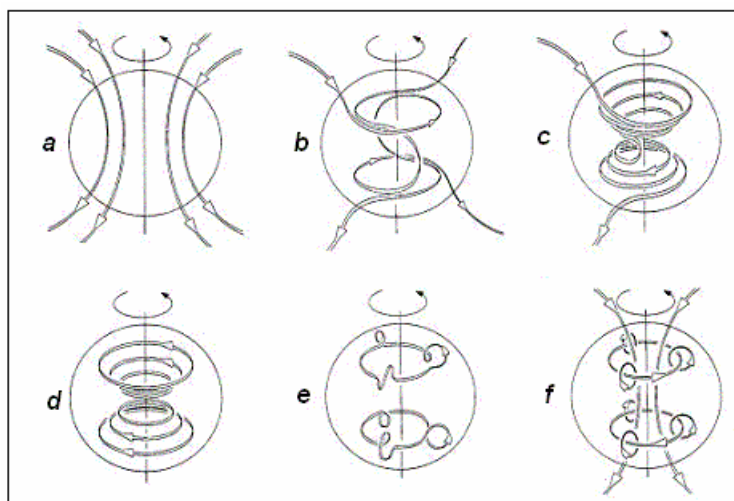


Рис. 1-6. Модель  $\alpha\omega$ -динамо (Love, 1999)

Остановимся на теоретической проблеме динамо. Модель генерации геомагнитного поля базируется на совместном решении нескольких уравнений. Они описывают очень сложный вид движения (см. рис. 1-6) вязкой проводящей жидкости, заполняющей сферическую полость внешнего ядра. Жидкость подвергается воздействию гравитационных, гидродинамических, инерционных и электромагнитных сил. Движение жидкости описывается: гидродинамическим уравнением Навье-Стокса, уравнением индукции, связывающим магнитное поле с движением жидкости, уравнениями неразрывности и термодинамики.

Уравнение Навье-Стокса в векторной форме:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\eta}{3} \nabla (\text{div } \mathbf{v}) - 2(\mathbf{w} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{1}{r} \nabla p + \mathbf{g} - \frac{m}{4\pi r} \text{rot } \mathbf{H} \times \mathbf{H},$$

где  $t$  – время,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $h$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\mathbf{w}$  – вектор угловой скорости вращения Земли,  $r$  – плотность вещества внешнего ядра,  $p$  – давление,  $\mathbf{g}$  – ускорение массовых сил,  $m$  – магнитная проницаемость,  $\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля.

Уравнение индукции в векторной форме:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{v} \wedge \mathbf{H}) + nh_m \Delta \mathbf{H},$$

где  $h_m$  – коэффициент «магнитной диффузии» (магнитная вязкость).

Уравнения неразрывности и диффузии тепла:

$$\begin{aligned} \nabla(\mathbf{v} \wedge \mathbf{H}) &= 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T &= Pr^{-1} \nabla^2 T \end{aligned}$$

Эти уравнения содержат  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{H}$  и должны решаться совместно, однако, их совместного решения до сих пор не получено (и вряд ли возможно), поэтому проблема генерации геомагнитного поля идет в направлении разработки кинематической теории динамо, в которой скорость жидкости  $\mathbf{v}$  считается известной и решается только уравнение индукции, определяющее геомагнитное поле. Если принять, что характер движения жидкости задан (рис. 1-6), необходимость решения уравнения Навье-Стокса отпадает, а уравнение индукции превращается в линейное уравнение в частных производных второго порядка, которое после соответствующих преобразований может быть решено.

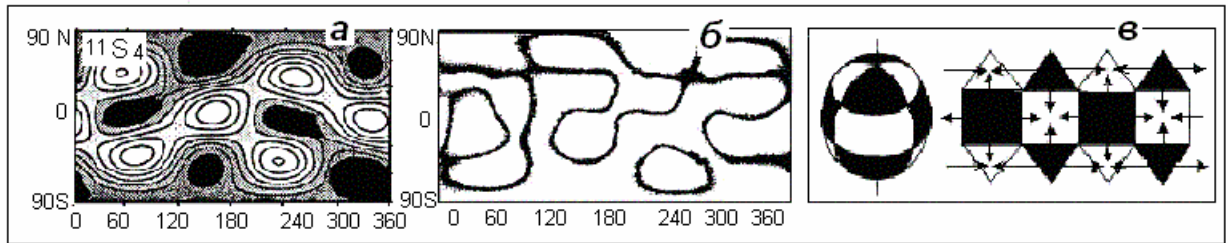


Рис. 1-7. Картины splitting функций внешнего ядра (a) (Giardini et al., 1988), дифракция сейсмических лучей на D''-слое (б) (Wyssession, 1996), интерпретация данных в виде модели Рэлей-Бенаровской конвекции (в) (Кузнецов, 1998).

Обратим внимание на экспериментальные данные, полученные сейсмологами по анализу структуры внешнего ядра с помощью т.н. splitting функций и дифракции сейсмических лучей на слой, отделяющий ядро от мантии (рис. 1-7 а, б) и интерпретацию этих результатов (рис. 1-7-в). Легко видеть, насколько эти данные не похожи на постулируемый в динамо модели характер конвекции.

Внимательный анализ особенностей геомагнетизма в контексте динамо модели показывает, что:

- Динамо не решает ни одной из проблем геомагнетизма, кроме одной, в которой показана принципиальная возможность генерации магнитного поля посредством взаимодействия полоидального (дипольного) и тороидального магнитных полей. Однако при этом не находят решения такие особенности геомагнетизма как: инверсии поля, западный дрейф, движение магнитных полюсов, джерки, морфология поля и т.п.
- Принято считать, что причина появления джерков, т.е. быстрых (в течение одного года) изменений магнитного поля, присуща механизму генерации геомагнитного поля. Если джерки генерируются около поверхности внутреннего ядра, то в этом случае можно оценить электропроводность внешнего ядра Земли:  $S \gg T/mr^2$ , где  $T$  – длительность процесса в годах,  $m$  – магнитная постоянная, а  $r$  – толщина внешнего ядра. Оцененная таким образом электропроводность примерно на 5 порядков меньше, чем постулированная величина проводимости, необходимая для протекания динамо-эффектов.
- Не найдены численные решения уравнения гидродинамики подтверждающие принятую в динамо модель конвекции.

- Данные сейсмологии (travel time, splitting функции) не подтверждают принятую модель конвекции, а, скорее, ей противоречат.
- Нет единой теоретической модели динамо. Огромное количество противоречащих друг другу моделей ( $\alpha\omega$ -динамо,  $\alpha^2$  – динамо, динамо Рикитаки, диск Фарадея и т.д.) говорит о сомнительности этих подходов.
- Принципиальным моментом многих моделей динамо является наличие во внешнем ядре сильного тороидального поля. По некоторым моделям интенсивность тороидального поля больше дипольного в 500 раз. Тем не менее, тороидального поля на поверхности Земли не обнаружено. Мы, вероятно, могли бы не обнаружить наличие тороидального поля на земной поверхности, например, если бы ядро было бы окружено сверхпроводящим экраном. Однако, если бы по какой-либо немыслимой причине, на границе ядра оказался бы сверхпроводящий экран, то мы могли бы судить о его наличии с помощью электромагнитного зондирования.

1.3.8. Согласно общепризнанной концепции тектоники плит, материки и плиты перемещаются по слою астеносферы, находящемуся в литосфере на глубине порядка сотни километров и обладающему особыми свойствами, в частности, пониженной величиной вязкости. Эти зоны обнаруживаются методами сейсмического и электромагнитного просвечивания. Однако, как было показано Алексеевым и др. (1977), эти зоны локализованы в тектонически активных регионах (см. рис. 1-8) и их нет в пассивных областях планеты. Следовательно, нет того слоя, по которому могли бы дрейфовать плиты и материки. Общепринятая точка зрения относительно того, что причиной понижения скоростей сейсмических волн в астеносфере перегрев вещества вплоть до частичного плавления, тоже подвергается сомнению. Например, Карато считает (Karato, 1990), что изменение термодинамических свойств астеносферы обязано не плавлению, как принято считать, а повышению концентрации водорода в зонах присутствия астеносферы.



Рис. 1-8. Схема астеносферных зон СССР (Алексеев и др., 1977).

1.3.9. Ньютон рассчитал степень сжатия вращающейся жидкой Земли, - величина, обратная сжатию, оказалась равной  $1/\epsilon = 232$ . Впоследствии эта величина была определена для реальной Земли,  $1/\epsilon = 298$ . Джеффрис (1960), а за ним и Эвернден (1997) показали, что Земля, если она была всегда такой, как сейчас, никогда не была гидростатичной и, следовательно, на Земле никогда не было глобальной конвекции, которая, как известно, является двигателем плит.

1.3.10. В последние годы усилиями сейсмологов были выявлены удивительные особенности строения Земли. В этих исследованиях использовались два метода. Один состоит в том, что изучается время прохождения двух сейсмических лучей под очень близкими эпицентрными углами. Причем, один луч касается какой-либо оболочки Земли, а другой – нет. Этот метод получил название *travel-time*. С помощью этого метода удалось выявить тонкую структуру D''-слоя и обнаружить анизотропию внутреннего ядра. Эти результаты были подтверждены с помощью анализа спектров расщепления собственных колебаний Земли (*splitting* функций), возникающих как реакция на сильные землетрясения. Выяснилось, что структура D''-слоя очень похожа на структуру F-слоя и они обе близки к картине распределения высот геоида. Кроме этого, данные по структуре *splitting* функций можно интерпретировать как, то, что во внешнем ядре происходит 12-ти ячеистая конвекция и что эта конвекция совсем не напоминает ту, которая должна приводить к генерации геомагнитного поля посредством реализации динамо-эффекта (см. рис. 1-7 и сравни его с рис. 1-6). Эти данные оказались неустраиваемыми моделью холодной Земли, возможно именно потому, что они ей противоречат.

1.3.11. Согласно плитной тектонике, как основной тектонической гипотезе холодной модели, плиты образуются в зонах спрединга и поглощаются в зонах субдукции. Следовательно, плита, поглощаемая в зоне субдукции, должна иметь все более и более «молодой» возраст, если проследить его от зоны субдукции по направлению к спредингу. В действительности, это совсем не так в зонах субдукции на западном берегу Тихого океана. Этот факт ставит под сомнение справедливость гипотезы плитной тектоники, а значит, и холодной модели Земли.

1.3.12. Сейсмичность, в соответствии с основными принципами модели холодной Земли, является результатом столкновения плит и должна проявляться исключительно на их границах. В действительности, землетрясения и вулканы располагаются и вне границ плит, что, тоже находится в противоречии с плитной тектоникой и холодной моделью.

#### Выводы.

В модели холодной Земли встречаются непреодолимые сложности при объяснении:

- резкого увеличения массы океанов в течение последних 200 млн. лет;
- несоответствия с моделью палеоданных о значительно большей температуре поверхности Земли в докембрии;
- невозможности совмещения материков на шаре с радиусом, равным современному (парадокс Мезервея);
- многих вопросов, связанных с земным магнетизмом и магнетизмом планет, в частности, наличие в прошлом магнитного поля у Марса, Луны и спутников других планет;
- изменения величины силы тяжести в течение эволюции Земли и, в частности, отсутствие на Земле в более ранние времена высоких гор;
- отсутствие ясности в вопросе о большей скорости вращения Земли в прошлом и несоответствии фигуры Земли современной скорости;
- отсутствие экспериментального подтверждения наличия на Земле в прошлом интенсивных тектонических процессов т.п.

Все факты и аргументы, касающиеся модели холодной Земли, о которых шла речь в этой главе, могут служить основанием для разработки модели горячей Земли (Кузнецов, 1990), альтернативной холодной.

### *Литература*

- Алексеев А.С., Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н. и др. Схема астеносферных зон Советского Союза. ДАН СССР. Т. 234. № 4. 1977. С. 790-793.
- Батюшкова И.В. Внутреннее строение Земли. М.: Наука. 1966. 194 с.
- Блинов В.Ф. Основные направления исследований расширяющейся Земли. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.
- Браун Д., Массет А. Недоступная Земля. М.: Мир. 1984. 262 с.
- Буллен К.Е. Плотность Земли. М.: Мир. 1978. 442 с.
- Буссе Ф. Магнитная гидродинамика земного динамо. В кн. Вихри и волны. М.: Мир. 1984. 335 с.
- Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра. 1984. 110 с.
- Гутенберг Б. Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 263 с.
- Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и строение. М.: ИЛ. 1960. 484 с.
- Жданов С.К., Трубников Б.А. Квазигазовые неустойчивые среды. М.: Наука. 1991. 175 с.
- Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. М.: Мир. 1989. 427 с.
- Кропоткин П.Н. Пульсационная геотектоническая гипотеза В.А.Обручева и мобилизм. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 217 с.
- Кузнецов В.В. Правильны ли новые подходы к физике Земли? Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 6. С. 286-290.
- Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли. УФН. 1997. Т.167. № 9. С. 1001-1012.
- Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38 № 2. С. 166-170.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.
- Мартюшев Л.М., Селезнев В.Д. Принцип максимальности производства энтропии как критерий отбора морфологических фаз при кристаллизации. ДАН2000. Т. 371. С. 466-468.
- Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра. 1982. 293 с.
- Хомутов С.Ю. Исследование зависимости глобальной сейсмичности от положения луны. Геол. и геофизика. 1995. Т. 36. № 4. С. 88-102.
- Шмидт О.Ю. Происхождение и ранняя эволюция Земли. В кн. Вопросы внутреннего строения Земли. М. ИФЗ. 1955. С. 5-10.
- Эвернден Дж. Ф. О чем говорят параметры фигуры Земли  $\epsilon_a = 1/298$ ,  $C/Ma^2 = 0.333?$  Физика Земли 1997. № 2. С. 85-94.
- Carey S.W. The Expanding Earth. Elseiver. Amsterdam. 1976. 488 p.
- Fearn D.R. Compositional convection and the Earth's core. Geomagnetism and Palaeomagnetism. Ed. Lowes et al., NATO ASI Ser. 1989. V. 261. P. 335-346.
- Giardini D., Li X. D., Woodhouse J. H. Splitting functions of long period normal modes of the earth J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P.13716-13742.
- Julian B.R., Davis D., Sheppard R.M. PKJKP. Nature. 1972. V. 235. P. 317-318.
- Karato S-i The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. Nature. 1990. V. 347. P. 272-273.
- Love J. Reversal and excursions of the geodynamo, Astronomy and Geophysics, December 1999. V 40. P. 6.14 -6.19.
- Okal E.A., Cansi Y. Detection of PKJKP at intermediate periods by progressive multi-channel correlation. Earth Planet. Sci. Lett. 1998. V. 164. P. 23-30.
- Tromp J. Normal-mode splitting observations from the great 1994 Bolivia and Kuril island earthquakes: constraints on the structure of the mantle and inner core. GSA TODAY. 1995. V. 5. N. 7.
- Wysession M.E. Large-scale structure at the core-mantle boundary from diffracted waves. Nature. 1996. V. 382. P. 244-248.

## Глава II. ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ

Предметом нашего исследования является физика горячей Земли, однако Землю, как планету, нельзя рассматривать отдельно от других планет и спутников, и всей Солнечной системы в совокупности. Физика Солнечной системы до настоящего времени, так же как и физика Земли, остается далеко не ясной. В научной литературе обсуждаются различные сценарии возникновения и дальнейшей эволюции Солнечной системы, обсуждаются её удивительные резонансные свойства, астрономы продолжают обнаруживать наличие планет у других звезд и т.д. Действительно, изучение Земли в контексте всей Солнечной системы, хотя и более громоздко, но, наверняка, более продуктивно. По всей видимости, такой подход поможет “отсечь” из рассмотрения физики Земли какие-то аспекты, несвойственные объектам Солнечной системы в целом.

### II.1. Сценарии возникновения Солнечной системы.

Известный астрофизик У.Х. Мак-Крей считает, что рождение планетной системы обязано образованию звезды - “... это самый естественный подход к проблеме. Очевидно, что природа создала галактики, звездные скопления, кратные системы, двойные и одиночные звезды, - одним словом, всё в единой, грандиозной последовательности процессов. Нам известно, что следующий класс объектов в этой последовательности - планеты. Лишь случайное распределение масс определяет, рождается звезда или же планета. Предел последовательности - тело минимальной массы, еще удерживаемой самогравитацией. Планеты существуют, и было бы странно, если бы природа прервала одну последовательность процессов на звездах и начала новую с единственной целью - образовать планеты!

Если, как сказано выше, существует один фундаментальный комплекс процессов, то он должен быть чрезвычайно сложным. Должны существовать факторы, ограничивающие рост каждого класса тел, различные в каждом отдельном случае. Тем не менее, исследование процесса как единого целого - наиболее естественный путь “ (Мак-Крей, 1976, с. 30). Аналогичные идеи высказывались многими физиками и астрофизиками. Например, Ривс (1976) обсуждает ряд вопросов, связанных с происхождением Солнечной системы. Автор приходит к выводу, что, скорее всего, Солнце и планеты происходят из одного протопланетного облака. Что планеты возникали по мере сжатия облака, что при образовании Солнечной системы необходимо преодолеть три барьера: тепловой, магнитный и момента количества движения (тепловая энергия и энергия магнитного поля должны быть меньше гравитационной, а момент количества движения, теряемый Солнцем, не должен передаваться планетам) и т.д.

Многие известные физики Седов (1981), Станюкович (1971), Спитцер (1981) и др. разделяли идею образования Солнца и Солнечной системы в едином процессе самогравитации. Для более ясного видения проблемы напомним, как формировались взгляды ученых в прошлом. Постараемся понять, в чем состоит её суть в наше время.

Проблема образования Солнечной системы всегда интересовала человечество. На раннем этапе своего развития было высказано множество различных гипотез в основном метафизического плана. Одно из первых, действительно научных представлений об образовании и последующей эволюции Солнечной системы было дано И. Кантом. Он рассматривал развитие мира как результат действия противоположных сил притяжения и отталкивания и возвел этот подход в принцип. Кант считал, что Солнечная система образовалась из туманности, состоящей из материальных частиц, которые притягивались друг к другу согласно закону тяготения, открытому И. Ньютоном примерно за 100 лет до Канта. Кант, в дополнение к этому закону, ввел принцип взаимного отталкивания и рассмотрел образование Солнечной системы как единого процесса рождения звезды, планет и их спутников.

П. С. Лаплас, не зная, по словам его современников, о гипотезе Канта, в своем известном сочинении “Изложение системы мира” предложил очень похожую модель. По



Лапласу, до рождения Солнца существовала горячая туманность, которая, вращаясь, сплющивалась и, охлаждаясь, - сжималась. Сжимаясь, туманность вращалась все быстрее и быстрее. За счет центробежных сил, возникающих в процессе сжатия, из туманности выделялись кольца вещества, в которых этот процесс повторялся. В процессе сжатия туманности в центральной её части образовалось Солнце. Кольца сформировались в аналогичные туманности, которые, сжимаясь и вращаясь, привели к образованию планет и их спутников.

Лаплас был великим математиком, однако он не написал нужных формул, описывающих придуманную им гипотезу “системы мира”. Это сделали два других великих француза - математики Э. Рош и А. Пуанкаре. В чем же состоит основная заслуга Лапласа в космогонии? По мнению известного астронома, автора учебников по астрономии и книги о Лапласе, Б.А. Воронцова-Вельяминова (1985), “ ... важнейшей чертой космогонической гипотезы Лапласа являются концентрические газовые кольца, возникшие при вращении первичной туманности” (с. 144). По прошествии многих лет, гипотезу, согласно которой Солнце, планеты и их спутники произошли из протосолнечной туманности, при формировании центрального тела и выделении в ней газовых протопланетных колец, стали называть небулярной (небула - туманность) гипотезой Канта-Лапласа. Эта гипотеза признана в настоящее время несостоятельной, т.к. она не находит объяснения ряду свойств Солнечной системы и, в главную очередь, распределению в системе момента количества движения (об этом ниже в этой главе).

Основной идеей небулярной гипотезы Канта-Лапласа было существование единого механизма формирования звезды, планеты, спутника, при котором, естественно, температура формирующегося тела определялась его массой. Это означало, что планеты образовывались изначально горячими, - расплавленными. По мнению многих ученых, эта гипотеза противоречила опыту изучения внутреннего строения Земли. Дело в том, что благодаря успехам сейсмологии, в начале века было выяснено, что толщина кристаллической мантии порядка 3000 км. Если предположить, что мантия кристаллизовалась из расплава, то за время эволюции Земли, около 4.5 млрд. лет, за счет температуропроводности может кристаллизоваться слой расплава не толще чем 600 - 800 км. Это противоречие до сих пор считается непреодолимым, и именно оно поставило модель горячей Земли “вне закона”. Модель холодной Земли прочно завоевала позиции в науках о Земле. Но как только она была принята научным сообществом, возник ряд специфических проблем: одна из основных, это “обеспечение” холодной Земли причиной появления теплового потока и источником внутреннего тепла. Выход нашелся достаточно быстро. После открытия А. Беккерелем радиоактивности и открытия П. Кюри сопутствующего радиоактивности теплового излучения, Д. Джели произвел расчеты, из которых следовало, что радиоактивности химических элементов, находящихся в составе гранитной, земной коры, вполне достаточно для обеспечения Земли источником внутреннего тепла требуемой мощности.

После того, как гипотеза Канта-Лапласа была признана несостоятельной, возник ряд гипотез, основанных на том, что момент количества движения был привнесен в Солнечную систему извне: Солнце либо захватило некоторую туманность, обладающую наблюдаемым моментом; либо захватило другую звезду и разрушило её; либо по началу обладало спутником с массой в одну десятую массы Солнца и затем разрушило его и т.д. Все эти модели предполагали в своей основе, что в Солнечной системе произошла катастрофа и, следовательно, факт образования Солнечной планетной системы - чрезвычайно маловероятное событие. Авторами этих гипотез были Ф. Мультион, Т. Чемберлен (прилетела звезда и распалась на планетезимали); Дж. Джинс и Г. Джеффрис (вещество туманности было выброшено из Солнца при встрече со звездой); Г. Койпер, В.Г. Фесенков, В.А. Амбарцумян и др. в той или иной мере рассматривали образование Солнечной системы как катастрофическое событие. Наибольшую популярность из катастрофических моделей завоевала гипотеза О.Ю. Шмидта.

В качестве основы своей модели Шмидт использовал явление захвата Солнцем роя частиц, двигавшихся в одной плоскости (плоскости экватора) и имевших различные начальные моменты количества движения. В модели Шмидт учитывал удельные моменты, т.е. моменты, деленные на массу захваченных частиц. Он, в частности, задался вопросом, "... все ли значения моментов равновероятны или, скажем, большие менее вероятны, или наоборот? Этого мы наперед, не знаем. Если бы был задан какой-нибудь закон распределения моментов, какая-нибудь дифференциальная функция распределения, то мы могли бы применить некоторые критерии для того, чтобы сравнить эту функцию распределения с фактическими данными. Правда мы не имеем роя в прежнем виде, но мы имеем результат его *склеивания* - планеты, а момент, как известно, при этом сохраняется ..." (Шмидт, с. 49, 1949).

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

Проблему малости количества движения, приходящегося на Солнце, авторы моделей преодолевают каждый своим способом. Так, например, согласно гипотезам С. Биркеланда и Х. Берлаге, протопланетное вещество истекает из Солнца в виде заряженных ионов. Радиус орбиты планеты определяется массой и зарядом иона. Согласно Ф. Хойлу, когда протосолнце, сжимаясь, достигло радиуса (0.2 а.е.), при котором выполнилось условие равенства гравитационной и центробежной сил, возникла неустойчивость вращательного движения. Развитие этой неустойчивости привело к выбросу из протосолнца части его вещества. Температура протосолнца в этот момент была достаточна для ионизации выброшенного вещества, а сильное магнитное взаимодействие обеспечило передачу момента количества движения от протосолнца к выброшенному из него веществу. Хойл считает, что таким образом ему удалось объяснить "поразительный факт", что Солнце обладает столь малым моментом. Х. Альвен предположил, что частицы газового облака, захваченного Солнцем, падая на него, ионизировались. Благодаря тормозящему действию магнитного поля, момент количества движения Солнца передавался ионизованному газу.

Большинство гипотез образования Солнечной системы в той или иной степени связаны с использованием геометрической прогрессии закона Тициуса-Боде. К ним относится и модель Шмидта. В начале отметим две теории: первую, М.Вульфсона и Б.Пендредра и, вторую, И.Уильямса. В первой, образование Солнечной системы - это результат отторжения от Солнца его вещества при сближении с проходящей мимо звездой. По второй гипотезе, система возникла благодаря гравитационному коллапсу захваченного Солнцем газового облака. Обратим внимание на гипотезу Х. Берлаге, в который он рассмотрел уравнения равновесия вращающейся туманности с учетом гравитационных сил и внутреннего давления газа. Расстояния планет до Солнца, по Берлаге, зависят от температуры газа и его химического состава.

В этот ряд можно поставить получившую наибольшую популярность теорию С. Вайцзекхера, в которой принимается, что Солнце и околосолнечная туманность имеют единый химический состав. Туманность представляет собой вращающийся диск, в котором за счет внутреннего трения возникает турбулентность, приводящая к образованию вихревых ячеек, разместившихся в кольцах, на которые разбивается туманность. Вихри, формирующие планеты, задают им вращение вокруг оси. Имеет смысл остановиться на теории Г. Койпера, который полагал, что удаленность планеты от Солнца связана с увеличением её массы. В его теории протопланетная турбулентная туманность, находящаяся в состоянии, близком к пределу Роша (предельное расстояние, на котором приливные силы разрушают твердую планету), превращается в отдельные газовые сгустки - протопланеты (Ньетто, 1976).

Результаты исследований проблемы образования Солнечной системы, полученные в последнее время, сосредоточены в двух сборниках, переведенных на русский язык (Происхождение..., 1976; Протозвезды ..., 1982). Среди них уже упоминавшийся нами обзор Мак-Крея, который, в частности, посвятил немалую часть его проблеме слипания планет из допланетных тел - планетезималей. По мнению Мак-Крея, это явление не имеет физических оснований. Г.Ривс приходит к заключению, что "... при столкновении каменных тел со скоростями, типичными для движения по кеплеровским орбитам вокруг Солнца (10 км/с), их объединение маловероятно" (Ривс, 1976, с.71).

Обзор теорий происхождения Солнечной системы из первичной солнечной туманности дан в работе Д. Тер-Хаара (1976). Говоря о законе Тициуса-Боде, он подчеркивает, что этот закон гораздо лучше выполняется для спутников, чем для планет. Этой зависимости, согласно расчетам А. Прентиса, подчиняются радиусы колец, возникающих при сжатии звезды. По Прентису, сжимающаяся звезда обладает плотной внешней кольцеобразной оболочкой, По мере сжатия, связь между звездой и кольцом ослабевает и, в дальнейшем кольцо начинает существовать помимо звезды. Тер-Хаар, рассматривая эту модель, замечает, что таким образом можно получить планеты, но нельзя - спутники. Дело в том, что он априори принял т.н. холодную модель образования планет, согласно которой планеты медленно конденсируются (какой уж тут коллапс кольца и аналогия со звездой!) из вещества туманности.

Среди гипотез образования Солнечной системы отметим работы Р.Б. Ларсона и Дж.П. Острайкера, посвященные гидродинамическим расчетам коллапса и проблеме образования Солнечной системы. Ларсон (1976), рассматривая коллапс сферического не вращающегося межзвездного облака с начальным радиусом  $1.6 \times 10^{17}$  см ( $10^4$  а.е.), получил ряд интересных результатов. Среди них, оценка времени образования звезды  $\approx 2 \cdot 10^5$  лет; если образование планетного диска происходит одновременно с образованием звезды, то это время ещё меньше. При коллапсе вращающегося облака, по Ларсону, образуются кольца Лапласа, причем тенденция к образованию кольца проявляется на ранней стадии сжатия; устойчивый диск и, соответственно, устойчивые кольца образуются на той стадии, когда уже имеется сильная концентрация массы в центре. Следовательно, допланетный диск формируется после того, как зародыш Солнца приобрел большую часть своей массы. Ларсон подчеркивает сходство механизмов образования Солнечной системы и систем спутников трех больших планет. Рассматривая те же гидродинамические аспекты коллапса, Острайкер (1976) приходит к заключению, что для образования планетной системы нужен диск с малой массой и большим моментом количества движения. В своих расчетах он учитывает вязкость вещества диска, которая привела к формированию протопланетного диска с требуемыми параметрами.

Боденхаймер и Блейк (1982) так же рассчитывали гидродинамику коллапса, учитывая вращение, газовое давление и самогравитацию. Расчеты показали возможность образования колец Лапласа в структуре с максимумом плотности в кольце. Они провели расчеты эволюции отделившегося кольца, вещество которого вновь собирается в диск и процесс продолжается аналогично предыдущему, связанному с выделением колец.

В заключение обзора, остановимся на статье У.К. Хартмана (1982), в которой он подчеркивает, что “... пока не существует единой, общепринятой, современной теории образования планет, есть только много отдельных работ, обеспечивающих медленный прогресс в нужном направлении” (Хартман, 1982, с.73). Хартман приходит к выводу, что планеты - гиганты были образованы в результате крупномасштабного гравитационного коллапса, так как он убедительно объясняет системы их регулярных спутников, как миниатюрные “солнечные системы”. В то же время, Хартман считает наиболее подходящим механизмом для возникновения планет земного типа, процессы столкновений. С таким выводом согласиться невозможно. О том, что все планеты Солнечной системы образовались “по одному сценарию” говорит, в частности, её фрактальный характер.

Ещё раз отметим, что проблема образования Солнца, Земли, других планет и их спутников – одна из самых старых проблем, волнующих человечество. Механизм образования планеты играет принципиальную роль и определяет её физические свойства и особенности эволюции. В течение последних 50 лет принято рассматривать только один из двух возможных сценариев образования Земли и других планет. Это сценарий, по которому Земля постепенно, в течение примерно 100 млн. лет, «склеивалась» из планетезималей, возникающих в протопланетном облаке. Такой механизм приводит к образованию «холодной» планеты, т.к. всё тепло, которое выделяется при её формировании, излучается в космос. Другой возможный механизм образования планеты, это быстрое сжатие её вещества за счет самогравитации. При этом вещество планеты, в том числе и Земли, оказывается нагретым до высокой температуры, а тепло, выделяющееся при образовании, запасается в её недрах. Например, вещество Земли при таком способе «изготовления» оказывается нагретым до температуры ~ 30 000 К (Магницкий, 1968). Температура вещества Юпитера в момент его образования, согласно предыдущей оценки, оказывается порядка 300 000 К и т.п.

Механизм образования холодной Земли и других планет Солнечной системы считается общепринятым. Однако, согласно экспериментальным данным астрономии и астрофизики этот механизм не получил ни одного подтверждения. По-видимому, первый «удар» механизму холодного образования планет был нанесен после интерпретации данных, полученных космическими аппаратами «Пионер-Х» и «Пионер-ХІ», с помощью которых 25 лет тому назад было обнаружено мощное тепловое излучение, исходящее от Юпитера (Козырев, 1977). В этих экспериментах так же обнаружена высокая симметрия гравитационного поля Юпитера, характерная для газового шара. Козырев (1977) оценил температуру центральной части Юпитера по величине теплового потока из его недр. Эта температура оказалась равной 165 000 К, что примерно в два раза ниже, чем наша оценка (см. рис. 2-4). После открытия теплового излучения Юпитера возникла дискуссия о том, что представляет собой Юпитер: планету или звезду. Заметим, что в последнее время появились работы, в которых авторы допускают, что недра Юпитера, как и других планет гигантов, - горячие (Boss, 1995). Второй «удар» механизму холодного образования планет был нанесен открытием «Коричневых карликов» – инфракрасных звезд, занимающих по массе промежуточное положение между Юпитером и Солнцем (Allard, 1995; Nelson, 1995; Rebolo et al., 1995). Возникла парадоксальная ситуация: Юпитер – планета холодная, в недрах которой водород находится в жидком, и даже твердом состоянии, а Коричневый карлик, масса которого всего в 10 раз больше чем у Юпитера, – звезда (хоть и инфракрасная). Наконец, результат, полученный в самое последнее время с использованием внеатмосферного телескопа Хаббла (Throop et al., 2001), можно считать третьим и самым решительным «ударом» по холодной модели. В этой работе (Throop et al., 2001) приведены результаты исследований спектров пропускания галактического электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн при просвечивании

circumstellar disks in the Orion nebula. Возраст этого circumstellar disks не превышает 100 тыс. лет. Согласно общепринятой модели образования планет, в таком диске должны находиться планетезимали, рассеивающие это излучение. Однако ожидаемого эффекта поглощения электромагнитного излучения не обнаружено. Авторы (Throop et al., 2001) пришли к выводу, что планеты в этом диске уже сформировались, хотя их время формирования значительно меньше (в 1000 раз!), чем следует из принятой модели формирования планет.

Запуск космического телескопа им. Спитцера (Аризонский университет, США) принес новую сенсацию: В 2004 г. вокруг некоторых старых звезд обнаружено инфракрасное излучение от пылевых колец и дисков. Очевидно, что этот факт так же находится в противоречии с общепринятой моделью формирования планет (Savage, Clavin, 2004).

*Что же такое планеты?* Оказывается, такая постановка вопроса вполне своевременна и актуальна. Данные по обнаружению планет в других звездных системах и изучению планетарных туманностей – своеобразных «колыбелей» планет, полученные с помощью телескопов Хаббла и Спитцера в самые последние годы в межзвездной астрономии, вполне оправдывают привлечение внимания к такому, казалось бы, весьма тривиальному вопросу. На страницах журнала Science (McCaughrean et al., 2001) и в Internet (Lissauer, 2001) в 2001 г. разыгралась дискуссия на тему: “What is a Planet?” Эта дискуссия показала, что однозначно ответить на поставленный вопрос пока нет возможности. Вероятно, дело в том, что холодная модель образования планет находится в противоречии с данными, касающимися проблемы формирования планет, полученными в самое последнее время.

## II.2. Фрактальный характер расстояний планет от Солнца.

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

$$R = 0.4 + 0.3 \times 2^n. \quad (2.1)$$

Это скейлинговое соотношение, здесь  $R$  – расстояние (в а. е.),  $n$  – целые числа (для Меркурия,  $n = -\infty$ , для Венеры,  $n = 0$ , для Земли,  $n = 1$  и т.д.). Аналогичные закономерности характеризуют расстояния от планеты до спутников в системах Юпитера, Сатурна и Урана (рис. 2-1). Этот факт подчеркивает общность механизмов формирования Солнечной системы и систем спутников этих планет.

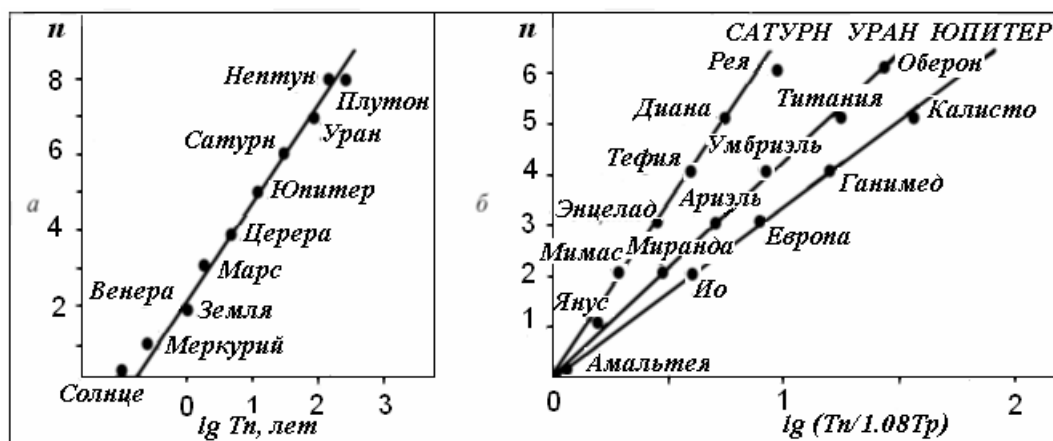


Рис. 2-1. Закон Тициуса-Боде для Солнечной системы (а) и систем Сатурна, Урана и Юпитера (б).

Астроном Гершель, в соответствии с правилом Тициуса-Бодде, 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-Бодде справедлива и для многих спутников Юпитера, Сатурна и Урана ( $T_n \approx T_0 A^n$ , где  $T_n$  – период обращения  $n$ -ого спутника вокруг планеты,  $T_0$  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 (Кузнецов, 1990)). В любом случае, правила типа закона Тициуса-Бодде, или резонансные свойства Солнечной системы, обязаны одной из двух (либо обоим сразу) причин: Это следствие образования планетной системы, либо результат очень длительного процесса взаимодействия небесных тел между собой.

Если в Солнечной системе имеет место скейлинг, то можно ли говорить о ней как о фрактальной, самоорганизующейся структуре? Положительный ответ на этот вопрос позволил бы совершенно по-новому взглянуть на извечную проблему, как образовалась Солнечная система.

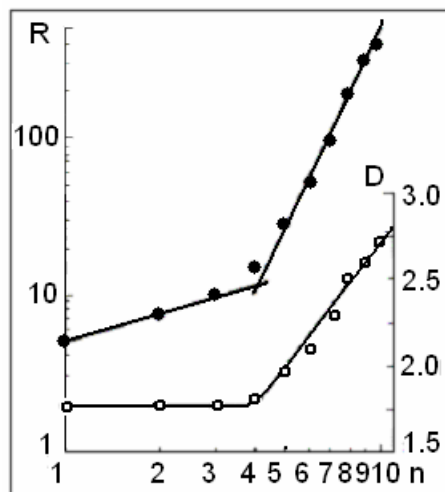


Рис. 2-2. Зависимость расстояния планеты от Солнца  $R$  (а.е.) величины фрактальной размерности  $D$  от порядкового номера планеты  $n$  ( $lg$ - $lg$ ). 1- Меркурий, 2- Венера, 3 – Земля, 4 – Марс, 5 – пояс астероидов, 6 – Юпитер и т.д.

Присутствие процессов самоорганизации в такой структуре как Солнечная система обязано проявиться наличием фрактальных свойств, которые, как известно, являются пространственно-временным “срезом” процессов самоорганизации. Самоорганизация происходит, как правило, при наличии двух процессов: диффузии и переноса. Если нам удастся вскрыть два таких взаимосвязанных процесса, фрактальность Солнечной системы получит подтверждение. Представим себе, что Солнечная система действительно обладает фрактальными свойствами. В этом случае можно оценить фрактальную, хаусдорфову размерность (Mandelbrot, 1983)  $D_H$ , например, следующим образом:

$$D_H = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)}. \quad (2.2)$$

Здесь  $N$  – число событий,  $r$  – их энергия (сила). Зная величину фрактальной размерности, можно говорить о характере процесса самоорганизации. В Солнечной системе совсем не много параметров, на анализе которых можно делать вывод о наличии процессов самоорганизации. Фактически таких параметров два: номер планеты  $n$  (в отличие от (2.1)) и её расстояние от Солнца  $R$ . В такой ситуации, если бы была обнаружена зависимость типа:

$$R \gg A + n^D, \quad (2.3)$$

где размерность  $D$  – нецелое число,  $A$  – константа, то можно было бы говорить о фрактальности Солнечной системы.

Расстояния планет от Солнца  $R$  от номера планеты  $n$  представлены на рисунке 2-2 (точки). Здесь  $R$ , для удобства представления, выражается в единицах 10 а.е. Зависимость  $\lg R - \lg n$  для планет Солнечной системы позволяет выделить две группы планет, из них, 1-я: Меркурий (1), Венера (2), Земля (3), Марс (4) и 2-я: группа от пояса Астероидов (5), до Плутона (10). На этом же рисунке (рис. 2-2) показана фрактальная размерность  $D$ , которая выявила интересную особенность зависимости (2.3).

Величина  $D$  определялась нами по формуле:

$$D \gg \lg R / \lg n, \text{ где } R_{(\text{AU})} \gg 0.1(3 + n^D). \quad (2.4)$$

Для Меркурия (1), Венеры (2), Земли (3) и Марса (4) величина  $D$  неизменна и равна 1.75 (см. рис. 2-2, ромбы), для пояса Астероидов (5)  $D$  возрастает до 1.97 и дальше, постепенно увеличивается, достигая для Нептуна и Плутона величины 2.6. О чем это может говорить? Принято считать, что чем ниже величина  $D$ , тем выше степень самоорганизации структуры и, что по мере эволюции самоорганизующейся системы, величина её фрактальной размерности падает. Величина  $D = 1.75$  для планет 1 – 4 может говорить о том, что эти планеты прошли один, общий для них путь формирования.

Солнечная система это двумерная структура, т.е. топологическая размерность её равна двум. Мы получили размерность системы не целое, а дробное число, этот факт говорит об её фрактальности. Размерность внутренних планет оказалась ниже 2, это показывает, что они при образовании и в процессе эволюции достигли более высокой степени самоорганизации, чем внешние планеты. Этот факт может означать, например, что процесс формирования планет земной группы происходил на фоне (как будет показано ниже) единого для Солнечной системы волнового процесса, определившего положение планет относительно Солнца, и механизма переноса массы от этих планет к Солнцу, формирующемуся за счет этого переноса. Рисунок 2-2 демонстрирует, что разделение планет Солнечной системы на внутренние, подобные Земле, и внешние, имеет не только внешнюю сторону, но и более глубокие внутренние корни. По-видимому, единый в начале формирования Солнечной системы процесс был разорван, что имело смысл бифуркации, произошедшей в зоне пояса астероидов.

### II. 3. 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:

$$r = M_n / \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2). \quad (2.5)$$

В таблице 1 приведены величины поверхностной плотности для Солнца (С) и планет (М - Меркурий, В - Венера, З - Земля и т.д.). Это же распределение в log-log

масштабе для  $r = f(R)$  изображено на рис. 2-3. Нельзя не обратить внимания на четкую зависимость величины плотности от расстояния до Солнца, для планет Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Эта зависимость не может быть случайной. Скорее всего, она показывает нам распределение плотности в протосолнечной туманности в момент формирования самого Солнца и планетной системы накануне бифуркации.

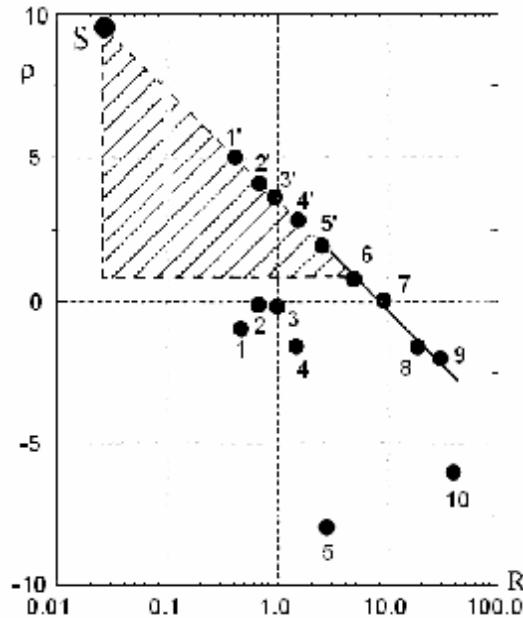


Рис. 2-3. Величина поверхностной плотности для планет Солнечной системы (lg-lg). Масса заштрихованного треугольника равна массе Солнца.

Таблица 2.1

	С	М	В	З	М	А	Ю	С	У	Н	П
M	$3 \times 10^5$	0,05	0,815	1	$10^{-1}$		317	95	14,5	17,2	0,002
R	$5 \times 10^{-3}$	0,39	0,72	1	1,52	2,8	5,2	9,54	19,2	30,7	39,5
lg(ρ)	9,6	-0,97	-0,14	-0,2	-1,62		0,72	0,17	-1,78	-2,02	-6

#### II. 4. Сжатие диска и критерий Джинса.

Английский физик Д.Х. Джинс, занимаясь проблемой эволюции и устойчивости звезд, показал, что самогравитации звезд и их последующему сжатию препятствует собственное давление межзвездного газа. Действительно, здесь можно увидеть противоречие: чем плотнее вещество, тем самогравитация должна быть сильнее, но тем выше и собственное (газокинетическое) давление, препятствующее самогравитации. Соотношение между самогравитацией и газокинетическим давлением «регулируется» критерием Джинса, который требует, чтобы концентрация вещества должна быть больше некоторой критической плотности  $r_C$ , при которой гравитационные силы и внутреннее давление точно сбалансированы. Численная оценка плотности вещества для облака с массой  $M$  и температурой  $T$  (Клейтон, 1982; Jeans. 1916):

$$m_C = 10^3 [T^3 / (M/M_\odot)] \text{ см}^{-3}. \quad (2.6)$$

Здесь критическая плотность вещества:  $r_C = m_C m m_p$ ,  $m$  - атомный вес,  $m_p$  - масса протона. Типичное большое диффузное облако может иметь массу  $M = 10^3 M_\odot$  и  $T = 100$  К. ( $M_\odot$  - масса Солнца). В этом случае, концентрация частиц в облаке  $m \approx 10 \text{ см}^{-3}$  составляет всего  $10^{-2}$  от  $m_C \approx 10^3 \text{ см}^{-3}$ .

Масса, необходимая для коллапса протозвезды:

$$M_{\text{н}} \approx 1/795 (R_g T / G)^{3/2} r^{-1/2}, \quad (2.7)$$



где  $R_g$  газовая постоянная,  $G$  - постоянная тяготения,  $r$  - плотность вещества облака.

Критическая Джинсова плотность  $r_c = M_n / I^2$ , где  $I$  - Джинсова длина волны,  $I = R_n - R_{n-1}$ . Критическая масса Джинса  $M_{Jn}$ , при которой может начаться гравитационное сжатие,

$$M_{Jn} = rI^2 = M_n (R_n - R_{n-1})^2 / \pi (R_n^2 - R_{n-1}^2); \quad (2.8)$$

отсюда:

$$M_{Jn}/M_n \approx (R_n - R_{n-1}) / (R_n + R_{n-1}). \quad (2.9)$$

Условие самогравитации (2.9) выполняется для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Однако, это совсем не так для планет земной группы: их масса значительно меньше критической Джинсовой:  $M_{Jn}/M_n$  для Земли, Марса, Юпитера, соответственно:  $10^4$ ;  $10^5$ ; 0.3.

Рисунок 2-3 показывает зависимость плотности от расстояния до Солнца ( $R$ ) для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна:  $r = A R^n$ , где  $n \approx 3.55$  – показатель степени,  $A$  – константа. Эта зависимость прерывается в районе пояса астероидов ( $5'$ ), где произошел разрыв, бифуркация в цепи процессов фрагментации протосолнечного диска на отдельные кольца в момент образования Солнца и планет. Процесс формирования Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна из отделившихся от диска колец продолжался, и вещество, находящееся в выделенном кольце, собралось в большую планету. При этом были сформированы системы спутников, аналогичные планетам Солнечной системы. В планетах земного типа к моменту бифуркации успели сформироваться лишь железно-каменные ядра будущих планет. Вся оставшаяся масса протосолнечного диска (в основном водород) была использована на образование Солнца. На рис. 2-3 заштрихованный треугольник показывает ту часть вещества протосолнечного диска, которая пошла на формирование Солнца массой  $M_\odot$ .

Однако, это совсем не так для планет земной группы: их масса значительно меньше критической джинсовой (см. Таблицу 2.2).

Таблица 2.2

	М	В	З	М	А	Ю	С	У	Н	П
М	0,05	0,815	1	$10^{-1}$		317	95	14,5	17,2	0,002
$\lambda$	0,4	0,3	0,3	0,52	1,3	3,4	4,3	9,7	11,5	8,8
$M_J/M$	$10^6$	$10^4$	$10^4$	$10^5$	$10^8$	0,3	0,3	0,33	0,23	$10^3$

Таблица 2.3 лишней раз иллюстрирует различия между планетами земного типа и планетами гигантами. Здесь сравнивается величина гравитационного потенциала Солнца на орбитах Земли, Юпитера и Сатурна с собственным гравитационным потенциалом этих планет. Видно, что у Земли он меньше, чем  $GM/R$  Солнца на её орбите, а у Юпитера и Сатурна - выше. Рисунок 2.3, Таблицы 2.2 и 2.3 показывают нам, что Природа сохранила “подсказку” в виде четкой зависимости  $r(R)$  для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Наша задача состоит в том, чтобы извлечь из неё пользу.

Таблица 2.3

GM/R Солнца вблизи	Земли	Юпитера	Сатурна
каждой из планет:	$6 \times 10^{12} \text{ (см/с)}^2$	$10^{12} \text{ (см/с)}^2$	$6 \times 10^{11} \text{ (см/с)}^2$
GM/R планет:	$6 \times 10^{11} \text{ (см/с)}^2$	$2 \times 10^{13} \text{ (см/с)}^2$	$6 \times 10^{12} \text{ (см/с)}^2$

Еще раз обратимся к рисунку 2-3 и постараемся проанализировать четкую логарифмическую ( $\lg r - \lg R$ ) зависимость плотности от расстояния до Солнца  $R$  для четырех больших планет. Зависимость  $r(R)$  для Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна можно определить выражением:  $r = A R^n$ , где  $n \approx 3.55$ . Эта зависимость прерывается в

районе пояса астероидов. Складывается впечатление, что именно в районе пояса астероидов произошел разрыв, бифуркация в цепи процессов фрагментации протосолнечного диска на отдельные кольца в момент образования Солнца и планет. Процесс формирования планет: Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна из отделившихся от диска колец прекратился и оставшаяся масса протосолнечного диска “пошла” на образование Солнца и лишь малая его часть была “израсходована” на формирование Земли, Венеры, Марса и Меркурия. Если принять такую модель, то масса протовещества, “оставшаяся” после формирования планет земной группы должна быть примерно равна массе Солнца  $M_{\odot}$ . Массу  $M_{\odot}$  можно оценить по формуле:

$$M_{\odot} = \int_r^R x r dx, \quad (2.10)$$

где  $x$  – текущий размер протосолнца. Плотность  $r = A x^{-n}$ , ( $x$  вместо  $R$ ), тогда  $M_{\odot}$ :

$$M_{\odot} = A \int_r^R x x^{-n} dx = A [x^{-n+2} / (-n+2)] \Big|_r^R. \quad (2.11)$$

Подставляя  $R$  и  $r$ , получаем:

$$M_{\odot} \approx A r^2 / (n-2) r^n. \quad (2.12)$$

Здесь  $R$  - радиус орбиты пояса астероидов, а  $r$  - радиус протосолнца в момент бифуркации,  $n$  мы оценили по наклону прямой ( $n = 3.55$ ). Оценим величину  $A$ , подставив значения массы  $M_{Ю}$  и радиуса орбиты  $R_{Ю}$  для Юпитера:

$$A = R_{Ю}^n M_{Ю} / \pi R_{Ю}^2 = 1/1.55 \pi (R_{Ю}^{1.55} M_{Ю}). \quad (2.13)$$

Подстановка формулы  $A$  в выражение для  $M_{\odot}$  дает:

$$M_{\odot}/M_{Ю} \gg 1/5 (R/r)^{1.55}, \quad (2.14)$$

где  $r$  текущий радиус формирующегося Солнца. Величина  $r$  после подстановок известных величин оказывается равной 2.5 млн. км, что примерно в три с небольшим раза больше чем радиус современного Солнца. Т.о. бифуркация произошла в момент формирования Солнца, когда его радиус был примерно в три раза больше современного, т.е. процесс его формирования еще не закончился.

## II.5. Возможный механизм образования Солнечной системы.

Принято считать, что звезды в галактиках образуются в результате развития некоторого волнового механизма, генерирующего волны плотности. Теория спиральной структуры галактик стала быстро развиваться после появления серии работ С.С. Линя и Ф.Х. Шу (Lin, et al., 1969; Roberts, 1969), в которых они предложили модель спиральных волн плотности. Согласно модели, по спиральным рукавам Галактики распространяются продольные волны плотности, которые генерируются в её центральной части, аналогично звуковым волнам плотности, распространяющимся в газе (Каплан, Пикельнер, 1979; Клейтон, 1982). Плотность звездного вещества возрастает в пучностях этих волн, и таким образом, создаются условия, необходимые для образования звезд.

Предположим, что аналогично этому может происходить генерация волн плотности внутри протосолнечной туманности в момент образования Солнца. По крайней мере, в модели Линя и Шу нет никаких масштабных ограничений, которые не позволяли бы использовать механизм генерации волн плотности, сопутствующих образованию Солнца. Аналогичным образом волны плотности должны возникать и при формировании планет гигантов.

Используем механизм Линя и Шу, причем будем полагать, в дальнейшем, что при формировании Солнечной системы, (а так же при формировании систем Юпитера, Сатурна и Урана) за счет эффектов самогравитации вещества, в протосолнечном (протопланетном) диске, возникали волны плотности. Волновая структура определяла положение планет, вращающихся вокруг Солнца, и спутников, вращающихся вокруг планет. Взаимосвязь самогравитации и волн плотности очевидна: Вращение

протосолнечного диска имеет фундаментальное значение для нашей модели, однако, трудно представить, что медленное вращение может оказать существенное влияние на процессы самогравитации.

Примем следующие элементы концепции:

- Распределение плотности вещества в диске и его устойчивое вращение с необходимой кинетической энергией, обеспечивало планетам, после их формирования, необходимую скорость движения их по Кеплеровским орбитам.
- Плотность и температура вещества диска были достаточно высоки для того, чтобы начался процесс самогравитации с гравитационной (Альфвеновской) скоростью падения частиц на центральное тело (Солнце или планету), большей, чем та скорость, которая требуется по критерию Джинса.
- Химический состав вещества диска соответствовал химическому составу образующихся планет.
- В момент образования Солнца характер распределения плотности вещества диска резко изменился, т.е. произошла бифуркация процесса образования.
- Процессы самогравитации планет (спутников), с последующим сжатием и уплотнением вещества диска, являются следствием гравитационного возмущения, вызванного формированием Солнца (планеты)
- Распределение плотности вещества родительского диска от расстояния до Солнца соответствовало распределению плотности до бифуркации.

Сделаем пару дополнительных замечаний: 1. Скорость увеличения радиуса центрального уплотнения диска  $dr/dt$  автомодельно возрастает с увеличением размера тела. 2. Если мы правы в нашем предположении, что Солнечная система и системы регулярных спутников Юпитера, Сатурна, и Урана имеют общий, единый механизм формирования, мы имеем возможность оценить нижний предел массы планеты, у которой образуется такая система спутников:  $\approx 15 M_E$  ( $M_E$  – масса Земли). Вокруг Урана, масса которого  $14.5 M_E$  система регулярных спутников имеется, в то время как вокруг Нептуна ( $17.2 M_E$ ), - её нет. Возможной причиной такого различия между Ураном и Нептуном состоит в том, что плотность вещества диска в области формирования Нептуна значительно ниже, чем в области формирования Урана (рис. 2-3). Вероятно, эта же причина привела к тому, что в окрестности Земли сформировалась Луна, аналогично тому, как около Нептуна сформировался Тритон.

Приведем оценку времени формирования звезды, планеты, спутника, полагая, что по какой-то причине в протопланетном диске начался процесс формирования её центральной части – ядра. Модель будем строить на аналогии с процессом коагуляции, т.е. роста капли при “падении” на неё частичек газа. Обозначим характерное время столкновения частицы газа с “каплей” (зародышем звезды, планеты, спутника), через  $t$ . Время  $t = (S n v)^{-1}$ , где  $S = \pi r^2$  – сечение “капли”,  $n = r/m$  – концентрация частиц в газе,  $m$  – масса частицы,  $v$  – её скорость,  $r = (V_k)^{1/3}$  – радиус капли,  $V_k = V_q g$  – объем капли,  $V_q$  – объем частицы,  $g$  – число частиц в капле.

Время роста капли:

$$t = \int dg / S n v, \quad (2.15)$$

т.к.  $S = \pi(V_q g)^{2/3}$ , то  $t = g^{1/3} / (V_q^{2/3} n v)$ , или  $t \gg r / (V_q n v)$ . Подставляя значение  $n$  и заменяя:  $m/V_q = r_n$  – плотность планетного вещества ( $r_n = 3 \text{ г/см}^3$ ), получаем выражение для  $t$ :

$$t = (r_n / r_0) \times (r/v), \quad (2.16)$$

здесь  $r_0$  – плотность вещества протопланетного диска.

Из формулы 2.16 следует, что время формирования космического тела пропорционально его размеру, обратно пропорционально исходной плотности вещества и скорости дрейфа частиц диска. Подставляя выражение для  $v = (GM/R)^{1/2}$  и плотности  $r_n$ , получаем выражение для  $t_{min}$ :

$$t_{min} = 1 / r_0 \times (r_n / 4\pi G)^{1/2}. \quad (2.17)$$

Время образования (в годах) после подстановки  $r_0$  ( $\text{г/см}^3$ ):

$$t_{min} \gg 10^4 / r_0 \quad (2.18)$$

Скорость роста “капли”  $dr/dt$  оценим аналогично предыдущему:

$$dr/dt = r r_0 (4\pi G / r_n)^{1/2}. \quad (2.19)$$

Как мы условились, при образовании Солнца и планет Солнечной системы действовал единый механизм. Во-первых, происходило сжатие вещества и образование центрального тела, во-вторых, - вращение всего диска и, в-третьих, возникновение волн плотности, в пучностях которых образовывались центры вторичных, уже протопланетных дисков. Действие этого автомодельного механизма было прервано, произошла бифуркация, в результате чего на месте пояса Астероидов не образовалось планеты “Фэтон”, а масса внутренних планет оказалась значительно меньше, чем внешних. Как мы выяснили выше, это явление могло быть связано с изменением режима сжатия диска при образовании Солнца.

Есть ли свидетельства, подтверждающие или опровергающие сказанное нами? Для ответа на этот вопрос, вернемся ещё раз к рисункам 2-2 и 2-3. Как мы отмечали (рис. 2-2), расстояния от Солнца до внутренних планет  $R \sim n^{1.75}$ . Затем (начиная с пояса астероидов) показатель степени постепенно возрастает по мере удаления от Солнца. Плотность вещества диска убывает по мере роста расстояния (увеличения номера планеты  $n$ ):  $r \sim R^{-3.55}$  (рис. 2-3). Допустим, что до бифуркации распределение плотности в области образования внутренних планет было точно таким же.

Предположим, что в сжимающемся протосолнечном диске действовал волновой механизм, генерировались волны плотности с частотой  $w$ , аналогичные звуковым, причем, скорость их распространения  $c_s$  зависит от давления  $p$  и плотности вещества  $r$  как:

$c_s \sim (gp/r)^{1/2}$  ( $g$  - показатель адиабаты). Предположим, что  $p \sim 1/R$ ,  $r \sim 1/R^2$ , тогда  $c_s \sim R^{1/2}$ . Ранее было принято, что  $I \sim R$ , тогда:  $w = c_s/I \sim R^{-1/2}$ , т.е. частота волн плотности весьма слабо зависит (убывает) от расстояния до Солнца  $R$ . Зависимость  $w \sim R^{-1/2}$  показывает, что вещество диска вращалось дифференциально, что вполне естественно, если учесть наличие вязкости его вещества.

Возможно, частота  $w$  каким-то образом связана с частотой вращения протосолнца, которая, как будет показано ниже, раньше была значительно больше, чем современная. Если это действительно так, то получающиеся при этом скорости распространения волн плотности в протосолнечном диске оказываются несколько большими, чем принятые для скорости звука в такой газообразной среде. Как относиться к этим оценкам и можно ли на их основании делать какие-либо определенные выводы, не совсем ясно. Ясно одно, что мы слишком мало знаем о физике процессов, происходящих в момент образования звезды и её планетной системы.

Можно ли что-либо определенное сказать о роли самоорганизации в процессе формирования планет, особенно, планет земного типа? Для самоорганизации необходимо наличие двух связанных друг с другом процессов: диффузии и перколяции. На эту роль могли бы претендовать два очевидных механизма: обмен волнами плотности, во-первых, и, во-вторых, - собственно сама самогравитация (самосжатие). Вполне возможно, что для описания механизма образования Солнечной системы удастся записать уравнения типа уравнений Фоккера-Планка. Очевидно, что получить простое дифференциальное уравнение, которое можно было бы попытаться решить аналитически, надежды нет.

## II. 6. Почему не образовалась планета Фэтон?

Если масса планеты меньше Джинсовой критической массы, то она не должна образоваться за счет механизма самогравитации (самосжатия). Если учесть, что начальная плотность вещества обособившегося кольца, из которого формировалась планета, была значительно больше, чем та, которая получается делением массы планеты на площадь кольца (например, для Земли эта плотность была больше примерно на 4 порядка: точки 3 и 3' на рис. 2-3), то окажется, что начало самосжатия вполне возможно. Важным моментом здесь будет то, что бифуркация произошла тогда, когда самосжатие внутренних

планет уже началось, и уже успели сформироваться ядра будущих планет, но окончательно оно ещё не закончилось. Почему же не образовалась планета Фаэтон? Ведь и в этом случае начальная плотность вещества диска была больше критической Джинсовой. Кажется, что хотя бы маленькая планета, пусть даже меньше Марса, но должна бы успеть сформироваться в районе пояса Астероидов. Очевидно, что процесс самосжатия на орбите пояса Астероидов имел место, но в результате появились лишь астероиды, а не планета. Следовательно, существует какая-то другая причина, помешавшая формированию планеты. Попробуем предложить одно из возможных решений.

Обратим внимание на ещё один критерий, связанный с формированием планеты, о существовании которого мы раньше не упоминали. Обозначим:  $v_R$  – скорость дрейфа частиц вдоль кольца радиусом  $R$  ( $R$  равно расстоянию до Солнца). Эта скорость определяет время формирования протопланетного диска  $t_R$ :  $t_R = 2\pi R/v_R$ , отсюда следует, что  $t_R \sim R$ . Условие образования планеты очевидно:  $t_p > t_R$ , где  $t_p$  мы оценили выше (2.18) как:  $t_p \gg t_{min} \gg 10^4/r_0$ . Для удобства, вместо  $t_R$  введем некую плотность  $\rho_R \sim 1/t_R$ , которая  $\sim 1/R^2$ . Вполне возможно, что именно в области пояса астероидов условие:  $t_p > t_R$  не выполнялось. Из рисунка 2-3 следует, что линия  $\rho_R$  проходит ниже точки 5', которая показывает плотность диска перед началом бифуркации. Вполне возможно, что этот, или подобный ему механизм, был причиной того, что Фаэтон в Солнечной системе не образовался. В области формирования этой планеты произошло изменение плавного течения процесса. Характер сжатия изменился, произошел разрыв сплошности диска, началась стадия быстрого, коллапсирующего сжатия и формирование Солнца. Распределение плотности диска изменилось и вместо начальной плавной функции (продолжение прямой 9 – 6 на рис. 2-3), оказалось, что по мере приближения к Солнцу, величина плотности стала убывать (точки 4 – 1 на рис. 2-3).

Вернемся к нашим оценкам. Выше мы отмечали, что если разделить массу планет земного типа на Джинсову критическую массу, то оказывается, что самосжатие и образование их невозможно. Однако будем учитывать, что начальная плотность вещества обособившегося кольца, из которого формировалась планета, была значительно больше, чем та, которая получается делением массы планеты на площадь кольца. Например, для Земли эта плотность была больше примерно на 4 порядка. В этом случае гравитационное самосжатие вполне возможно, по крайней мере, возможно, начало этого процесса. Важным моментом здесь будет то, что бифуркация произошла тогда, когда самосжатие внутренних планет уже началось, но ещё не окончилось. Почему же не образовалась планета Фаэтон? Ведь и в этом случае начальная плотность вещества диска была больше критической Джинсовой.

Здесь необходимо сказать ещё об одном, достаточно очевидном критерии, о котором мы раньше не упоминали. Он связан с формированием планеты. Температура газа вещества диска и его молекулярный состав определяют скорость распространения через него звуковых волн. Очевидно, что любые другие скорости дрейфа молекул будут меньше чем скорость звука ( $c_s$ ). Если это не так, то в системе образуются ударные волны, роль которых мы пока не рассматриваем. В этой связи, введем скорость дрейфа частиц вдоль кольца радиусом  $R$ :  $v_R < c_s$ . Эта скорость определяет конечное время, в течение которого вещество кольца соберется в новый протопланетный диск. Это время, обозначим его  $t_R$ , будет в основном определяться радиусом кольца  $R$ :  $t_R = 2\pi R/v_R$ , иначе:  $t_R \sim R$ . Очевидное условие формирования протопланетного диска, а вслед ему и самой планеты, можно определить так:  $t_p > t_R$ , где  $t_p$  мы оценили выше как:  $t_p \approx 10^4 / r_0$ . Так как плотность вещества диска  $\rho_0 = A R^{-n}$ , где  $n \approx 3.55$ , то, казалось бы, зависимости  $\lg t - \lg R$  должны быть параллельны друг другу, никогда не пересекаться, а наше условие всегда должно выполняться.

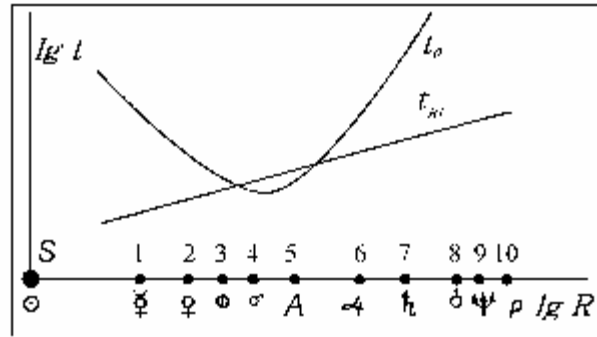


Рис. 2-4. Соотношение ( $lg - lg$ ) времён образования планеты  $t_p$  и стягивания вещества кольца  $t_R$  в зависимости от расстояния планеты  $R$  до Солнца (S). 1 – Меркурий, 2 – Венера, и т.д.

По всей видимости, на самом деле это было совсем не так. Вернемся к нашей модели образования Солнечной системы, к моменту начала бифуркации. Благодаря волновому механизму, обособились кольца, начался процесс стягивания материала колец в протопланетные диски, и здесь что-то случилось с плавным течением процесса. Характер сжатия изменился, произошел разрыв сплошности диска, началась стадия быстрого, коллапсирующего сжатия и формирование Солнца. Распределение плотности диска изменилось и вместо начальной плавной функции, оказалось, что по мере приближения к Солнцу (скорее, еще к протосолнцу), величина плотности стала убывать, как это показано на рис. 2-3. В области, занимаемой поясом астероидов, величина плотности оказалась близкой той, которая была в зоне роста Марса и Земли.

В (Кузнецов, 1984, 1990) приведены величины плотности для Земли, Марса и пояса астероидов, соответственно:  $10^{-8}$ ,  $2 \times 10^{-8}$ ,  $2 \times 10^{-8}$  г/см<sup>3</sup>, что дает величины  $t_p$ :  $10^4$ ,  $5 \times 10^3$ ,  $5 \times 10^3$  лет. В свою очередь, величина  $t_R$  равна  $3 \times 10^3$ ,  $4.8 \times 10^3$ ,  $8.4 \times 10^3$  лет для Земли, Марса и пояса астероидов, соответственно. Следовательно, условие:  $t_p > t_R$ , для области пространства диска, занимаемой поясом астероидов, не выполнялось. Вполне возможно, что в эту область частично попало кольцо протомарса, и именно поэтому он оказался таким маленьким. Рисунок 2-4 иллюстрирует сказанное: время  $t_p$  в области Марса и пояса астероидов оказывается примерно одинаковым, но для пояса астероидов меньшим, чем время “собираения” вещества в планетный диск, а затем в планету.

## II. 7. Куда “пропал” момент?

Выше мы неоднократно касались вопроса о том, что небулярная гипотеза Канта-Лапласа неверна потому, что она не находит объяснения, почему 98% момента количества движения Солнечной системы сосредоточено в планетах, и его так мало (2%) приходится на Солнце? Иначе, этот вопрос можно переформулировать: почему Солнце вращается так медленно?

Сделаем два замечания. Во-первых, во всех книгах утверждается, что на Солнце приходится 2% от полного момента. Элементарные оценки показывают (Кузнецов, 1990), что на самом деле, на Солнце “приходится” еще меньшее количество момента (0.5%). Во-вторых, обратимся к анализу данных по вращательному моменту количества движения диффузных и плотных облаков, с массой, равной солнечной, приведенных в статье А.П. Босса (1985). Анализ показывает, что момент вращающегося диффузного облака солнечной массы составляет примерно  $10^7$  моментов Солнца, быстро вращающихся звезд Главной последовательности – около  $10^3$ , а звезды типа Солнца в Плеядах – примерно в десять раз больше, чем момент количества движения Солнца. Если принять, что Солнце вместе со своей системой планет прошло весь путь от вращающегося облака до

современного состояния, то возражение, основанное на перераспределении момента между Солнцем и планетами, оказывается не столь уж категоричным. Таким образом, модель образования звезды, её планет и спутников, как единый процесс, т.е. как модель Канта-Лапласа, имеет право на существование и развитие.

Наша модель образования Солнечной системы основана на том, что протопланетное “облако”, из которого она образовалась, изначально вращалось. Надо сказать, что вращение – общее свойство материи, хотя в Природе не совсем ясны его причины. Очевидно, для того, чтобы любая модель была внутренне согласована, необходимо выполнение условия баланса момента количества движения, между Солнцем и планетами. В настоящее время этот момент практически полностью сосредоточен во внешних планетах. Отсюда следует, что Солнце на самом начальном пути эволюции обязано было вращаться значительно быстрее, чем сейчас, - примерно в 100 – 1000 раз.

Что можно сказать о более ранних стадиях эволюции звезд солнечного типа? Оказывается, что звезды моложе Солнца, звезды, типа звезд Т-Тельца (возраст  $10^6$  лет), вращаются значительно быстрее Солнца (Имхофф, 1982). Анализируя звезды различного возраста, было установлено, что с возрастом скорость вращения убывает:  $\sim t^{-1/2}$ . Звезды типа Т-Тельца обладают скоростью вращения около 150 км/с. Имхофф (1982, с. 810) отмечает, что если бы Солнце вращалось с такой скоростью, то “его момент количества движения был бы примерно равен моменту количества движения планет. Отсюда напрашивается вывод, что солнечная туманность могла участвовать в общем вращении задолго до стадии Т-Тельца. Когда планеты сформировались, и туманность стала тонкой, обращение планет и вращение Солнца разделились. Затем, по мере того, как Солнце теряло массу, его вращение замедлялось ... и по прошествии миллиардов лет оно стало столь медленным, как в настоящее время”.

Замедление вращения звезды за счет потери её массы, - по-видимому, не единственный из возможных механизмов. В (Кузнецов, 1984) предложен другой механизм замедления, суть его заключалась в том, что при скорости вращения звезды порядка 300 км/с и более, значительную роль может играть анизотропия излучения. На экваторе излучение будет несколько жестче, чем на полюсах за счет проявления эффекта Доплера. Действие эффекта анизотропии излучения также, в принципе, может замедлять вращение звезды.

Самым простым решением проблемы уменьшения скорости вращения Солнца, в течение времени его эволюции, с точки зрения, развиваемой здесь физической модели, было бы его расширение, аналогично тому, как расширяется Земля и другие планеты. Если встать на такую позицию, то уменьшение скорости вращения Солнца примерно в 50 раз потребовало бы семикратного увеличения его радиуса. Эта идея остается пока гипотетической, так как пока нет (по крайней мере, у меня) данных, подтверждающих заметное увеличение размеров звезды в процессе её “спокойной” эволюции. Принятой точкой зрения на физику торможения звезд считается замагниченный звездный ветер и связанное с ним явление уменьшения уровня поверхностной активности.

## II.8. Единая последовательность: звезда – планета – спутник.

Наша модель базируется на постулате, согласно которому Солнце, планеты и их спутники образовались по единому “сценарию”, и в едином процессе. Механизм образования один для звезды, планеты, спутника. Все различия между ними заключаются лишь в количестве исходного материала, участвующего в этом процессе. Однако, это, казалось бы, естественное и очевидное предположение, находится в противоречии с общепринятыми на сегодня взглядами на образование планет и спутников. Поэтому, нам необходимо обосновать это предположение.

Принято считать, что в основе существования звезды лежит термоядерная реакция. Принято так же считать, что минимальная масса звезды, в которой еще способна протекать термоядерная реакция, составляет примерно 1/25 от массы Солнца.

Естественно, возникает вопрос, что же получится за объект, если его масса окажется меньше минимальной? Хорошо известно, что если масса меньше, чем масса Солнца примерно в 1000 раз, то “получается” Юпитер. Есть ли в Природе объекты, больше Юпитера, но меньше 1/25 Солнца? Оказывается такие, “промежуточные” объекты сравнительно недавно были обнаружены. По-видимому, первыми в 1985 г. такой объект обнаружили астрономы Аризонского университета и обсерватории Китт-Пик (США). Его масса составляла примерно 1/100 массы Солнца, температура поверхности  $\approx 1400$  К. Этот объект был слишком мал для звезды и слишком горяч для планеты. Такие объекты, в последствии, были обнаружены и другими астрономами. Эти объекты стали называть “коричневыми карликами”. Казалось бы, цепь замкнулась: Солнце - коричневый карлик - Юпитер. Однако препятствием здесь является убеждение в том, что Юпитер, это холодная планета, в центре которой находится твердый водород. Это общее убеждение даже не подвергается капли сомнения, несмотря на то, что ещё космические аппараты “Пионер X” и “Пионер XI” обнаружили мощное тепловое излучение, исходящее из планеты Юпитер, значительно превышающее тепловое излучение Солнца на орбите Юпитера. Кроме этого, гравитационное поле Юпитера симметрично и соответствует по своему характеру гравитационному полю газового шара. Несколько лет тому назад на страницах популярных журналов широко дискутировался вопрос о том, что представляет собой Юпитер, планету или звезду. Аналогичные наблюдения были сделаны космическими аппаратами и в окрестности Сатурна и Урана. И там тоже было обнаружено мощное тепловое излучение, превышающее по интенсивности Солнечное на их орбитах. Тем не менее, общепринятая модель внешних планет признает их холодными телами, содержащими твердый водород во внутреннем ядре, и жидкий водород в ядре внешнем. Именно в этом, жидководородном ядре, согласно холодной модели, происходит генерация магнитного поля за счет возбуждения динамо-эффекта. Таким образом, наличие “коричневых карликов” продолжает логичную последовательность “недоросших” звезд. В то же время холодные планеты, с массой, меньшей, чем у “карликов” всего в 10 раз, эту последовательность - разрушают.

Согласно развиваемой здесь модели, такая последовательность, включающая звезды, планеты и спутники, должна иметь место, хотя она, естественно, является неким, достаточно грубым приближением. Эта последовательность не учитывает многих аспектов и особенностей, среди которых, например, различия в светимости между одновозрастными звездами, обладающими одинаковыми массами и т.д. Рисунок 2-5 показывает зависимость логарифма температуры звезды, планеты, спутника от логарифма их массы. Как следует из этого рисунка, спутники, планеты и “коричневые карлики” (инфракрасные звезды), все они являются продолжением Главной последовательности звезд. Как тут еще раз не вспомнить Мак-Крея, с его идеей относительно того, что звезды и планеты (добавим: и спутники, и инфракрасные звезды) “проходят один путь”. Все их различия определяются только количеством вещества, участвующего в процессе. Именно оно определяет главную характеристику объекта - его температуру.

Под температурой ( $T$ , рис. 2-5) мы понимаем температуру центральной части звезды, планеты, спутника. Такой температурой обладало вещество космического тела в момент образования. За время эволюции Солнечной системы эта температура сохранилась (несколько уменьшившись) лишь в центральной части тела. Величину температуры оцениваем по формуле:  $T \approx 3/5 \times GM/Rc_p$ , где  $c_p$  - теплоемкость вещества,  $G$  - гравитационная постоянная,  $R$  - радиус космического тела. В первом (грубом) приближении, можно считать теплоемкость и плотность вещества примерно постоянными для всех объектов, тогда выявляется простая зависимость температуры от величины массы вещества звезды, планеты, спутника:  $T \sim M^{2/3}$ . В эту зависимость включены звезды «Главной последовательности», “Коричневые карлики”, планеты и их семь “больших” спутников. Заметим, что реально величина  $c_p$  увеличивается с ростом температуры, поэтому оценки температуры по этой формуле несколько завышены.



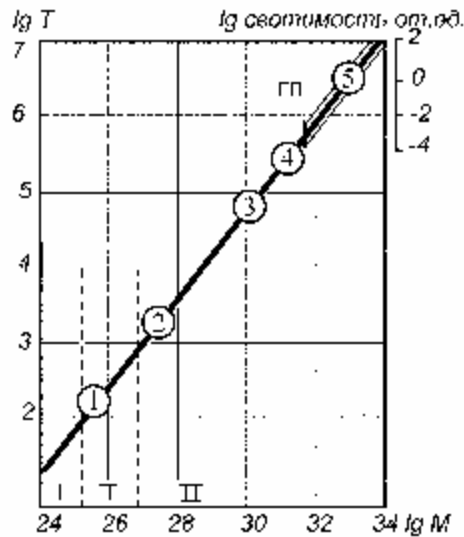


Рис. 2-5. Температура  $T$  образования звезд (Солнце - 5), Коричневого Карлика (4), Юпитера (3), Земли (2) и Луны (1) как функция их массы  $M$ . В верхнем правом углу зависимость светимости звезд Главной Последовательности (ГП, в отн. ед.) от их массы. В Солнечной системе можно выделить объекты: I, II, III- классов.

Зависимость подобную ( $T \sim M^{2/3}$ ) для звезд Главной последовательности можно получить (Кузнецов, 1984), если сопоставить два графика из книги Чандрасекара (1950). На одном из них приведена зависимость светимости (в относительных единицах) от температуры  $T$ , а на втором - светимость от массы звезды  $M$  (рис. 2-5, вверху справа). Сопоставляя данные этих графиков, можно получить примерно:  $T \sim M^{2/3}$ . (Мы, естественно, полагаем, что температура поверхности звезды однозначно связана с температурой её ядра).

Обратим внимание на закономерность Солнечной системы: все тела в ней, размером от Солнца до спутника Юпитера - Европа, обладают сферической формой. Гравитационный потенциал  $GM/R$  Европы примерно равен 2 кДж/г, что при “разумной” величине теплоемкости  $c_p = 0.3$  кал/г. град определяет температуру её вещества порядка  $1.5 \times 10^3$  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  $U_{ii} = 15$  кДж/г, а величину теплоты плавления (кристаллизации)  $U_{ii} = 1$  кДж/г. Космические тела Солнечной системы можно условно разделить на три класса. К первому, отнесем те, у которых  $GM/R < U_{ii}$ , ко второму:  $U_{ii} < GM/R < U_{ii}$  и к третьему те объекты, у которых  $GM/R > U_{ii}$ . Малые спутники и астероиды отнесем к первому классу (см. рис. 2-5), ко второму, - большие спутники и маленькие (меньше Венеры) планеты и, к третьему, - планеты с массой, большей, чем у Венеры.

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:  $M \approx 2 \times 10^{25}$  г и  $R \approx 10^8$  см., а  $GM/R = 1$  кДж/г. Согласно нашей модели, Земля в момент

образования полностью прошла газообразную стадию. Критерий полного испарения (Зельдович, Райзер, 1966) требует выполнения условия:  $GM/R = 2 U_{и}$ , отсюда (см. таблицу 2.4)  $U_{и} = 15$  кДж/г.

Таблица 2.4

Масса, радиус, гравитационная энергия и давление в центре Земли, планет и спутников

		$M/M_{Земли}$	$R/R_{Земли}$	$E/E_{Земли}$	$\rho/\rho_{Земли}$	$E/U_{п} (U_{и})$
1	Титания	$7 \times 10^{-4}$	0,08	$7 \times 10^{-3}$	–	0.2
2	Европа	$8 \times 10^{-3}$	0,23	0,034	0,015	1.2
3	Ио, Луна	$1,2 \times 10^{-2}$	0,26	0,038	0,026	1.3
4	Ганимед	$2,5 \times 10^{-2}$	0,4	0,06	0,04	1.4
5	Меркурий	$5,5 \times 10^{-2}$	0,375	0,14	0,13	4.2
6	Марс	$10^{-1}$	0,53	0,19	0,14	6.0
7	Венера	0,815	0,93	0,85	0,76	1.7
8	Земля	1 ( $6 \times 10^{27}$ г)	1 ( $6,4 \times 10^8$ см)	1 (30 кДж/г)	1 (3,6 Мбар)	2.0
9	Уран	14,5	3,8	3,77	1,11	7.5
10	Нептун	17,2	3,9	4,35	2,34	8.7
11	Сатурн	95	9,4	10	1,4	20.0
12	Юпитер	317	11,14	28,3	7,03	57.0

Используя принятые оценки, космические тела Солнечной системы можно “разбить” на три класса (см. Таблицу 2.4). 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,  $GM/R > U_{и}$ . Таким образом, к первому классу относятся малые спутники и астероиды, ко второму, большие спутники и маленькие (меньше Венеры) планеты и к третьему, планеты с массой, большей, чем у Венеры. Как мы покажем дальше, вещество планет третьего класса в момент их образования полностью прошло газообразную стадию. В свою очередь, объекты первого класса при образовании не прошли стадии полного плавления. Объекты второго класса были полностью расплавлены, а часть их вещества находилась в газообразном состоянии. (Как мы покажем в VI главе, посвященной магнитному полю, в большинстве случаев: объекты второго класса имели магнитное поле в прошлом, объекты первого класса - обладают полем в настоящее время).

Как нам представляется, соображения, высказанные выше, - очевидны. С точки зрения модели горячей Земли проблема сферической формы у крупных спутников и несферической, - у более мелких спутников и астероидов решается очень просто. Совсем не так обстоят дела с её решением в модели холодной Земли. Сошлемся на работу Слюты и Воропаева (1998), посвященной этой проблеме. Эти авторы считают, что наблюдаемый резкий переход между малыми телами с неправильной угловатой фигурой и планетными телами, обладающими сфероидальной фигурой, обусловлен пределом текучести вещества при низких температурах как силикатных, так и ледяных тел Солнечной системы. Величина дифференциальных напряжений, способных превысить предел текучести, определяется массой тела. Предел текучести, согласно модели авторов, зависит от температуры, которая различается на разных расстояниях от Солнца. Величина предела упругости определяет величину критической массы, выше которой космическое тело становится сфероидальным. Так, например, радиус железного тела, обладающего критической массой в районе пояса астероидов ( $T = 200 - 300$  К) будет иметь 260 км, а в области системы Сатурна ( $T = 70 - 80$  К), уже 340 км. (Надо заметить, что авторами предложено весьма не простое и не очень убедительное объяснение очевидного факта).

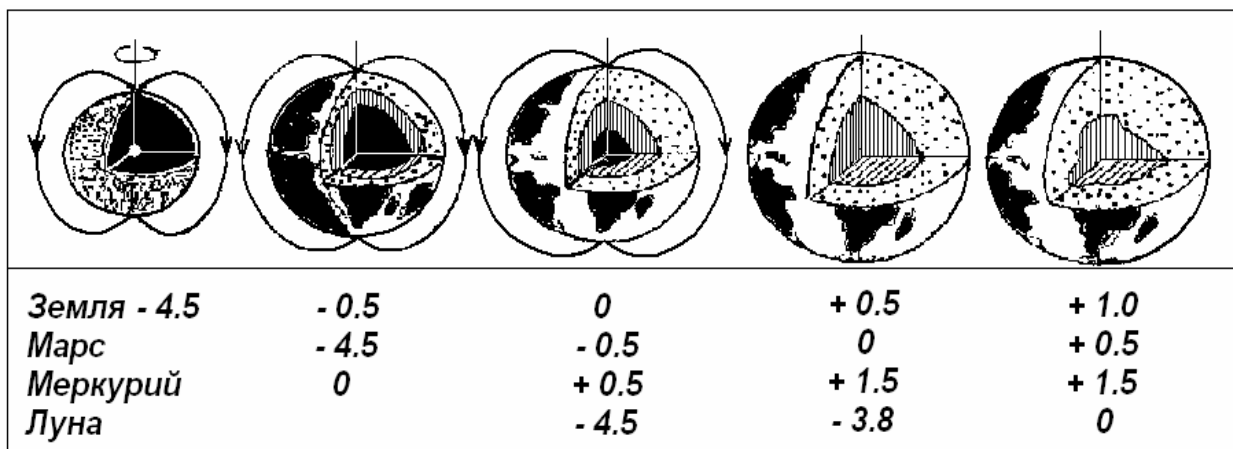


Рис. 2-6. Внутреннее строение Земли, Марса, Меркурия и Луны на различных этапах эволюции.

### II.9. Сколько воды на Луне и Марсе?

Наша модель позволяет более или менее строго ответить на этот вопрос, который в последнее время стал очень популярным в связи с успехами и достижениями в изучении космических тел Солнечной системы, полученными с помощью космических аппаратов. Согласно нашей модели горячей Земли (подробнее в третьей и последующих главах), её эволюция связана с образованием кристаллической мантии. Именно этот процесс происходит с образованием воды мирового океана. Отношение количества воды на Земле к массе мантии равно примерно  $k = 3.5 \times 10^{-4}$ . Будем считать, что оно 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  $M_0$  от полной массы планеты  $M$ . (Такая ситуация имела место с планетами и спутниками обладающими массой, меньшей чем у Венеры):

$$GM^2/R = M U_{\text{п}} + M_0 2U_{\text{и}},$$

Отсюда масса воды  $M_{\text{В}}$ :

$$M_{\text{В}} = kM/2U_{\text{и}} (GM/R - U_{\text{п}})$$

Цифры, приведенные в правом столбце таблицы 2.4, позволяют оценить часть вещества планеты (спутника), которая находилась в момент образования в газообразном (солнечном) состоянии ( $M_0$ ). В процессе эволюции это вещество сначала конденсировалось, затем кристаллизовалось, а при кристаллизации выделилась вода. Мы полагаем, что вещество, находящееся в расплавленном состоянии в момент образования планеты (спутника) воду, как и другие летучие, «потеряло». Цифры, расположенные в левой части правого столбца, показывают отношение удельной гравитационной энергии спутника (планеты) к теплоте испарения. Если это число больше 1, то оставшаяся (после вычитания 1) часть показывает, сколько вещества оказалось в газообразном состоянии. Например, отношение  $E/U_{\text{п}}$  для Марса равно 6 (см табл.). Это означает, что  $5 U_{\text{п}}$  гравитационной энергии Марса пошло на испарение. Теплота испарения больше, чем теплота плавления примерно в 15 раз. Значит, фактически испарилось  $5U_{\text{п}}/U_{\text{и}} = 1/3$  массы Марса ( $2 \times 10^{26}$  г). Учитывая коэффициент  $k = 3.5 \times 10^{-4}$ , на который необходимо умножить величину испарившейся массы планеты ( $M_0$ ), количество воды на Марсе не должно превышать  $10^{22}$  г, а на Луне воды должно быть примерно в сто раз меньше ( $5 \times 10^{20}$  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:  $2 \times 10^{22}$  г.

## II. 10. Есть ли другие планетные системы?

В ноябре 1999 года в некоторых газетах появилось сенсационное сообщение относительно того, что астрономам удалось впервые увидеть (прямым методом) вращение планеты вокруг звезды HD209458 в созвездии Пегас. Яркость этой звезды уменьшалась при прохождении планеты по её диску примерно на 1.7 %. Затмение позволило оценить размер далекой планеты. Звезда HD209458 находится от нас на расстоянии в 153 световых года.

До этого времени астрономам было известно о существовании более чем 20 планет у различных звезд. Все эти планеты были вычислены с использованием т.н. косвенного метода, по доплеровскому смещению. Кстати, в 1995 году в том же созвездии Пегас была вычислена планета, обращающаяся вокруг звезды «51 – Пегас».

Прямой метод прост по постановке, однако, сложен по исполнению. Дело в том, что излучение планеты «меркнет» в лучах более яркой «родительской» звезды. Косвенные методы включают в себя тщательное наблюдение за звездой для того, чтобы обнаружить гравитационное влияние на неё, обращающейся вокруг звезды планетой (Блэк, 1991). Когда планета перемещается по орбите, она «тянет» звезду то в одну, то в другую сторону. Эти гравитационные возмущения проявляются в слабых колебаниях звезды, накладывающихся на её траекторию движения. Они могут быть зарегистрированы как периодические изменения скорости дрейфа звезды по регистрации эффекта Доплера. К примеру, если бы какой-либо астроном следил за Солнцем с другой звездной системы, то он зафиксировал бы основное колебание нашей звезды на орбите, с периодом обращения Юпитера в 11.5 лет.

Среди звезд, у которых искали планетные системы, наиболее известная, это звезда Барнарда. Эта звезда быстрее других перемещается по небу и находится сравнительно недалеко от Солнца (6 световых лет). Примерно к 1960 году после почти 45-летнего периода наблюдений за этой звездой было вычислено, что на её орбите вращаются две планеты, размером примерно с Юпитер, с периодами обращения 12 и 24 года. Другим широко известным объектом с субзвездной массой стал открытый в 1984 году спутник соседней с Солнцем звезды Ван Бисбрук 8, получивший обозначение VB8-b. Его масса составляла примерно 1/20 от массы Солнца. Именно этот объект был первым обнаруженным коричневым карликом. В настоящее время можно утверждать, что не существует непрерывного ряда объектов, заполняющих промежуток между звездами и планетами

## Выводы

Обратимся к физике самоорганизации. Как известно, открытая система самоорганизуется в том случае, если в системе сосуществуют два процесса: диффузии и переноса (перколяции). Как отмечалось, в основе нашей модели образования Солнечной системы положено взаимодействие двух механизмов. Во-первых, это генерация и распространение волн плотности вдоль протосолнечного диска от его центра к периферии. Этот механизм приводит к образованию сгущений материи в пучностях волн. Здесь, в дальнейшем, начинается гравитационное самосжатие вещества. Во-вторых, это перенос вещества от периферии диска к образующейся в его центре звезде – Солнцу. Чем эффективнее происходит взаимодействие этих механизмов друг с другом, тем эффективнее самоорганизация, и тем ниже параметр  $D$ . Параметр  $D$  оказался ниже в области внутренних планет. Этот факт говорит о том, что процесс их образования проходил в более «комфортных» условиях, чем у больших газообразных планет. То, что этот параметр плавно меняется от  $D = 1.75$  до  $D = 2.6$  показывает, что все планеты Солнечной системы образовались в едином процессе. Уменьшение плотности потока

переноса массы с увеличением расстояния от Солнца очевидно, По-видимому, именно этот факт был определяющим в том, что  $D$  возрастает с ростом  $R$ . То, что масса вещества, «отнятого» у планет земного типа, точно равна массе Солнца, - так же говорит в пользу того, что планеты образовались в одном сценарии образования звезды.

Заметим, что используемое нами понятие самогравитации (самосжатия) не имеет четкого и однозначного толкования. В теории звездообразования Линя и Шу (Lin, et al., 1969; Roberts, 1969) используется понятие самогравитации, как единственный способ образования звезды в тех областях пространства, куда приходится пучность галактической волны плотности. Очевидно, что для начала процесса самогравитации необходимо выполнение условия критерия Джинса. Однако совершенно не ясно, что может произойти, если процесс самогравитации уже начался, а в силу изменившихся обстоятельств, - количество вещества стало уменьшаться, например, за счет выноса его к образующемуся Солнцу. Если предположить, что процесс самогравитации уже начался, и он начался с формирования железно-каменного ядра (принято считать, что у Юпитера и других планет гигантов, именно такое ядро), и он в любом случае прерваться не может, то наша модель оказывается вполне правдоподобной.

Обсуждая модель образования Земли и всей Солнечной системы из одного материала, мы не касались проблемы, состоящей в том, как может образоваться твердая силикатная Земля из газообразного облака. Эта проблема рассмотрена в рамках разрабатываемой модели горячей Земли (Кузнецов, 1990, 1998). Согласно модели, во внутреннем ядре Земли находится то же самое вещество, из которого образовались Солнце и планеты, как большие, так и маленькие. Другие оболочки Земли состоят из этого же вещества в конденсированном (жидком и кристаллическом) состоянии, причем, именно в той же самой пропорции, что и на Солнце, за вычетом легких газов (водорода, кислорода, азота и др.).

Заметим, что наша модель образования Солнечной системы не учитывает эффектов вращения протосолнечной туманности и образовавшихся из неё Солнца и планет, сохранивших как вращение в плоскости эклиптики, так и приобретенных собственное вращение вокруг оси. Причина состоит в том, что до сих пор нет понимания, почему все гравитирующие тела, от спутника до Вселенной, - вращаются? Очевидно, что вращение, - это фундаментальное свойство природы, однако, ясного понимания этого феномена пока нет. Учет приливных сил в модели конечно возможен, но это только усложнит модель и не даст принципиальных отличий от рассматриваемой нами ключевой идеи образования Солнечной системы. Как показано в (Votyakov, et al., 2002), медленное вращение вещества не дает заметного вклада в процесс самогравитации.

Выше мы не останавливались на таком вопросе, который может возникнуть в ходе обсуждения модели образования Солнечной системы. Вопрос состоит в том, может ли поток вещества от точки бифуркации, - к Солнцу, взаимодействуя (соударяясь) с планетой, двигающейся по своей орбите, изменить эту орбиту. Легко показать, что этого случиться не может. Докажем это на простой оценке, которую проведем для Меркурия. Почему выбран именно Меркурий? С одной стороны, это самая маленькая планета, которую проще всего «сбить» с орбиты, с другой, на неё действует самый большой поток вещества. Если окажется, что отношение импульсов  $Mv/mV_m \gg 1$  (орбитальный импульс значительно больше импульса бокового «удара»), то утверждение можно считать доказанным. Здесь  $M$  – масса Меркурия ( $M \approx 3 \times 10^{26}$  г),  $v$  - орбитальная скорость ( $v \approx 50$  км/с),  $m$  - масса потока,  $V_m$  – скорость падения вещества на орбите Меркурия ( $V_m \approx 5$  км/с). На рис. 2-3 показано, что, полная масса потока пропорциональна площади треугольника: от точки 6 до линии 1 1', которая должна составлять примерно  $10^5 M_{\oplus}$ . (Как было показано выше, площадь всего треугольника равна  $M_{\odot}$ ). Выясним, какая же часть потока от  $10^5 M_{\oplus}$  может попасть на Меркурий. Для этого необходимо задаться толщиной протосолнечного диска  $H$ . Примем, что толщина  $H$  равна диаметру протосолнца на момент бифуркации  $H = 5$  млн. км. Тогда часть потока, попадавшего на Меркурий

равна отношению площади его поверхности ( $\pi r_M^2$ ) и площади сечения потока ( $2\pi R_1 \dot{H}$ ), где  $R_1$  – радиус орбиты Меркурия ( $R_1 \approx 60$  млн. км). Здесь  $r_M$  – радиус планеты Меркурий ( $r_M \approx 2.4$  тыс. км). Это составляет  $\approx 10^{-8}$  потока. Отношение импульсов  $Mv/mV_m \approx 10^7$ , значительно больше 1, что и требовалось доказать.

Несмотря на эту оценку, показывающую малый вклад потока в орбитальное движение планет земной группы, именно этот поток при взаимодействии его с волновым механизмом, приводит к «корректировке» орбит этих планет таким образом, что фрактальная размерность этой системы уменьшается, что свидетельствует о более высокой степени самоорганизации. По всей видимости, это взаимодействие основано не на упругом соударении частиц потока с планетой, а, скорее, на изменении параметров самого волнового процесса.

В заключение отметим, что наша модель решает все три проблемы, упомянутые в начале: 1. Юпитер, как и другие планеты-гиганты, – планета горячая. (Можно сделать предположение, что источником теплового потока Юпитера может быть, например, механизм рекомбинации ионизированного, в момент образования планеты, водорода). 2. Коричневые карлики, – естественные в природе образования, связующие звезды с газообразными планетами-гигантами. (Оценив внутреннюю температуру Коричневых карликов, можно предположить, что действующий в их недрах механизм состоит в синтезе водорода из протонов и нейтронов). 3. Оцененное время образования планет (для Земли примерно 10 000 лет) существенно меньше 1 млн. лет, что соответствует оценке Тропа (Throop, et al., 2001), и значительно меньше принятой оценки времени образования Земли равной 100 млн. лет.

### *Литература*

- Блэк Д.Ч. Миры иных звезд. В мире науки. 1991. № 3. С. 44-51.
- Боденхаймер П., Блейк Д.К. Численные расчеты протозвездного гидродинамического коллапса. В сб. Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. С. 321-360.
- Босс А.П. Коллапс и образование звезд. В сб. В мире науки. 1985. № 3. С. 4-10.
- Воронцов-Вельяминов Б.А. Лаплас. М.: Наука. 1985. 286 с.
- Зедьдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966. 686 с.
- Имхофф К.Л. Эволюция звезд типа Т-Тельца и аргументы в пользу образования планет. В сб. Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. С. 800-811.
- Каплан С.А., Пикельнер С.Б. Физика межзвездной среды. М.: Наука. 1979. 474 с.
- Клейтон Д. Межзвездные облака. В сб. Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. С.18-52.
- Козырев Н.А. Внутреннее устройство Юпитера. Астрономический журнал. 1977. Т. 54. С. 372-377.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1984. 92 с.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 216 с.
- Кузнецов В.В. Земля как термодинамическая система Геология и геофизика. 1998. Т. 39. С. 993-1013.
- Ларсон Р.Б. Расчеты коллапса и образование Солнечной системы. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С. 107-117.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.
- Мак-Крей У.Х. Происхождение Солнечной системы. Обзор концепций и теорий. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир, 1976, С. 12-38.
- Ньето М.М. Закон Тициуса-Бодде. М.: Мир. 1976. 96 с.
- Острайкер Дж.П. Гидродинамика коллапса: вращение и сжатие В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С. 221-233.
- Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. 568 с.
- Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. 870 с.

- Ривс Г. Представление моделей. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С. 51-86.
- Седов Л.М. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука. 1981. 386 с.
- Слюта Е.Н., Воропаев С.А. Наблюдаемый переход между малыми и планетными телами Солнечной системы: эффект критической массы. ДАН. 1998. Т. 358. № 4. С. 480-483.
- Спитцер Л. мл. Физические процессы в межзвездной среде. М.: Мир. 1981. 350 с.
- Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды, М.: Наука. 1971. 854 с.
- Тер-Хаар Д. Некоторые замечания о теориях происхождения Солнечной системы из первоначальной солнечной туманности. В сб. Происхождение Солнечной системы. М.: Мир. 1976. С.107-117.
- Хартман У.К. На пути к современной теории образования планет. В сб. Протозвезды и планеты. Ч. 1-2. М.: Мир. 1982. С. 71-88.
- Чандрасекар С. Введение в учение о строении звезд. М.: ИЛ. 1950. 256 с.
- Шмидт О.Ю. Четыре лекции о происхождении Земли. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1949. 70 с.
- Allard F. A very cool customer. *Nature*. 1995. V. 378. P. 441-442.
- Boss A.P. Formation of gas and ice giant planets. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 202. P. 513 – 523.
- Jeans J.H. Gravitational instability and the figure of the Earth. *Roy. Soc. London Proc. A*. 1916. V. 93. P. 413-417.
- Lin C.C., Yuan C., Shu F. H., On the spiral structure of disk Galaxies. III. Comparison with observations. *Astrophys. J.* 1969. V. 155. P. 721-746.
- Lissauer J. What is a Planet? *SCIENCE Online*. ([www.sciencemag.org/cgi/content/full](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full)).
- Nelson L.A. A bright future for faint stars. *Nature*. 1995. V. 377. P. 102-103.
- Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman. New York. 1983.
- McCaughrean M., Reid N., Tinney C., Kirkpatrick D., Hillenbrand L., Burgasser A., Gizis J., Hawley S. What is a Planet? *Science*. 2001. V. 291. P. 1487.
- Rebolo R., Zapareto Osorio M. R., Martin E.L. Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster. *Nature*. 1995. V. 377. P. 129-131.
- Roberts W.W. Large-scale shock formation in spiral galaxies and its implications on star formation. *Astrophys. J.* 1969. V. 158. P. 123 – 143.
- Savage D., Clavin W. Astronomers discover planet building is Big Mess. 2004. (<http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2004-17/release.shtml>).
- Throop H.B., Bally J., Esposito L.W., Mc Caughrean M.J., Evidence for dust grain growth in young circumstellar disks. *Science*. 2001. V. 292. P. 1686-1689.
- Votyakov E.V., Hidmi H.I., De Martino A., Gross D.H.E. Microcanonical mean-field thermodynamics of self-gravitation and rotating systems. *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 89. P. 031101-1.

### Глава III. МОДЕЛЬ ГОРЯЧЕЙ ЗЕМЛИ

Модель внутреннего устройства Земли может быть верной и убедительной лишь в том случае, если:

- четко и ясно сформулированы условия и механизм образования планеты;
- оценены начальные параметры вещества планеты (температура, плотность, размер, химический состав и т.п.);
- эволюция параметров планеты очевидна и следует из основных законов физики, которые, естественно, не нарушаются;
- на определенном этапе эволюции, Земля должна оказаться именно такой, какая она есть сейчас.

Выполнение этих очевидных условий должно позволить:

- прогнозировать поведение Земли в будущем;
- найти и объяснить общность и различия Земли с другими планетами Солнечной системы.

#### III. 1. Суть модели горячей Земли.

Согласно (Магницкий, 1965), гравитационная энергия Земли равна:

$$E = 3/5 GM^2/R = 2.25 \times 10^{39} \text{ эрг}, \quad (3.1)$$

здесь:  $G$  - гравитационная постоянная,  $M$  - масса, а  $R$  - радиус Земли. Энергию такой величины необходимо затратить на то, чтобы «расташить» всю массу Земли по пылинкам так далеко друг от друга, чтобы они не смогли собраться вместе. Естественно, что именно столько выделится энергии, и пойдет на нагрев её вещества, если будет происходить обратный процесс – сжатие вещества Земли (самогравитация). Если энергию  $E$  поделить на приемлемую величину теплоемкости вещества Земли ( $c_p = 0.3$  кал/г-град.) и её массу, то оказывается, что температура земного вещества может достичь очень большого значения, порядка 30 000 К. Как следует из книги Магницкого (1965), геофизики не знают, как можно воспользоваться этой оценкой. Температура в 30 000 К представляется им абсолютно нелепой (там же). Очевидно, что при такой температуре вся Земля должна быть, по меньшей мере, расплавленной, что противоречило бы ее внутреннему устройству. Действительно, толщина мантии Земли составляет почти 3 тысячи километров. Время существования Земли ( $t$ ) “всего” 4.5 млрд. лет ( $t = 1.5 \times 10^{17}$  с). За это время (если бы вся Земля была расплавленной) земное вещество может кристаллизоваться на глубину ( $d$ ) не превышающую 400 - 600 км. [ $d \approx (\zeta t)^{1/2}$ , где  $\zeta$  - температуропроводность земного вещества ( $\approx 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с)]. Этот довод практически “закрыл” все дальнейшие попытки разработки модели “горячей” Земли. Для геофизиков остался лишь один путь - развитие модели “холодной” Земли. В этом случае для “изготовления” Земли необходимо примерно  $10^8$  лет, именно для того, чтобы образующееся в этом процессе тепло успевало отводиться в космическое пространство радиационным способом, через излучение.

В этой книге мы принимаем “сценарий” образования горячей Земли, включающей быстрое сжатие её вещества за счет самогравитации. В этом случае температура вещества Земли окажется порядка нескольких десятков тысяч градусов. Согласно этому “сценарию”, температура вещества планеты (звезды, спутника) определяется только ее массой:

$$T \sim E/Mc_p \sim M/Rc_p \sim M^{2/3}/c_p. \quad (3.2)$$

Оцененная таким способом величина  $T$ , соответствует температуре вещества планеты в момент ее образования. Полагая, что в процессе эволюции планет и их спутников, они охлаждались, величина  $T$  приближается (оставаясь всегда больше) к температуре вещества ( $T_G$ ) внутреннего ядра планеты ( $T > T_G$ ).

Вещество, имеющее температуру  $T = 30\,000\text{K}$  ( $\approx 3$  эВ) будет находиться в газообразном состоянии, точнее, в состоянии слабоионизованного газа - плазмы. Земное вещество может нагреться до такой температуры при сжатии в момент образования



планеты за счет протекания диссипативного процесса самогравитации. Внутреннее (газокинетическое) давление вещества в процессе его сжатия, по мере увеличения его температуры, будет возрастать. Сжатие остановится в тот момент, когда газокинетическое давление станет равным давлению самогравитации (критерий Джинса). Воспользуемся этим критерием для оценки термодинамических параметров вещества Земли. Сделаем одно весьма существенное для нашей модели предположение. Будем считать, что в настоящее время земное вещество в "первородном" состоянии, близком к идеальному газу, находится во внутреннем ядре. Это очень важное предположение. Если это действительно так, то все остальное в нашей модели является физически непротиворечивым следствием этого предположения...

Воспользуемся им для оценки современных термодинамических параметров вещества внутреннего ядра. Приравняем скорость звука в идеальном газе:  $(gR_g T/m)^{1/2}$  к величине скорости Р-волн внутреннего G-ядра ( $v_p = 11.2$  км/с), получаем:  $T/m \approx 1$ , ( $T$  в  $10^4$  К). Здесь:  $g = c_p/c_v$  - показатель адиабаты,  $R_g$  - газовая постоянная,  $m$  - молекулярный (атомный) вес вещества.

Оценим величину  $T/m$  из равенства:  $nkT = rgR = 3.5 \cdot 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> (давление в центре Земли), где  $n = r_G/m$  - концентрация вещества,  $r_G$  - плотность вещества G-ядра,  $m$  - вес протона,  $k$  - постоянная Больцмана,  $r$  - средняя плотность Земли,  $g$  - сила тяжести,  $R$  - ее современный радиус, а получаемая величина  $T/m \approx 1/3$ . Эта оценка, на наш взгляд, более правдоподобна, чем первая. Принимая величину  $T = 30\ 000$  К, получаем  $m \approx 10$ . Заметим, что в этом случае величина молекулярного (атомного) веса вещества Земли показывает, что в ее составе значительное место принадлежит водороду. В качестве примера представим, что внутреннее ядро Земли состоит из водорода и железа. Молекулярный вес  $m$  "молекулы", составленной из атомов железа и водорода, будет равен примерно 10 при условии, если один атом железа будет "окружен" пятью атомами водорода и т.п.

Согласно нашей модели, температура  $T = 30\ 000$  К (или близкая к ней) присуща только веществу внутреннего ядра. Большая часть вещества Земли (внешнее ядро и мантия) за время ее эволюции уже остыла (релаксировала). Это один из главных постулатов нашей модели. Другой, не менее важный, говорит о том, что вещество, нагретое до такой температуры, будет находиться в газообразном состоянии и может быть сжато до плотности, большей, чем у металла. Отсюда следует, что начальный размер Земли, в момент ее создания, был меньше современного ( $R_0 < R$ ). Оценки начального радиуса Земли  $R_0$ , проведенные различными способами, не слишком надежны, хотя все они показывают, что  $R_0 < R$  современного. Величина  $R_0$ , по различным оценкам, колеблется в диапазоне 3 - 4 тыс. километров. Наиболее интересное решение нашей задачи возникает в том случае, если принять  $R_0$  равным 3.5 тыс. км. В пользу него, приведем такое, весьма интересное наблюдение. Радиус внешнего ядра Земли равен 3.5 тыс. км. Площадь поверхности внешнего ядра с удивительной точностью равна суммарной площади материков. А сами материки с удивительной точностью "совмещаются" друг с другом на шаре с радиусом, равным радиусу внешнего ядра (см. рис. 1-3, Глава I). Эти обстоятельства, по-видимому, можно истолковать в пользу того, что Земля имела первоначальный размер, равный размеру ее внешнего ядра, а материки занимали полностью всю её поверхность.

Поделив массу Земли на объем внешнего ядра, можно получить оценку начальной плотности вещества Земли ( $r_0$ ), которая могла достигать 35 г/см<sup>3</sup>. Начальная температура вещества  $T_0$  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:  $m < 10$ . 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.

### III. 2. Эволюция параметров Земли в контексте горячей модели.

К настоящему времени геологами собраны коллекции образцов, обработка которых показывает, что на Земле раньше было совсем не так как сейчас. Были другими состав и плотность атмосферы, другая температура поверхности, другие океаны, другая скорость вращения Земли, другое гравитационное и магнитное поля и т.д. Мы с Вами частично касались этого вопроса во Введении, когда цитировали академика А.Л.Яншина. На самом деле данных, подобных тем, которые приводит Яншин, значительно больше. Практически все они, в той или иной степени, находятся в противоречии с моделью холодной Земли. Ниже мы обратимся к известным фактам из истории эволюции Земли в контексте нашей модели.

*Радиус Земли.* После образования, горячая Земля охлаждалась. На первом этапе остыла и кристаллизовалась ее внешняя оболочка - прообраз земной материковой, гранитной коры. Вещество протоЗемли, находящееся после образования в газообразном (плазменном) состоянии, конденсировалось, образуя вещество внешнего ядра, и затем кристаллизовалось, - образуя мантию. Таким образом, в эволюции планеты непосредственное участие принимали два экзотермических фазовых перехода: конденсация и кристаллизация. На самом раннем этапе эволюции Земли скорость охлаждения её вещества определял процесс кристаллизации. Этот процесс контролировался кондуктивным теплопереносом – температуропроводностью:  $\zeta = l/rc_p$ , где  $r$  - плотность, а  $l$  - коэффициент теплопроводности. Для обычных веществ величина  $\zeta = 0.1 - 0.01$  (см<sup>2</sup>/с). Поначалу, 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 и в мантии возникла конвекция ( $l \geq l^*$ ) и “заработал” конвективный теплоперенос, более эффективный, чем кондуктивный. Известно, что конвекция в слое толщиной  $l$  между двумя плоскостями, поддерживаемыми при постоянном перепаде температуры  $\Delta T$ , возникает при числе Релея  $Ra > 1710$ :

$$Ra = (g b l^3 \Delta T) / (h\zeta). \quad (3.3)$$

Подстановка характерных для вещества мантии Земли величин ускорения силы тяжести  $g$ , коэффициента объемного расширения  $b$ , кинематической вязкости  $h$ , и коэффициента температуропроводности  $\zeta$ , для  $\Delta T = 10^4$  К, определяет величину  $l^* \approx 300$  км.

В работе (Chandrasekhar, 1961) показано, что для больших чисел Релея (именно этот случай соответствует конвекции в мантии) произведение чисел Рейнольдса:

$Re = (v_k l) / h$  и Прандтля  $Pr = h / \zeta$  пропорционально корню квадратному из числа Релея:

$$Re \sim Pr \sim Ra^{1/2}. \quad (3.4)$$

В свою очередь, число Релея (3.3)  $Ra \sim l^3$ . Подставляя, получаем зависимость между характерным размером  $l$ , скоростью конвекции в мантии  $v_k$  ( $v_k = l/t$ ) и характерным временем процесса  $t$ :  $v_k l \sim l^{3/2}$ , или:  $l^2/t \sim l^{3/2}$ . Заменяя  $l$  на  $\Delta R$ , 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. 3-1).

Таким образом, по нашей модели получается, что в течение примерно 3.5 - 4 млрд. лет толщина мантии увеличилась от нуля до (примерно) 300 км ( $l^*$ ), а за последние 0.5 - 1 млрд. лет - более чем на 2.5 тыс. км. Наша модель горячей Земли оказывается адекватной модели расширяющейся Земли, которую разрабатывали в свое время С. Кэри (Carey, 1976); Хильденберг (Hilgenberg, 1933); Оуэн (Owen, 1992) и др. Рисунок 3-1

демонстрирует зависимость земного радиуса от времени эволюции, согласно моделям этих авторов и, для сравнения, нашу модель, в которой  $\Delta R \sim t^2$ . Так как радиус Земли однозначно связан с силой тяжести и средней плотностью, на рисунке показано изменение этих параметров. Согласно модели, увеличение радиуса Земли происходит за счет роста толщины мантии, поэтому на рисунке показано как происходило увеличение массы мантии, а так как количество воды в океанах жестко связано с массой мантии, то этот график характеризует и скорость «наполнения» океанов. Здесь же, для сравнения, приведен ориентировочный ход увеличения воды в акватории Мирового океана по наблюдательным данным.

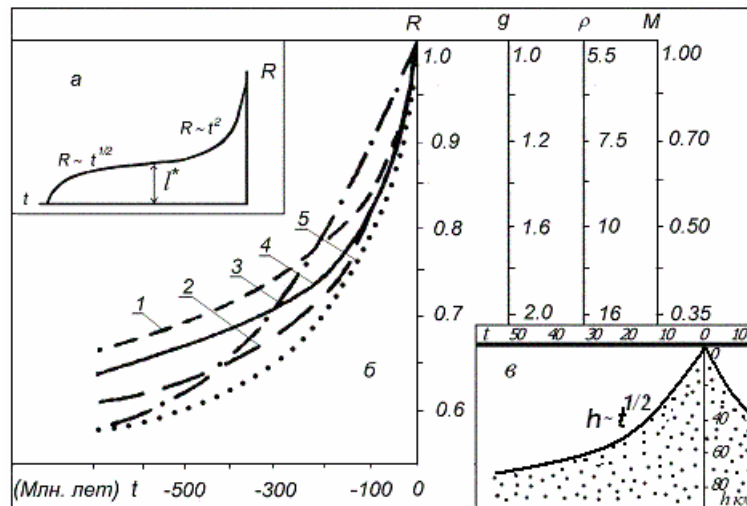


Рис. 3-1. Изменение радиуса Земли  $R$  от времени её эволюции (Кузнецов, 1990). (а) - в течение всего периода эволюции  $t$ , за последние 500 млн. лет: - (б). Здесь  $R(t)$ ,  $g(t)$ ,  $\rho(t)$ : 1- по данным Кэри, 2 – Хильденберга, 3 – Оуэна (Owen, 1984), 4 – нашей модели. Увеличение массы океанов  $M(t)$  – 5. Толщина литосферы  $h$  (км) от расстояния ( $t$  в млн. лет) до оси рифта - (в).

Сравним полученную зависимость  $\Delta R \sim t^2$  (или  $R \sim t^2$ , где  $R$  - радиус Земли) с хорошо известным в тектонике плит характером глубины астеносферы в зоне спрединга от расстояния от центра срединно-океанического хребта, оцененного в годах:  $h \sim t^{1/2}$ , ( $h$  – глубина астеносферы, а  $t$  – время, отсчитанное назад от современного). Эти функции являются однозначно обратными и симметричными относительно:  $\Delta R \sim t_R$ , или  $h \sim t_h$  (что одно и то же). Действительно,  $\Delta R = -h$ , а  $t_R = -t_h$ . Используя наши оценки, полученные для зависимости ( $\Delta R \sim t^2$ ), и подставив  $h$  в км, а  $t$  в млн. лет, получим ориентировочно:  $h \approx 100 \times t^{1/2}$ , для  $t < 500$  млн. лет. Таким образом, известная зависимость, показывающая изменение толщины астеносферной зоны от времени эволюции, является (в нашей модели) ни чем иным, как скоростью расширения Земли.

Расширение Земли определяется тем обстоятельством, что силы растяжения, возникающие при разуплотнении сжатого газообразного вещества, и переходе его в нормальное, конденсированное состояние, превалируют над силами гравитации – силами сжатия. В принципе, по модели, после окончания цикла расширения, наступает цикл сжатия, когда гравитация оказывается сильнее, чем расширение. Есть все основания говорить о том, что наша модель описывает расширяющуюся, пульсирующую Землю. Подобная гипотеза неоднократно высказывалась и обсуждалась известными геологами: В.А. Обручевым, М.А.Усовым, М.М. Тетяевым, Е.Е. Милановским и др. Естественно, геологами не обсуждалась физика подобной модели эволюции Земли.

*Температура, давление и плотность вещества в центре Земли.* Задача определения термодинамических параметров горячей Земли не допускает широкого разнообразия вариантов. Полагая, что масса Земли в процессе ее эволюции практически не меняется, температура определяется достаточно строго, а внутреннее давление является функцией радиуса Земли и температуры ее вещества, остальные параметры оцениваются более или менее однозначно. Согласно нашей модели, как отмечалось, начальный радиус Земли был примерно в два раза меньше современного. Следовательно, Земля расширялась, и ее объем в течение эволюции увеличился примерно в 8 раз. Начальная величина плотности вещества Земли составляла примерно  $35 \text{ г/см}^3$ , что в три раза больше современной величины плотности вещества внутреннего ядра  $r_G$ . Величина современного давления в центре Земли оценивается как  $p = rgR = 3.5 \cdot 10^{12} \text{ дин/см}^2$ . Давление в центре Земли в момент ее образования (по нашей модели)  $p_o = r_o g_o R_o$  должно было быть примерно в 10-15 раз выше, чем современное. Воспользуемся оценкой Ландау (Ландау, Лифшиц; 1964) для величины давления вещества, находящегося в сверхсжатом состоянии,  $p \sim r^{5/3}$  (примерно:  $p \sim r^2$ ). Отсюда следует, что величина плотности внутреннего ядра должна уменьшаться в течение эволюции Земли, по мере уменьшения давления, и достигнуть к настоящему времени общепринятых для величины плотности вещества внутреннего ядра значений. Так как начальный радиус Земли оказался примерно вдвое меньше современного, то гравитационная энергия только что образованной Земли должна быть примерно вдвое больше (а величина  $g_o \approx 3.5 g$ ), чем оцененная нами. (Вряд ли начальная температура вещества Земли  $T_o$  могла быть в два раза больше чем оцененная нами выше (30 000 К). Дело в том, что величина теплоемкости  $c_p$  возрастает с увеличением температуры, а  $T \sim 1/c_p$ . Этот факт приведет к некоторому снижению величины  $T_o$ ).

Тем не менее, если принять  $T_o \gg 2T$  и учесть зависимость  $r$  от  $p$  ( $p \sim r^2$ ), то можно оценить величину  $m_b$ . Так как  $T/m \sim p/r \sim (p)^{1/2}$ , то  $T_o/m_b \approx 1$ , а величина  $m_o \approx 5$ , что находится в согласии с нашей моделью: вещество Земли на начальном этапе эволюции было более “солнечным”: на один атом железа здесь необходимо уже 10 атомов водорода, а не 5, как сейчас. Можно выяснить такой вопрос: сколько водорода ( $M_H$ ) должна была “потерять” Земля за время своей эволюции для того, чтобы величина  $m$  уменьшилась вдвое. Будем полагать, что  $m^*$  современной Земли:  $m^* \approx 50$  (не путать с  $m$  внутреннего ядра). Массу Земли можно представить:  $M = Nm m^*$ , где  $N$  - полное число атомов (молекул). Массу потерянного Землей водорода, аналогично:  $M_H = 10N m m_H$ , где  $m_H = 1$  - атомный вес водорода, а 10 - число атомов водорода на один атом железа. Отсюда:  $M_H/M \approx 1/5$ , или, иначе, потери водорода составляют не более 20% от начальной массы Земли  $M_o$ , что, при наших точностях оценок, не должно особенно сказаться. (Эта оценка будет полезна нам при рассмотрении физики образования углеводородов в Главе V).

Градиенты температуры и давления  $dT/dR$  и  $dp/dR$ , согласно нашей модели, были, в прошлом, заметно выше (первый примерно в 3-4 раза выше, а второй - в 15-20 раз). Следовательно, тепловой поток  $Q$  ( $Q \sim dT/dR$ ) на начальном этапе эволюции Земли тоже был выше современного. Кстати, по нашей модели, можно оценить величину теплового потока. Воспользуемся для этого известной термодинамической формулой, связывающей энергию и энтропию системы:  $dE = T dS - p dV$ . Положим, что температура  $T$  изменяется в области фазового перехода на 10 000 К, а изменение энтропии  $dS$  порядка 1 Дж/г град. Обычно, величина  $T dS \gg U$ , где  $U$  - теплота фазового перехода - конденсации,  $U = (10-15) \text{ кДж/г}$ . Величина теплового потока в этом случае:

$$Q = T \times dS \mathcal{M}/t_o, \quad (3.5)$$

где  $t_o$  - время эволюции Земли ( $t_o = 4.5 \cdot 10^9$  лет), оказывается равной  $Q = 10^{29} \text{ эрг/год}$ , что примерно на порядок больше современного значения величины  $Q$ . Учитывая то, что раньше тепловой поток был больше современного, эта оценка не должна вызывать особых сомнений.

К этому следует добавить, что тепловой поток на Луне, где, по нашей модели, конденсация первичного вещества уже закончилась, а кристаллизация ещё идет, примерно в 30 меньше, чем тепловой поток Земли. Теплота фазового перехода конденсации примерно в 30 раз больше, чем теплота кристаллизации, что подтверждает нашу модель.

Обратим внимание на такую деталь... По началу, мы предположили, что вещество внутреннего ядра, возможно, сохранилось до наших дней в том виде, в каком оно было при образовании Земли. В результате развития модели, мы приходим к заключению, что это предположение не совсем точно... Оказывается, что в течение эволюции Земли состояние термодинамического равновесия, вокруг которого могут совершаться (по модели) циклические колебания, постоянно смещается в сторону уменьшения температуры и давления. Этот факт говорит в пользу циклического характера эволюции Земли, т.к. линейная термодинамика необратимых процессов показывает, что колебания значений термодинамических параметров не могут происходить относительно равновесного состояния. Последнее означает, что только в такой (или подобной) модели могут происходить циклы, привлекающие пристальное внимание геологов.

*Эволюция  $pT$ -параметров на поверхности Земли.* Принято считать, что экзогенные процессы, происходящие на Земле, обусловлены главным образом: энергией солнечной радиации, силой тяжести, деятельностью ветра, воды и ледников. Заметную роль играет и внутренняя, эндогенная энергия Земли, из-за влияния которой происходят землетрясения, извергаются вулканы, поднимается и опускается уровень океанов и т.п.

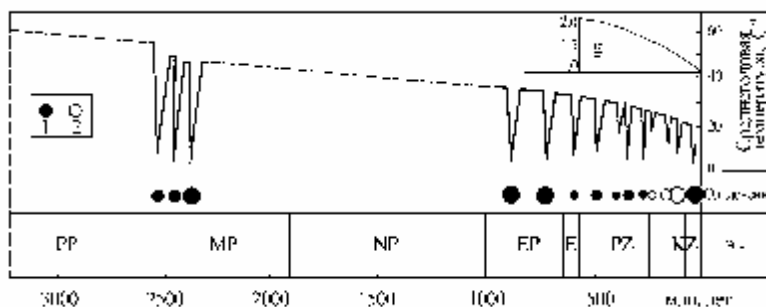


Рис. 3-2. Температура поверхности Земли. В правом верхнем углу зависимость:  $g(t)$ .

Хорошо известно, что Земля “пережила” несколько оледенений. Следуя В.Н.Саксу (1947), “... нужно отказаться от мысли, что оледенения были чем-то случайным в истории Земли. Особенно обращает на себя внимание то обстоятельство, что крупные оледенения всякий раз следовали за интенсивным проявлением складкообразовательных процессов. Так, четвертичные ледники появились после альпийской складчатости, верхнепалеозойские - после герцинской, протерозойские - после докембрийской. Напротив, эпохи обширных трансгрессий моря, предшествовавшие основным фазам складчатости, характеризовались относительным выравниванием климатов на земной поверхности ...” (с.29-30). Это один из примеров связи  $pT$  (давление-температура) параметров на поверхности Земли с внутриземными орогенными процессами. Надо сказать, что в наше время эти взгляды не разделяются большинством специалистов. Так, например, Чумаков (1995) полагает, что климатические изменения имеют ритмический характер, а «главные различия между ледниковыми и безледниковыми интервалами геологической истории заключались в увеличении амплитуд климатических колебаний. Это было связано, по-видимому, с совпадением холодных фаз сверхдлинных, длинных и коротких климатических колебаний, приводивших к возникновению криосферы и увеличению альбедо во время климатических минимумов» (с. 37). Бытующее среди многих геологов мнение, относительно того, что эволюция Земли состоит из сочетания суммы разнофазных колебательных процессов, не согласуется с обсуждаемой на

страницах этой книги моделью Земли, как открытой, самоорганизующейся диссипативной системы. Изменения климата и их связь с геомагнитным полем будет рассмотрена в главе IX.

Наиболее важной характеристикой климатического процесса - температура и ход её изменения в развитие этого процесса. Поэтому, несомненный интерес представляет зависимость температуры поверхности Земли от времени её эволюции. Несмотря на то, что многие геологи, так же как Дж. Ферхуген и др. (1974) считают, что "... мы еще очень далеки от действительного понимания термальной истории Земли" (с. 739), такая зависимость для Земли известна. Она построена многими авторами по изотопным соотношениям (кислорода  $O^{16}/O^{18}$  и водорода/дейтерия) и восстановленному палеотемпературному градиенту. Среди авторов (см. например, Шульдинер, 1985) имеются небольшие расхождения в величинах температур для одних и тех же периодов эволюции Земли, но общий характер остается примерно одинаковым (см. рис. 3-2). По видимому, есть основания считать, что температура на поверхности Земли примерно 3.8 млрд. лет назад приближалась к  $100^{\circ}C$  (Океаны кипели! Если, конечно, не учитывать тот факт, что и плотность атмосферы была выше современной). Можно восстановить (Кузнецов, 1990) эту зависимость для ранней Земли, ко времени 4.5 млрд. лет назад. Температура окажется порядка  $300^{\circ}C$  (и более). Это, однако, не самая высокая оценка температуры поверхности ранней Земли, например, согласно Р. Геррелсу и Ф. Маккензи (там же, с. 79): "... температура на поверхности ранней Земли достигала  $600^{\circ}C$ , а давление превышало 360 атмосфер, из которых на долю воды приходилось 300, углекислоты - 45, соляной кислоты 10 атм". Различные авторы попутно неоднократно высказывали идею, согласно которой древняя атмосфера Земли соответствует атмосфере современной Венеры.

Таблица 3.1

Период	Возраст, млрд. лет	Темп. поверх. $^{\circ}C$	Атмосферное давление	Состав атмосферы
Катархей	3.75 - 3.5	100	20	$H_2, CO_2, H_2O$
Палеопротозой	3.5 - 2.6	70	10 - 20	$H_2, CO_2, H_2O$
Мезопротозой	2.6 - 1.9	60	-	$H_2O, 1\% O_2$
Неопротозой	1.9 - 1.0	50	-	Увеличение $O_2$
Эпипротозой	1.0 - 0.65	40	-	Увеличение $O_2$
Эокембрий	0.65 - 0.57	35	-	Увеличение $O_2$
Настоящее время	0	15	1	21% $O_2$

Наиболее полно данные по  $pT$ -условиям на поверхности ранней Земли (в докембрии) представлены в монографии Салопа (1982). Извлеченные нами из этой книги данные представлены в таблице 3.1. Из таблицы 3.1, как и из рисунка 3-2, следует, что температура поверхности Земли и её атмосферное давление плавно понижались в течение всего периода эволюции. Менялся химический состав атмосферы: исчез водород, уменьшилась концентрация воды, выросла концентрация кислорода и т.п.

Можно ли найти простую логичную модель, описывающую эволюцию условий на поверхности Земли? Верно ли предположение о том, что  $pT$ -условия ранней Земли адекватны современной Венере? Попробуем ответить на эти вопросы в контексте нашей модели.

В момент образования вещество Земли имело солнечный состав: в основном, это были водород, кислород, кремний, железо и т.д. Оно, как следует из нашей модели, было нагрето до очень высокой температуры. Зададим температуру поверхности Земли (собственно твердой "поверхности", как таковой, - ещё не было) равной  $10^3 K$ . Эта величина оценивается следующим образом. Температура плазмы вещества Земли в момент образования достигала нескольких электронвольт ( $1 эВ \approx 10^4 K$ ). Радиационное (за счет излучения) охлаждение должно было сравнительно быстро "сбросить" температуру окружающего плазму т.н. обменного слоя, примерно на порядок. Рассмотрим, как

происходит охлаждение такого тела за счет излучения. Будем придерживаться канвы рассуждений, изложенной в двух монографиях (Бай Ши-и, 1968; Зельдович и Райзер, 1966).

Потери энергии на излучение  $K$  равны интегралу по объему от потери энергии  $q$  элементарного объема в единицу времени. Так как  $q = \text{div } S_o$ , то можно записать, используя выражение из книги (Зельдович, Райзер, 1966; с. 143):

$$K = \int q dV = \int S_o d\Sigma, \quad (3.6)$$

где  $dV$ - элемент объема тела,  $d\Sigma$ - элемент его поверхности,  $S_o$ - нормальная составляющая потока излучения на поверхности тела:  $S_o = s T^4$ ,  $T$  - температура поверхности тела,  $s$  - постоянная Стефана-Больцмана.

Горячие газы и пары нелетучих веществ, окружающие только что сформировавшуюся Землю можно представить как “оптически толстое тело”, размеры которого  $x$  гораздо больше длины “пробега” охлаждающего излучения  $l$ . Величина  $l$  представляет собой характерное расстояние, которое проходит квант излучения без столкновений и рассеяния. Она обратно пропорциональна коэффициенту поглощения излучения  $\chi$ :  $l \sim 1/\chi$ . С учетом сказанного, поток излучения  $S^* \gg (l/x) \sim sT^4$  для “оптически толстого тела” (где:  $l/x \ll 1$ ) существенно меньше  $S_o$ .

Известно, что величина  $l$  уменьшается с увеличением температуры. Для воздуха, в приближении Росселанда (Бай Ши-и, 1968, с. 115):

$$1/l = 4.86 \cdot 10^{-7} p^{1.31} \times \exp(4.56 \cdot 10^4 T). \quad (3.7)$$

Для не слишком высоких температур ( $T \approx 10^3$  К), экспоненциальный множитель примерно равен единице, поэтому формулу можно упростить:

$$1/l \approx 5 \cdot 10^{-7} p^{1.3}, \quad (3.8)$$

где  $l$  в см, а  $p$  в атм. Для современной атмосферы Земли величина  $l$  порядка  $2 \cdot 10^6$  см, величина  $x$  примерно того же порядка, так что  $l/x \approx 1$  и  $S_o = S^*$ , однако, это было совсем не так на более ранних этапах эволюции Земли.

Рассмотрим характер радиационного охлаждения поверхности Земли в течение времени её эволюции. Обозначим начальную температуру поверхности в момент времени  $t_o$  через  $T_o$ . Тепловая энергия Земли  $E$  может быть записана так:

$$E = c_V M T_o,$$

где  $c_V$  - теплоемкость вещества охлаждаемого слоя Земли,  $M$  её масса. Тепловая энергия Земли значительно выше, но так как за счет конечного времени теплопроводности, в охлаждении принимают участие лишь поверхностный слой, подобная оценка правомерна.

Порция энергии  $\Delta E$ , “уносимой” за счет радиационного охлаждения, определим в соответствии с формулой для  $S^*$ :

$$\Delta E \gg (l/x) \sim s T^4 s t, \quad (3.9)$$

где  $s$  - поверхность Земли, а  $t$  - интервал времени. В наших оценках принимаем:  $t = 0.5 \cdot 10^9$  лет. По прошествии  $t$ -лет, температура  $T_o$  уменьшится и станет равной  $T_1$ , а тепловая энергия Земли станет равной:

$$E_1 = c_V M T_1 = c_V M T_o - (l/x) \sim s T_o^4 s t, \quad (3.10)$$

или:

$$T_1 = T_o [1 - ((l/x) \sim s T_o^3 s t) / c_V M]. \quad (3.11)$$

Таким образом, получаем формулу вида:

$$T_1 = T_o (1 - a T_o^3), \quad (3.12)$$

в которой, как мы выяснили, содержится информация о температуре и плотности атмосферы. Очевидно, что для последующего (второго) интервала времени:

$$T_2 = T_1 (1 - a T_1^3) \text{ и т.д.} \quad (3.13)$$

Величина  $a$  ( $a \sim [T_1 - T_2] / T_1^4$ ) зависит от температуры и текущего значения  $l$ , т.к. все остальные величины в формуле  $a$  не меняются (при условии, что остается постоянной величина поверхности Земли -  $s$ ).

Оценим, насколько полученная нами зависимость правдоподобна и соответствует данным по ходу температуры на ранних этапах эволюции Земли, приведенным в таблице. Для этого построим график:  $lgT - lgt$  (рисунок 3-3). Рисунок показывает, что в течение 3 млрд. лет (от 0.5 до 3.5) характер охлаждения поверхности Земли не менялся. По-видимому, он был другим в течение первого млрд. лет эволюции Земли, но для его изучения наших данных явно недостаточно. С течением времени, величина  $a$  (в рассматриваемом нами диапазоне от 0.5 до 3.5 млрд. лет) незначительно увеличивалась и составляла величину  $a = (3 - 5) 10^{-10} K^{-3}$ . (Наши более ранние оценки (Кузнецов, 1990), соответствовали величине  $a = 10^{-9} K^{-3}$ ). Величина  $l$  оказывалась порядка 1 м, что на четыре порядка меньше её современного значения.

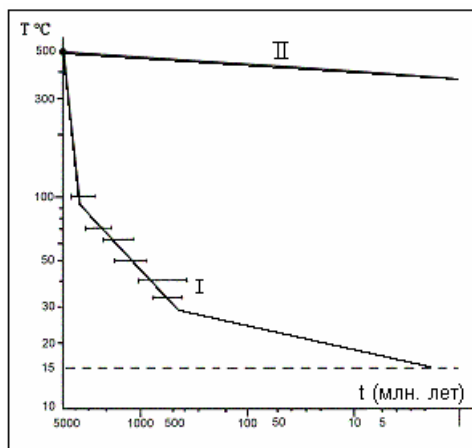


Рис. 3-3. Температура Земли (I) и Венеры (II) в течение времени эволюции.

Продолжим прямую  $lgT - lgt$  в область более низких температур, тогда она пересечет изотерму  $15^{\circ} C$  в точке, соответствующей примерно 50 млн. лет назад. Температура  $15^{\circ} C$ , это примерно среднегодовая современная температура поверхности Земли, определяемая величиной инсоляции. Если бы это было действительно так, то вплоть до этого периода времени (50 млн. лет назад) температура поверхности Земли зависела бы только от внутренней, эндогенной причины. По всей видимости, учитывая инерционный характер тепловых процессов, в такой системе не должно происходить оледенений.

Оледенения на Земле были, это общепризнанный факт. Поэтому, такое продолжение температуры в область времени, меньше чем 500 млн. лет назад, неправомечно. По-видимому, примерно 400-500 млн. лет на Земле произошло изменение режима её эволюции. По нашей модели, - начался период интенсивного расширения. Этот факт мог бы объяснить резкое увеличение  $a$ , например, за счет возрастания площади поверхности Земли и т.п.

Здесь уместно отвлечься и сказать несколько слов о причине оледенений, и их связи с внутренними, эндогенными процессами, о которых писал Сакс. Период (этап) расширения Земли (согласно нашей модели) связан с резкой интенсификацией её вулканической и горообразовательной деятельности. В такой период времени, в атмосферу Земли выбрасывается огромное количество пепла, который, надолго оставаясь в атмосфере, экранирует от Земли солнечное тепло. Если при этом температура поверхности Земли определялась солнечным теплом (как сейчас), а не внутриземным тепловым потоком (который в настоящее время намного меньше, чем поток тепла от Солнца), то её охлаждение поверхности в периоды экранировки и оледенения очевидны. Если в истории Земли происходили оледенения в рассматриваемый нами период (от 0.5 до 3.5 млрд. лет назад), то наша модель охлаждения была бы верна при одном условии:



уровень инсоляции в те далекие времена был значительно выше современного, или иначе, Солнце было значительно “горячее”, чем сейчас.

Вернемся к нашим оценкам. Полученное нами значение параметра  $a$  позволяет, в приближении Росселанда, оценить температуру поверхности и величину атмосферного давления. Эти величины (Кузнецов, 1990) оказались равными: температура  $T \approx 800$  К, а давление  $p \approx 10^3$  атм. Заметим, что эти оценки носят грубый, ориентировочный характер, однако, тем не менее, они (по смыслу) совпадают с данными, полученными геологами для  $pT$ -условий ранней Земли.

Как ответить на вопрос: соответствует ли современная “обстановка” на Венере обстановке на поверхности молодой Земли? Предположим, что Венера была изначально нагрета сильнее, чем Земля. Допустим, что относительный перегрев составлял, например,  $100^\circ$  С. Допустим так же, что толщина атмосферы Венеры изначально была больше земной примерно в два раза, а начальное давление, в три раза выше. Всё это может привести к тому, что величина коэффициента  $a$  атмосферы Венеры окажется меньше чем у Земли примерно на порядок. Для оценок, примем для начальной атмосферы Венеры:  $a = 3 \cdot 10^{-11}$  К<sup>-3</sup>. При этом характер изменения температуры поверхности меняется существенным образом (см. рис. 3-3). Вполне возможно, что незначительные изменения начальных условий на поверхности Венеры, относительно условий на Земле, привели к тому, что Венера остывала (и продолжает остывать) более медленно, чем Земля.

*Уровень океанов и цикличность эволюции.* Как изменялся “лик” нашей планеты в течение 4.5 млрд. лет её эволюции? Иначе, всегда ли Земля выглядела так, как сейчас? На эти, казалось бы, очевидные вопросы, науки о Земле не дают четкого, однозначного ответа. Сегодня принято считать, что “на Земле раньше было так же, как сейчас” (принцип актуализма). Различия состояли лишь в том, что материки, то объединялись в единый, громадный материк, то разъединялись, “расползаясь” по своим местам, и затем объединялись вновь. В зонах спрединга “производилась лента конвейера”, с помощью которой материки “плавали как корабли по океану”, а в зонах субдукции, эта лента затягивалась в мантию, чтобы вновь выйти на поверхность в зонах спрединга. Известно, что материки, это древние, как правило, гранитные образования. Это известно давно. Однако еще в первой половине нашего века было принято считать, что дно океанов столь же древнее образование. Сенсацией нашего века в науках о Земле, было открытие факта наличия на дне всех океанов очень молодых базальтовых пород, срединно-океанических хребтов (зон спрединга) и, собственно, движения, дрейфа материков. Это открытие “родило” т.н. тектонику плит, которая сразу и безоговорочно заняла главенствующие позиции в геологии. Основным, бесспорным достижением (я бы назвал это даже открытием) плитной тектоники считается то, что Земля в настоящее время динамично развивается. Другое дело, спорить о причинах и следствиях геодинамики, о физике процессов дрейфа и, собственно, о физике Земли. Здесь же споров практически не было: факт наличия динамики необходимо было объяснить в рамках принятой модели холодной Земли.

Обратимся к фактам, объяснение которых породило плитную тектонику. Как мы уже отмечали, все началось с изучения дна океанов. (Заметим, что океаны составляют 2/3 поверхности Земли и в значительной степени определяют “лик” нашей планеты). Факты и гипотезы об океанах наиболее обстоятельно и убедительно изложены в книге Е.М. Рудича (1984), который показывает, что объем мирового океана значительно увеличился в течение последних 160 млн. лет (рис. 3-4). Эти данные получены на основании анализа результатов глубоководного бурения (более 500 скважин пробуренных при выполнении почти 70 рейсов судна “Гломар Челленджер”) акватории Мирового океана; исследования разрезов, вскрытых океаническим бурением, и анализа глубины и условий накопления океанических осадков.

Изучение акватории Мирового океана показало, что общие черты имеются у всех океанов Земли и, тем не менее, есть различия между ними. Многие геологи отмечают различия между океанами тихоокеанического типа и атлантического. К общим особенностям можно отнести: одинаковый возраст (160 млн. лет), наличие зон полосовых магнитных аномалий и зон т.н. спокойного поля. Основное различие между океанами состоит в том, что атлантический тип (который присутствует и на Тихом океане) связан с расширением и разрастанием океанического дна через срединно-океанический хребт (СОХ). В этом случае полосовые магнитные аномалии параллельны друг другу, а разрыв океанической коры в районе СОХ произошел тогда, когда кора не могла растягиваться, как это имело место в Тихом океане, а была в достаточной степени прочна и консолидирована (Кузнецов, 1990). Растяжение океанической коры в тихоокеаническом варианте сопровождается совершенно другой структурой полосовых магнитных аномалий. На Луне, как и на Земле, можно выделить базальтовые «моря» атлантического и тихоокеанического типов (Макаренко, 1983). Автор, анализируя геодинамические структуры Земли и Луны, приходит к важным для нашей модели выводам. Во-первых, развитие Земли и Луны происходит под действием одних и тех же глубинных, эндогенных сил, и, во-вторых, Луна, есть не что иное, как упрощенная модель Земли.

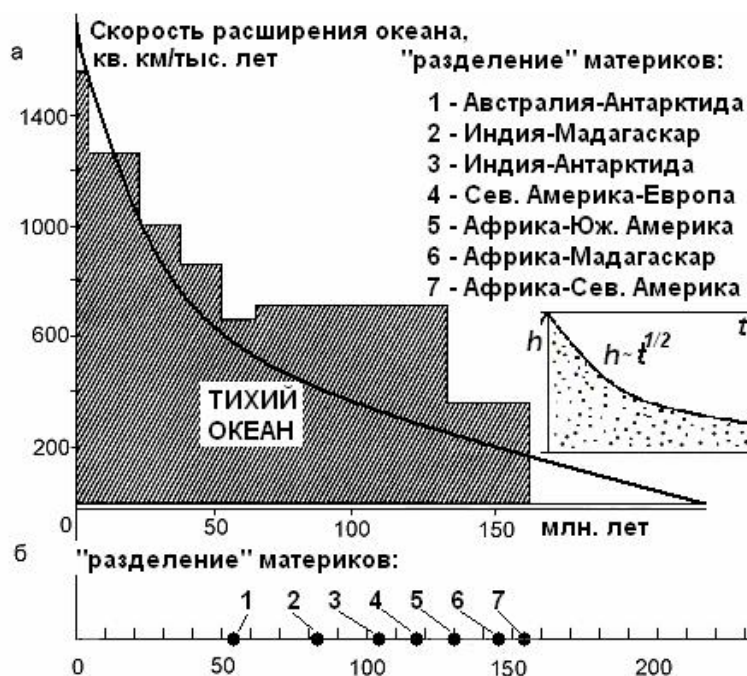


Рис. 3-4. Скорость расширения океанов (на примере Тихого океана) - а. Время разделения материков - б. На вставке – зависимость глубины астеносферы от времени образования океанического дна в районе СОХ.

Расчеты, приведенные в книге Рудича, показывают, что за последние 160 млн. лет объем впадины Мирового океана увеличился весьма значительно: по максимальной оценке, - на 580 млн. км<sup>3</sup>. При средней глубине современных океанов порядка 4-х км, это соответствует примерно 1/3 площади поверхности современной Земли. Радиус Земли увеличился, за последние 160 млн. лет, от  $\approx 0.77R$ , до его современного значения. Резкое увеличение впадины океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Он обращает внимание на то, что "... с позиций мобилистских концепций невозможно объяснить крупное приращение объема Мирового океана. ... мобилистские гипотезы

исключают возможность заметного изменения объема Мирового океана в течение последних 160 млн. лет” (Рудич, 1984, с.232).

Совсем не так “воспринимает” этот факт наша модель, согласно которой большая часть мантии была образована на Земле именно в течение этих 160 млн. лет (см. рис. 3-1). Если учесть, что в базальтах экспериментально обнаружено наличие воды в количестве  $\approx 0.1\%$ , а так же учесть, что масса воды Мирового океана так же составляет примерно  $0.1\%$  от массы мантии, то этот факт может служить еще одним подтверждением правомерности нашей модели горячей Земли.

Можно ли доверять таким данным, которые показывают резкое увеличение объема океанов, начавшееся 160 млн. лет назад? Выяснению этого вопроса посвящена статья Стейнера (Steiner, 1977), в которой автор приводит данные по скорости увеличения площади поверхности океанов: Тихого, Атлантического и Индийского. Данные получены на основании изучения полосовых магнитных аномалий. Площадь Тихого океана начала резко увеличиваться 165 млн. лет назад (см. рис. 3-4-а), одновременно, но с меньшей интенсивностью, стала возрастать площадь северной части Атлантического океана. Чуть позже, 135 млн. лет назад в процесс роста океанов “включился” Индийский океан и южная часть Атлантики. Суммарная скорость роста площади трех океанов составляет, по верхней оценке Стейнера, примерно  $3000 \text{ км}^2$  за тысячу лет, в течение 165 млн. лет их развития. Если подсчитать площадь образовавшихся океанов, то окажется (по верхней оценке), что за это время их площадь примерно равна площади поверхности Земли ( $5 \times 10^8 \text{ км}^2$ ). Учитывая неточности и то, что мы использовали верхнюю оценку, эту величину можно уменьшить вдвое, но все равно оказывается, что практически все океаны Земли образовались в течение последних 160 млн. лет. Стейнер не приводит таких очевидных оценок, он допускает, что радиус Земли увеличился за это время, но ограничивает это увеличение примерно  $12\%$ . Оставшаяся часть площади увеличившихся океанов должна быть, по мнению Стейнера, “поглощена” субдукцией, интенсивность которой, как следует, тоже должна возрастать по мере роста площади океанов.

В течение последних 135-165 млн. лет скорость спрединга, по Стейнеру, постоянно возрастала вплоть до наших дней. За последние 5 млн. лет средняя скорость спрединга для Тихого океана составляла  $9.6 \text{ см/год}$ , для Индийского океана -  $7.6 \text{ см/год}$  и для Атлантического -  $4.3 \text{ см/год}$ .

Современные океаны возникали, расширялись и “раздвигали” материка, которые, судя по всему, 160 млн. лет тому назад были значительно ближе друг к другу. Рисунок 3-4-б (Courtilot, Besse, 1987) демонстрирует это, показывая, что раньше других (160 млн. лет) Африка отделилась от Северной Америки, затем (150 млн. лет) - от Африки отделился Мадагаскар. Позже (135 млн. лет) Африка разделилась с Южной Америкой и т.д. Разрывы проматерика на современные его части, и их раздвижение объясняется в рамках модели холодной Земли и тектоники плит наличием мантийной конвекции. Обсуждаемый нами парадокс, связанный с быстрым увеличением объемов воды Мирового океана, вообще не рассматривается, т.к. не может быть объяснен этими моделями. Однако никакая мантийная конвекция не способна найти объяснение раздвижению материков на сфере с современным радиусом. Об этом ещё тридцать лет тому назад писал Р. Мезервей (Meservey, 1969). Он обратил внимание на расположение материков вдоль “берега” Тихого океана. Южная Америка, Северная Америка, Азия, Австралия и Антарктида никогда не находились на расстояниях, больших, чем современные (см. рис. 7-4). Это верно, по крайней мере, в течение последних 160 млн. лет. Иначе, периметр Тихого океана в течение этого промежутка времени никогда не был больше современного. Об этом свидетельствует и рис. 3-4-б, где показано, что Австралия и Антарктида “расстались” всего 50 млн. лет назад, Южная Америка - с Антарктидой “совсем недавно”, а Южная и Северная Америки и Азия, - так и “не расставались”. Если сохранять условие постоянства (или очень небольшого увеличения) периметра Тихого океана, то каким же образом, спрашивает Мезервей, можно соединить Африку с Южной Америкой, которые

разъединились друг с другом примерно 135 млн. лет назад? Ответа нет на этот, надо сказать, очень простой вопрос. Его нет, и не может быть, - в рамках плитной тектоники в том упрощенном виде, как её преподают в школах и университетах.

Надо сказать, что, несмотря на, казалось бы, убедительные факты, далеко не все геологи разделяют точку зрения, согласно которой океаны в основном сформировались на Земле лишь в “последние” 160 млн. лет. Тем не менее, никто из них не отрицает факта бурного роста океанической коры и увеличение объема воды Мирового океана именно в этот период эволюции Земли. Здесь многих привлекает период, о котором мы уже говорили, продолжавшийся с 120 млн. назад до 80 млн. лет. В течение этого периода не было инверсий, это так называемый период спокойного магнитного поля, или, его называют ещё, - меловой суперхрон. Принято считать, что в этот период Земля изменила характер эволюции и вместо спрединга океанической коры, наращиваемой посредством “работы” СОХ, она увеличивала объем путем генерации плюмов (Larson, 1991; Fuller, Weeks, 1992). Авторы этих и большого количества подобных публикаций, сопоставляют период спокойного магнитного поля с периодом интенсификации образования плюмов. Некоторые авторы (Larson, 1991), показывают в своих работах, что характер эволюции Земли в эти периоды (суперхроны - суперплюмы) резко отличался как от периодов предыдущих, так и последующих. В частности считается, что именно в эти периоды на Земле были образованы основные запасы нефти и других углеводородных полезных ископаемых. Разработка модели горячей Земли из проблемы фундаментальной может перерасти в проблему прикладную, если удастся понять, что реально происходило на Земле в эти периоды её эволюции. Надо заметить, что меловой суперхрон, - не единственный в истории магнитного поля Земли период т.н. “спокойного поля”. Известен юрский суперхрон и другие, более ранние периоды. (Обратим внимание на то, что отмечаемые нами здесь корреляции не находят объяснения в рамках модели холодной Земли).

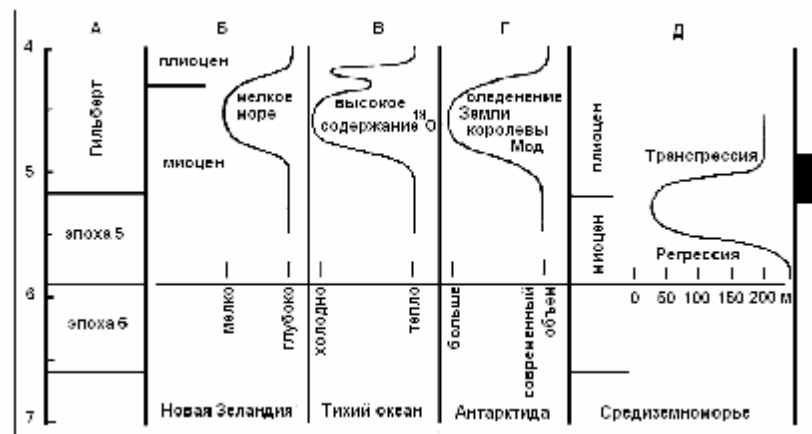


Рис. 3-5. Событие на границе миоцена и плиоцена (Мёрнер, 1986).

Не менее удивительны и другие синхронные проявления активности Мирового океана, атмосферы и климата: эти корреляции известны геологам как трансгрессии и регрессии. Например, Н.А. Мёрнер (1986) исследовал несколько катастрофических событий, одно из которых произошло на Земле на рубеже эоцена и олигоцена (рис. 3-5), когда наблюдалось крупное похолодание, падение уровня моря и уменьшение разнообразия форм фауны. Ряд подобных катастрофических событий случились на Земле сравнительно “недавно”, в период времени, называемый палеомагнитологами эпохой Брюнеса (см. ниже, в VI и IX главах книги). Выделяются несколько событий, причем последнее из них - Гетеборг (Палеомагнитология, 1982; Мёрнер, 1986). Это событие происходило от 20 до 12 тыс. лет тому назад. Событие Гетеборг выделено в истории геомагнитного поля как экскурс. Это событие, как и ряд подобных (рис. 3-6), предшествующих, характеризуется рядом признаков:

- аномально высокое изменение уровня моря на 200 - 240 м, с последующим его подъемом;
- понижение температуры и наступление ледников в Северной Америке и севере Европы и последующее резкое их таяние;
- резкое увеличение вулканической деятельности и последующее её прекращение.

Заметим, что событие Гетеборг - единственное, которое произошло на памяти цивилизованного человека (см. главу IX), так как все предыдущие “пришлись” на малоцивилизованное человечество и не остались в его памяти. Мёрнер считает, что событие Блейк, например, характерно тем, что сведения об изменении уровня моря противоречивы, а именно - 70-метровая регрессия на Новой Гвинее и 50-метровая трансгрессия на Гавайях; четких данных об оледенениях нет, хотя изменения параметров Миланковича зафиксированы и т.п. Наиболее полно в этом плане исследовано событие, которое имело место при смене эпохи 5 на эпоху Гильберт (см. рис. 3-5). При этом полярность геомагнитного поля, как и в предыдущих случаях, изменялась от современной (N) - к противоположной (R). Это событие сопровождалось:

- сменой миоцена на плиоцен;
- регрессией и следующей за ней трансгрессией на Средиземноморье;
- оледенением Антарктиды;
- регрессией и трансгрессией в Новой Зеландии.

Мёрнер связывает возможную причину наблюдаемых событий с процессами, происходящими в глубоких горизонтах Земли, возможно, на границе ядро-мантия. Такие события, по мнению Мёрнера, приводят к изменению формы геоида, что, в конечном счете, вызывает изменение уровня Мирового океана, регрессии и трансгрессии.

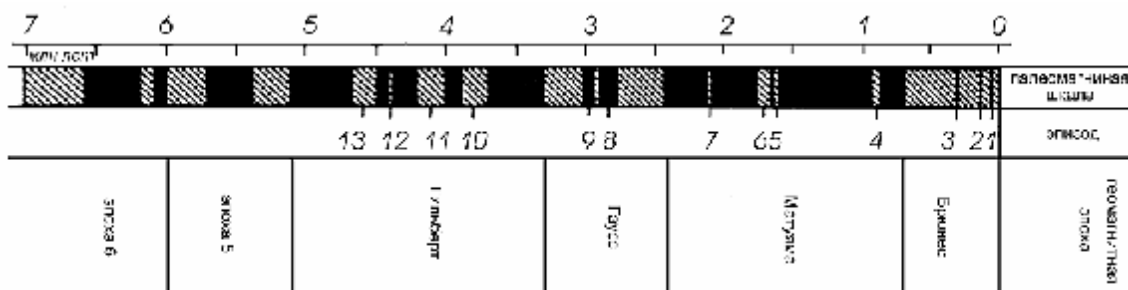


Рис. 3-6. Магнитохронологическая шкала за последние 7 млн. лет.

Итак, на Земле происходили глобальные катастрофические явления: массовые вымирания, оледенения, потопы, периоды интенсивного вулканизма, магматизма и сейсмичности сменялись периодами спокойного развития планеты. Некоторые из этих явлений наблюдаются и в наше время, хотя и заметно меньшего, чем раньше, масштаба. Модель горячей Земли находит непротиворечивое объяснение этим явлениям. По своей физике, наша модель базируется на функционировании фазовых переходов первого рода, которые, по определению, имеют “катастрофические” решения (Кузнецов, 1992).

*Гравитационное поле.* Все, что окружает нас на поверхности Земли, испытывает действие силы тяжести, она направлена вертикально вниз и воспринимается нами как вес. Сила тяжести пропорциональна массе тела. Коэффициент пропорциональности обозначается обычно через  $g$  и называется ускорением свободного падения. На поверхности Земли ускорение свободного падения приблизительно равно  $980 \text{ см/с}^2$  или 980 Гал (в честь Галилея). Сила притяжения уменьшается примерно на 0,3 мГал при подъеме тела на высоту в 1 метр относительно земной поверхности. Земля, как известно, вращается, поэтому на тело, находящееся на ее поверхности, кроме силы тяжести действует еще одна сила - центробежная. Эта сила максимальна на экваторе, где величина  $g$  уменьшается под ее влиянием на 3,4 Гала. На полюсах центробежная сила отсутствует.

Из закона всемирного тяготения вытекает, что:

$$g = GM/R^2, \quad (3.14)$$

где  $M$  - масса Земли,  $R$  - ее радиус,  $G$  - гравитационная постоянная. Коэффициент пропорциональности  $G$  необходим для согласования размерностей обеих частей равенства (3.14). Ньютон показал, что  $G$  величина постоянная и открытый им закон тяготения универсален. Общая теория относительности (ОТО) Эйнштейна так же содержит  $G$  в качестве фундаментальной константы.

Гравитационный потенциал Земли можно выразить следующим образом:

$$j = GM/R + G/R^3 \times [(A + B)/2 - C] (3/2 \cos 2q - S) + W^2 R^2 / 2 \sin q. \quad (3.15)$$

Здесь:  $A$ ,  $B$  и  $C$  - моменты инерции Земли относительно ее основных осей, угол  $q$  - дополнение к широте,  $W$  - частота вращения Земли.

Как следует из формулы (3.15), сила тяжести (гравитационный потенциал) на поверхности Земли может измениться со временем, если будут меняться: гравитационная постоянная, масса Земли или ее радиус, а так же скорость вращения. Рассмотрим возможные модели, в которых эти параметры могут изменять свои значения в течение времени эволюции Земли.

С точки зрения физики, наибольший интерес представляет идея об изменении величины гравитационной постоянной  $G$  высказанная Дираком (Dirac, 1938). Он обратил внимание на безразмерную постоянную  $e^2/4\pi G m_e m_p$ , которая по порядку величины равна  $10^{40}$ . Эта постоянная может быть получена следующим образом. Сила взаимодействия протона и электрона в атоме водорода обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:  $F_e = e^2/4\pi r^2$ . То же самое относится и к гравитационному взаимодействию:  $F_g = G m_e m_p / r^2$ . Если составить отношение сил электростатической и гравитационной, то получится постоянная Дирака. Он высказал предположение (гипотеза больших чисел), что такое большое число в природе не может быть случайным, и связал это число с возрастом Вселенной. По последним оценкам ее возраст ( $T$ ) составляет примерно 18 млрд. лет. Год - это искусственная единица времени. Дирак воспользовался атомной единицей времени, в которой за отсчет берется интервал времени, в течение которого свет проходит "сквозь" классический электрон  $e^2/4\pi m_e c^3$ . Возраст Вселенной в этих единицах оказывается равным  $\approx 10^{40}$ . Дирак предположил, что эти очень большие числа действительно равны, т.е.:

$$e^2/4\pi G m_e m_p \approx T. \quad (3.16)$$

В атомной системе единиц заряд электрона  $e$ , массы протона и электрона  $m_p$  и  $m_e$  постоянны, если возраст Вселенной  $T$  растет, значит должна изменяться гравитационная постоянная ( $G \sim 1/T$ ). В соответствии с возрастом Вселенной за год это изменение должно составлять  $5 \times 10^{-11}$ .

П. Дирак обратил внимание еще на одну очень большую безразмерную величину - полную массу Вселенной, выраженную в массах протона (примерно  $10^{80}$ ). Согласно гипотезе больших чисел следует ожидать, что это число пропорционально возрасту Вселенной в квадрате ( $\sim T^2$ ). Это означает, что во Вселенной должно рождаться вещество, причем рождаться непрерывно. Дирак предположил два различных механизма этого явления. В первом из них новое вещество непрерывно рождается во всем пространстве Вселенной. Это, так называемое, - аддитивное рождение. Либо оно рождается рядом с уже существующим веществом, - это мультипликативное рождение. В предположении аддитивного рождения вещества масса Солнца  $M_\odot$  остается приблизительно постоянной величиной, следовательно  $(G \sim M_\odot) \sim 1/T$ . Если имеет место мультипликативное рождение,  $M_\odot \sim T^2$ , т. е.  $(G \sim M_\odot) \sim T$ .

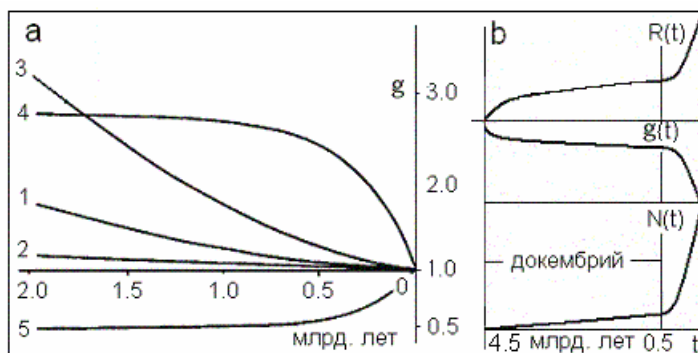


Рис. 3-7. а - Изменение силы тяжести во времени по различным моделям: 1 – Дике, 2 – термического расширения. 3 – Каппа, 4 – наша, 5 – Веселова и др. б – Изменение радиуса Земли  $R(t)$ , силы тяжести  $g(t)$ , численности биологической популяции  $N(t)$ .

Идеи П.Дирака были развиты и обобщены В. Кануто, П. Джорданом, Р. Дике и др. Проводимые ими исследования в значительной степени касались изменения во времени величины земного радиуса и величины ускорения силы тяжести в зависимости от вариации гравитационной постоянной (см. рис. 3-7-а). Кануто (Canuto, 1981) предполагал возможность вариации величины  $G$ , при этом, он считал, что при вариациях земного радиуса происходит превращение части потенциальной гравитационной энергии в энергию электромагнитного поля (?). Дике (Dicke, 1962) показал, что нет принципиальной разницы между предположениями об изменении массы и изменении гравитационной постоянной. Можно предположить, что в постоянной Дирака изменяется со временем электрический заряд, однако, как было показано (Sabbata, 1980), это противоречит современным экспериментальным данным.

Общая теория относительности не удовлетворяет тезису Дирака, но может быть соответствующим образом обобщена, что было сделано сперва Джорданом (Jordan, 1979), а затем Брансом и Дике (Brans, Dicke, 1961). Из теории Джордана вытекает факт творения материи. Бранс и Дике, введя дополнительное к гравитационному скалярное поле, собственно связанное с изменением величины  $G$ , “обошли” эту трудность.

Идея “творения” материи, т.е. постоянный рост массы Земли в процессе ее эволюции, по всей видимости, принадлежит русскому, И.О. Ярковскому (1889) (Carey, 1976). Эта идея развивалась О. Хильгенбергом (Hilgenberg, 1933), поддерживалась С. Кэри (Carey, 1976) и, в большей степени, русскими: И.В.Кириловым, В.Ф.Блиновым (1984) и др. Отметим серию работ К.Е. Веселова и др. (1976, 1981, 1984, 1993), в которых авторы, для объяснения концепции глобального рифтогенеза, пытаются создать корпускулярную модель гравитационного поля. В ее основе лежит необоснованное предположение о наличии гипотетического “гравитационного вакуума”, в котором с огромной скоростью носятся частицы (по всей видимости, гипотетические гравитоны). График поведения во времени величины  $g$ , следующий из “корпускулярной модели гравитации и инерции” Веселова, так же как и для других моделей, приведен на рис. 3-7.

Альтернативная всем предыдущим и поэтому стоящая несколько в стороне, гипотеза была высказана Каппом (Karr, 1960), предложившим идею, согласно которой масса Земли 2 млрд. лет тому назад была примерно в 30 раз больше современной, а ее радиус - в три раза больше. Капп считал, что в процессе эволюции Земли ее недра подвергались гравитационному коллапсу, в результате действия которого терялась ее масса (?). Этот процесс он называл buckling, что можно перевести как затягивание ремня пряжкой (другой, шуточный вариант, - жениться) (рис. 3-7). Эта идея перекликается с подходом развиваемым Холмсом (Holmes, 1965), согласно которому в процессе эволюции Земля подвергалась деструкции и уплотнению. Ее изначально “пустые” внутренние объемы сжимались, выбрасывая на поверхность Земли атмосферные газы и воду.

*Изменение гравитационного поля в прошлом.* Менялось ли гравитационное поле Земли в процессе её эволюции? Ответить однозначно на этот вопрос нельзя и в наше время. Прошло четверть века с момента написания профессором университета в Рединге (Англия) А.Д. Стюартом (Stewart, 1970) обзора “Palaeogravity” на эту тему. Некоторые вопросы, затронутые им, были уточнены за прошедшие с той поры 25 - 30 лет, получены новые экспериментальные данные. Однако нельзя сказать, что в выяснении этого вопроса достигнут большой прогресс. Надо заметить, что тематика исследований, связанных с поведением гравитационного поля Земли в прошлом, не была эти годы особенно популярной. Новых работ появилось довольно мало. Тем не менее, несмотря на определенные успехи в области изучения стабильности во времени гравитационной постоянной и массы Земли, появляются статьи и книги, в которых авторами игнорируются экспериментально полученные данные по стабильности этих параметров. Стюартом были рассмотрены основные идеи, касающиеся физических моделей, в которых оказывается возможным изменение со временем величины силы тяжести на поверхности Земли. Здесь добавлены известные автору немногочисленные работы, в которых предпринималась попытка оценки величины  $g$  в прошлом (Stewart, 1972; Смирнов, Любина, 1969; Шмидт-Нильсон, 1976; Кренделев, 1977; Кузнецов, 1996). Основные результаты экспериментов по оценке степени стабильности массы и гравитационной постоянной заимствованы из статей (Flandren, 1975; Милуков, 1986; Shapiro et al., 1976).

*Системы чувствительные к изменению силы тяжести.* Стюарт рассматривает несколько таких систем, которые можно разбить на три подгруппы: К первым отнесем системы, в которых изменение силы тяжести оказывает влияние на геодинамические процессы и явления. Стюарт рассматривает влияние релей-тейлоровской неустойчивости, возникающей при образовании осадочных пород в водной среде; подъем диапиров в мантии и мантийные конвективные системы. Ко второй подгруппе систем можно причислить: гравитационное сжатие глин, палеобарометрический метод и сжатие, и преобразование горных пород движущимися палеоледниками. Третья группа систем базируется на использовании чувствительности к величине силы тяжести биологических объектов, обитавших на Земле в прошлом: оценка размеров летающих животных, оценка относительного веса скелетов земных животных и глубины оставленных ими окаменевших следов.

Прежде чем подробнее рассмотреть эти и близкие к ним системы, обратим внимание на один существенный на наш взгляд момент. Стюарт рассматривал эти геологические данные с основной целью: использования их для оценки изменения величины  $G$  и выяснения степени правдоподобия теории Дирака. Стюарт полагал, что изменение  $g$  однозначно определяется уменьшением гравитационной постоянной. Как будет показано нами ниже, астрономические методы оценки стабильности  $G$  и  $M$  намного точнее геологических, хотя и более дорогие, и сложные. Нас будут интересовать эти системы в основном с точки зрения возможности оценки не столько величины  $g$ , существовавшей на поверхности Земли в геологическом прошлом, сколько характера ее изменения. С помощью геологических методов достоверно оценить величину  $g$  в прошлом, по-видимому, невозможно, поэтому на первом этапе исследований было бы достаточным четко определить, была ли величина  $g$  в прошлом больше или меньше современной. Как будет ясно из последующего текста, мнения геологов на этот счет расходятся на диаметрально противоположные.

*Геодинамические системы.* Релей-тейлоровская неустойчивость возникает обычно в гидродинамической среде, если среда состоит из слоев вещества разной плотности, причем в силу каких-то обстоятельств в системе оказалось так, что плотность верхнего слоя выше, чем нижележащего. Такая ситуация может возникнуть в осадконакоплении в



водной среде, когда например, слой тяжелого песка окажется на более легкой глине. Более тяжелый слой, находящийся на слое с меньшей плотностью деформирует пограничный слой в виде синусоидальной волны с длиной волны  $l$  от долей сантиметра до нескольких метров. Слой осадков можно представить в виде ньютоновской жидкости с вязкостью  $h$ , которая подвергается растяжению. В нашей модели можно записать: волновое число  $k \sim (g/h^3)^{1/3}$ , и ускорение силы тяжести  $g \sim l^{-3}$ . Предположим, что в древних осадочных породах наблюдается эффект образования синусоидальных волн, обязанный развитию релей-тейлоровской неустойчивости. Причем, «длина волн» неустойчивости была в древних породах меньше, чем в молодых. Это свидетельствовало бы в пользу уменьшения величины  $g$  в течение эволюции Земли.

Стюарт рассматривает механизм подъема соляных диапиров, как способ оценки величины  $g$ . Плотность соли обычно меньше чем плотность покрывающих ее пород. Если по каким-либо причинам образовался соляной купол высотой  $L$ , а толщина слоя покрывающих пород над вершиной купола  $T$ , то возникает выталкивающее давление:

$\Delta p = gL(r_2 - r_1)$ . Здесь  $r_2$  - плотность покрывающих пород,  $r_1$  - плотность соли ( $r_2 > r_1$ ). Если вещество диапира обладает свойствами жидкости (т.е. вязкостью), то диапир будет подниматься под воздействием выталкивающего давления. Время подъема диапира (время "протыкания"  $t$ ) определяется такими параметрами как, вязкость его вещества:

$m$  ( $m = n \cdot r$ ), разность в плотностях  $\Delta r$ , величина  $L$  и ускорение силы тяжести  $g$ :

$$t = m / g L r.$$

Допустим, к примеру, что два диапира "протыкали" покрывающие их породы в геологически разные времена. Причем, такие их параметры как вязкость, плотность и начальная глубина  $T$  были одинаковы, а время "протыкания" более древнего диапира было меньше, чем у более молодого. Этот факт говорил бы в пользу того, что величина  $g$  со временем уменьшалась и наоборот.

В подтверждение "работоспособности" этой модели Стюарт приводит результат лабораторного эксперимента, в котором соляной "диапир" протыкал покрывающий его слой из асфальта толщиной в полтора сантиметра в течение 0,5 - 3 суток.

В конвективной модели мантии, предложенной Ранкорном в 1962 г., скорость конвекции вещества мантии  $V$  определялась плотностью вещества -  $r$ , коэффициентом объемного расширения -  $b$ , разностью температур на верхней и нижней плоскостях конвективной ячейки -  $\Delta T$ , толщиной ячейки -  $R$ , величиной вязкости вещества -  $m$  и ускорением силы тяжести -  $g$ :

$$g r b \Delta T = m V / R^2$$

Стюарт особо оговаривает такой немаловажный момент, касающийся вязкости. Он считает, что предположение о постоянстве вязкости может ввести в заблуждение. Тем не менее, опуская из рассмотрения ряд параметров, Стюарт обсуждает упрощенную формулу:

$$g = (k \cdot V) / \Delta T,$$

согласно которой сила тяжести связана со скоростью конвекции и разностью температур на конвективной ячейке. По ходу обсуждения проблемы, Стюарт делает глобальное обобщение: не является ли континентальный дрейф следствием изменения гравитационного поля Земли.

*Сжатие глин.* Сжатие глин давлением гравитации (весом вышележащих слоев) Стюарт считал идеальной системой для измерения величины силы тяжести в прошлом. Он разработал метод, хотя и не позволяющий определить точную величину палеогравитационного поля, но дающий возможность найти скорость уменьшения ускорения силы тяжести  $g$  со временем (Stewart, 1972). Стюарт полагал, что если величина  $g$  в прошлом была больше современной, то, вполне возможно, что некоторые тонкозернистые осадочные породы могли оказаться уплотненными в большей степени, чем это должно было бы произойти, если бы они уплотнялись под весом осадочного слоя

существующего в настоящее время. Процесс уплотнения происходит относительно быстро и является практически необратимым, поэтому такие "свидетели" переуплотнения могли бы сохраниться.

Стюарт произвел измерения степени консолидации осадков в Лондонском бассейне. Он нашел, что глины в обнажениях этого бассейна консолидировались при более высоких давлениях, чем давления, соответствующие современной максимальной толщине перекрывающих осадков в Лондонском бассейне. Стюарт допускал, что здесь могли быть еще слои осадков, которые затем были размыты. Однако если консолидация глин произошла все же за счет большей величины силы тяжести в прошлом (у Стюарта - 26 млн. лет назад), то величина  $g$  не могла быть больше современной в два раза. Это означает, что максимальное уменьшение  $g$  за 26 млн. лет составляет  $4 \times 10^{-8}$  в год. Скорость уменьшения  $g$ , по нашей модели, примерно в 10 раз меньше (рис.3-1).

Суть палеобарометрического метода предложенного Стюартом для оценки величины  $g$  в прошлом состоит в определении градиента палеолитостатического давления:

$$g \sim (p_2 - p_1) / L(r/e),$$

где  $p_2$  и  $p_1$  - литостатические давления двух уровней,  $L$  - расстояние между уровнями  $r$  - их средняя плотность. Разность литостатических давлений можно определить, как считает Стюарт, минералогическими методами. Оценка  $g$  может быть сделана в том случае, если известна  $e$ . Точное определение величины  $e$  представляет очевидную трудность, что ставит применение предлагаемого метода непригодным в ряде случаев, например, в сейсмически активных районах, где величина  $e$  может изменяться со временем.

Способ оценки  $g$ , как результат сжатия горных пород древними ледниками и определение степени сжатия по глубине оставленных ледниками борозд, как мы отмечали, предлагал еще Холмс. Стюарт считал этот метод наиболее перспективным из всех трех обсуждаемых Холмсом. Аналогичный метод обосновал он сам. Стюарт считал возможным оценивать степень округлости валунов находящихся в осадочных слоях. Валуну изначально были раздроблены весомдвигающихся ледников, а затем, при движении их под давлением ледника в воде со скоростью  $v$ , они постепенно приобретали округлую форму. Сила "плавучести" валунов определяется формулой:

$$D = 4/3 \pi r^3 (r_1 - r_2) g,$$

где  $r_1$  и  $r_2$  - плотности валунов и воды соответственно,  $r$  - их радиус. С другой стороны, эта сила уравнивается сопротивлением среды, которую можно выразить через скорость  $v$ :

$$D' = 1/2 \times C \pi r^2 r_2 v^2.$$

В результате, Стюарт получил зависимость скорости движения валунов от величины ускорения силы тяжести:  $v^2 = (8 r \Delta r g) / C r_2$  ( $C$  - константа). Для количественной оценки необходимо получение природной информации о зависимости скорости  $v$  от  $g$  для различных типов глин, пород и размеров валунов.

Как выше отмечалось, Холмс считал метод оценки величины  $g$  по углам осадочных слоев совершенно непригодным. Подобные исследования были выполнены Смирновым и Любиной (1969), где авторы проанализировали информацию по углам наклонов косых серий в дюнах водной и эоловой природы и углам наклонов фронтальных откосов этих образований из отложений различного возраста (от раннего протерозоя по кайнозой). На довольно малой и непредставительной выборке авторы приходят к выводу, что с течением времени углы наклона косых серий изменяются и, по их мнению, скорее уменьшаются, чем возрастают и, что этот эффект связан с увеличением ускорения силы тяжести с течением времени. Правомерность этого вывода вызывает сомнение. С другим выводом авторов нельзя не согласиться, что "реконструкция  $g$  является важнейшей задачей науки о Земле" (Смирнов, Любиная, 1969, стр. 877).

*Палеонтологические данные.* Размер крыльев летающих животных и скорость движения крыльев, согласно Стюарту, находятся в соответствии с их весом и величиной силы тяжести:

$$m g = 1/2 \times (C S r v^2),$$

где  $C$  - безразмерный коэффициент,  $S$  - площадь поверхности крыльев,  $r$  - плотность воздуха,  $v$  - скорость движения крыла. Первое, что следует из этой формулы, это связь между ускорением силы тяжести и величинами  $S$  и  $m$ . Большая сила тяжести в прошлом у животных с одинаковой массой тела требовала больших размеров крыльев (при равной скорости их движения).

Для оценки энергетики (мощности) организма животного биологи вводит понятие интенсивность метаболизма ( $M$ ). Под этим имеется в виду превращение определенных веществ (белков, глюкозы и т.п.) внутри клеток с момента поступления веществ до образования конечного продукта. Интенсивность метаболизма измеряется в ккал/сутки и имеет смысл и размерность мощности. Эта характеристика для животных самых разных размеров (от крысы до быка) удивительно постоянно зависит от их веса, но заметно отклоняется от прямой зависимости от площади поверхности. Многочисленные исследования подтвердили, что наклон прямой в зависимости интенсивности метаболизма от веса составляет 0,734:  $M \sim (mg)^{0.734}$ , или:  $\gg (mg)^{3/4}$  (Шмидт-Нильсон, 1976). Зависимость:  $M \sim (mg)^{3/4}$  хорошо известна для животных, однако недавно аналогичная зависимость была получена и для растений (Гиляров, 1999). Под  $M$  здесь понимается величина, характеризующая интенсивность использования растениями ресурсов и их продуктивность.

Как показал Стюарт,  $M \sim L$  ( $L$  - линейный размер летающего животного, в частности, птицы). Поэтому, полагая очевидными пропорции:

$$M \sim L \sim (mg)^{3/4}; (mg)^{3/4} \sim (L g)^{3/4}$$

(если считать правомерной пропорцию:  $m \sim L$ , а не  $m \sim L^3$ , как в неживой природе);

$$L \sim (L g)^{3/4}; \text{ величина } L \text{ оказывается зависимой от } g: L \sim g^3.$$

Как это может показаться ни парадоксально, но с увеличением силы тяжести, должен возрасти размер животных. Ведь, казалось бы, что мелкому животному легче преодолеть большую величину силы тяжести, чем более крупному. Оказывается, что это ошибочное представление. Большие размеры животных (и растений) в прошлом, в этом случае, доказывают большую величину силы тяжести, чем ее современное значение.

Стюарт делает оценку величины  $g$  по относительному весу скелета животных. При этом он использует формулу Эйлера для оценки величины нагрузки на кость скелета ( $F$ ):

$$F = \pi^2 E I / L^2,$$

$E$  - модуль Юнга,  $I$  - момент инерции [ $I = (k \pi r^4)/4$ ],  $L$  - длина кости,  $r$  - ее радиус,  $k$  - константа. Подставляя, получаем:

$$F = \pi^3 k E / 4 \times (r^4 / L^2).$$

Полагая, что  $F$  должна быть: примерно равной  $mg$ , где  $m$  масса животного, зависимость ускорения силы тяжести имеет следующий вид:

$$mg \sim r^4 / L^2.$$

Масса скелета ( $m_c$ ), по всей видимости, пропорциональна:  $m_c \sim r^2 L$ , тогда величина  $g$ :

$$g \sim m_c^2 / m L^4,$$

оказывается пропорциональной отношению массы скелета животного  $m_c$  к массе его тела (в квадрате) и обратно пропорциональной размеру животного (в кубе):

$$g \sim a^2 / L^3, \quad a = m_c / m, \quad L \sim m.$$

Рассмотрим в качестве примера, два животных с одинаковыми линейными размерами: современного слона и его предка – мастодонта. Они имели одинаковую массу, но отличались друг от друга массой скелета, причем, как следует из книги Шмидта-Нильсона

(1976), скелет мастодонта более громоздкий, чем у слона. Это свидетельствует в пользу того, что сила тяжести раньше была больше чем теперь.

Сравним полученный нами результат ( $g \sim a^2/L^3$ , откуда следует,  $L \sim a^{2/3}/g^{1/3}$ ), с прежней оценкой  $L$  ( $L \sim g^3$ , и  $H \sim 1/g$ ), тогда оказывается, что  $a \sim g^5$ , т.е. должна наблюдаться очень сильная зависимость относительного веса скелета от величины силы тяжести. Трудно допустить, что такая зависимость реально имеет место в живой природе. Ф.П. Кренделев (1977), анализируя изменение силы тяжести в геологическом прошлом Земли, приходит к аналогичному выводу: "Уменьшение сил гравитации (ослабление гравитационного поля) приводит к уменьшению веса скелета и наоборот" (стр. 156). Он приводит таблицу, в которой относительный вес скелета человека составляет 12%, а у рептилий 14%, что, казалось бы, должно подтверждать сказанное нами выше. Однако Кренделев делает совершенно противоположный вывод, "что гравитационное поле в истории Земли медленно возрастало с момента зарождения позвоночных до современной эпохи" (Кренделев, 1977, стр. 154).

Исследование глубины следов оставленных древними животными динозаврами так же дает некоторую информацию о величине силы тяжести в прошлом. Если удалось бы показать, что глубина окаменевших следов древних животных была больше чем таких же животных, обитавших на Земле в более поздние времена, то это свидетельствовало бы о том, что величина силы тяжести со временем убывает.

Стюарт считал, что Холмс первым (1947) предложил проводить целенаправленное изучение палеогравитационного поля. Холмс пытался в природе изменения величины  $g$  найти объяснение факту увеличения скорости седиментации и активизации земной коры начавшейся в кембрии. Он связывал изменение  $g$  с уменьшением величины  $G$  и вытекающие из этого превращения минералов при понижении давления в менее плотную форму. Наиболее вероятный механизм расширения, по мнению Холмса, это конвективная циркуляция вещества в мантии. Холмс предложил три метода оценки величины  $g$ .

В первом, оценивалась глубина штрихов (борозд) под ледником, образующихся при его движении. Второй метод основывался на анализе количества фрагментов, выброшенных в геологическом прошлом из вулканов при их извержении. Третий метод оценки  $g$  основан на использовании информации об углах падения косой слоистости в осадках. Стюарт отдает предпочтение первому методу, считает весьма сомнительным второй и совершенно непригодным - третий.

Таблица 3.2.

#	Метод	Параметр	Зависимость от $g$
1	Релей-тейлоровская неустойчивость	длина волны $l$	$\sim l^{-1}$
2	Подъем диапира	время $t$	$\sim t^{-1}$
3	Конвекция в мантии	скорость $v$	$\sim v$
4	Сжатие глин	время $t$	$\sim t^{-1}$
5	Палеобарометрический. метод	расст. между сл. $L$	$\sim L^{-1}$
6	Движение ледника	скорость $v$	$\sim v^{-2}$
7	Углы наклона	углы $a$	$\sim a$
8	Размер летающих животных	площадь крыльев $S$	$\sim S$
9	Метаболизм	размер $L$	$\sim L^{1/3}$
10	Относительная масса скелета	размер $L$	$\sim L^{1/3}$

*Жизнь и гравитация – есть ли такая связь?* Хорошо известно, что еще 100 млн. лет тому назад на Земле росли деревья, размеры которых были больше современных, на Земле обитали ящеры, максимальные размеры которых значительно превышали максимальные размеры современных животных. С другой стороны, геологи знают, что раньше на Земле не было высоких гор, а сила тяжести (возможно) была больше современной. Казалось бы, высота гор  $H$  должна зависеть от величины силы тяжести, так как она должна как бы

"противодействовать" их увеличению. Поэтому, в грубом приближении, исходя из общего принципа гидростатического равновесия литосферы Земли:  $rgH = const$ , можно положить, что  $H \sim 1/g$ . Выше мы показали, что максимальные размеры животных (и возможно, растений)  $L \sim g^3$ . (По крайней мере,  $L \sim g$ , а не  $L \sim 1/g$ ).

Получается парадоксальная ситуация: с одной стороны, если величина  $g$  раньше была больше, то высоких гор не должно было бы быть, однако, с другой стороны, размеры животных (как и высота гор) должны были бы быть меньше современных.

Решение этой задачи требует найти разумную причину замеченного парадокса. Обратим внимание на то, чем отличается в Природе живое от не живого. На эту тему имеется много различных критериев и подходов... Будем, естественно упрощенно, считать, что отличие живой Природы от неживой заключается в способности первой к метаболизму, т.е. способности клеток к преобразованию одних веществ, в другие.

Как было показано выше, ещё более 100 лет тому назад Е. Рубнер (Шмидт-Нильсон, 1976) на примере собак показал, что интенсивность метаболизма  $M$  линейно связана с площадью поверхности животных:  $M \sim S$ . В то же время, как мы отмечали выше, наблюдается  $M \sim (mg)^{3/4}$ . Преобразуем  $M \sim (mg)^{3/4}$  в:  $m \sim M^{4/3}/g$ , полагая  $m \sim L$ , получаем:  $L \sim M^{4/3}/g$ . Если соотношение  $L \sim g^3$  реально, то интенсивность метаболизма  $M$  должна зависеть от силы тяжести:  $M^{4/3} \sim g^4$ , или  $M \sim g^3$ , что, по-видимому, слишком сильная зависимость и реальнее:  $M \sim g$ .

Возникает вопрос, известно ли, что метаболизм зависит от величины силы тяжести? Оказывается, этот факт подтвержден ботаниками (Эванс и др., 1987), изучавшими механизм реакции корней растений на изменение силы тяжести. Так называемый гравитропический изгиб корня регулируется гормоном ауксином, который, в свою очередь, включается в метаболизм. Таким образом, можно полагать, что связь метаболизма с гравитацией в достаточной степени очевидна.

Предположим:  $M \sim g$ , учтем, что в нашей модели:  $g \sim 1/R^2$ , а  $R$ , в свою очередь, на первом этапе эволюции Земли:  $R \sim t^{1/2}$ , и:  $R \sim t^2$  – на втором. Вернадский утверждал, что биомасса Земли:  $B \sim NM$  – константа, а  $N$  – численность биологической популяции. Тогда,  $N \sim t$  – на начальном этапе эволюции (в докембрии), и  $N \sim t^4$  – на заключительном этапе эволюции (см. рис. 3-7-b). Эта оценка соответствует наблюдаемому характеру эволюции биосферы Земли. Сделаем несколько выводов:

- Интенсивность метаболизма древних организмов, растений и животных была выше, чем у современных. Она понижается, по мере уменьшения на Земле величины силы тяжести, что приводит к резкому возрастанию биоты.
- Жизнь на Земле может возникнуть только при наличии силы тяжести, следовательно, она не могла быть привнесена на Землю из Космоса.
- Причина глобальных вымираний, происходивших ранее на Земле, возможно, связана с резкими изменениями силы тяжести, которые, в свою очередь, могли происходить в моменты изменения величины земного радиуса.
- 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.

*Итоги.* Подведем итоги обсуждению геологических и биологических систем чувствительных к изменению силы тяжести на Земле. Как нами отмечалось, это, конечно, качественный анализ. Ни один из рассмотренных методов не допускает возможности получить количественную оценку величины силы тяжести в геологическом прошлом. Описание методов и ссылки на оригинальные работы приведены в обзоре Стюарта (Stewart, 1972). Здесь же некоторые детали и результаты анализа методов переинтерпретированы и добавлено небольшое количество работ посвященных этой

тематике. Нас в большей степени интересовал характер зависимости того или иного параметра (размера, скорости, площади и т.п.) от величины силы тяжести  $g$ . Результаты анализа сведены в таблицу.

Анализируя таблицу 3.2 можно видеть некоторую общность результатов анализа рассмотренных методов. Например, методы (2) и (4) показывают, что если процессы в прошлом происходили быстрее чем сейчас, то сила тяжести была больше. Аналогично, если длина волны (1) и расстояние между слоями (5) были меньше, то величина  $g$  раньше была больше. Казалось бы, вполне "разумна" зависимость (8): требование большей площади крыльев при увеличении  $g$ . Заметим, что методы (9) и (10) явно коррелируют между собой. С увеличением  $g$  должны возрасти максимальные размеры древних животных. (Мы знаем, что они были раньше больше). Не смотря ни на что, она представляется противоречащей здравому смыслу. Возможным способом снять это противоречие может оказаться более сильная зависимость (чем  $L$  от  $g$ ) от величины силы тяжести относительного веса скелета животных. Предположим, что мы правы, тогда может выполняться условие:  $m_c/m \sim L^n$ , или относительный вес скелета животных возрастает с ростом их размеров, что действительно имеет место. Возможно, таким образом, устраняется кажущееся на первый взгляд противоречие: Если сила тяжести раньше была больше, и не было больших гор ("росту" которых "противодействует" сила тяжести), то с какой стати, казалось бы, "процветали" огромные ящеры? Вопрос может найти решение, если величина  $m_c/m > L$ , что означает правильность (9 и 10), несмотря на его парадоксальность и кажущееся "противоречие" опыту с высотой гор.

*Магнитное поле.* Геомангнитное поле изменялось в течение эволюции Земли. Достоверно известно, что оно периодически меняло полярность, или, как принято считать, претерпевало инверсии. Современное поле принято считать "нормальным" ( $N$ ). При этом северный магнитный полюс совпадает (близок к нему) с южным географическим. Поле обратной полярности считается "реверсивным" ( $R$ ). Инверсии поля наблюдались в течение эволюции Земли крайне нерегулярно. Рисунки 3-5 и 3-6 дают некоторое представление об этом. Известно, что в течение примерно 80 млн. лет частота инверсий менялась от примерно одной в 10 млн. лет до 5 в течение одного млн. лет. Затем, в течение примерно 40 млн. лет (от 120 до 80) инверсий не было вовсе (рис. 7-9). Периоды отсутствия инверсий наблюдались на Земле и в более ранние периоды её эволюции, они получили название суперхронов.

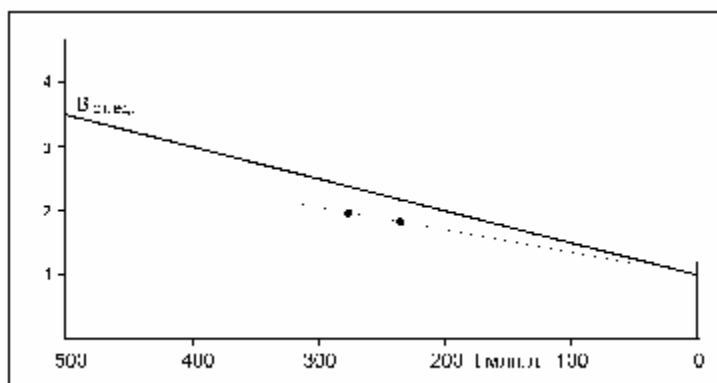


Рис. 3-8. Изменение магнитного момента (точки) по (Smith, 1967) и прямая линия - согласно нашей модели.

Известно, что магнитный момент геомагнитного поля в течение периода обсерваторских наблюдений (примерно 100 – 150 последних лет) убывает с удивительным постоянством: 5 % за 100 лет (рис. 3-8). Если так будет продолжаться, то начнется

инверсия в недалеком будущем, или интенсивность поля начнет возрастать, ясности пока нет. Как “вел себя” магнитный момент Земли в прошлом? Все магнитологи согласны с тем, что раньше он был больше (Smith, 1967), однако найти объяснение этому факту в рамках современной теории генерации геомагнитного поля найти не удастся. По Смитю, виртуальный дипольный момент  $p_m$  (Гаусс $\times$ см<sup>3</sup>) в интервале последних 10<sup>3</sup> млн. лет вдвое за каждые 100 млн. лет уменьшался почти линейно со временем эволюции Земли. Дипольный момент  $p_m$  можно выразить через ток генерации геомагнитного поля  $I$  и площадь сечения поверхности, занятой током  $S$ :  $p_m = IS$ . Полагая, что величина тока генерации в течение эволюции Земли не меняется (подробнее о геомагнитном поле в Главе 6), момент окажется зависимым от радиуса генерации ( $S \sim R_G^2$ ), который, по нашей модели, уменьшился втрое (от 3.5 до 1.2 тыс. км) за 4.5 млрд. лет эволюции Земли. Очевидно, что величина  $p_m$  уменьшится при этом примерно в 10 раз, что весьма похоже на наблюдаемое уменьшение величины геомагнитного поля. Таким образом, и качественно, и количественно, наша модель не противоречит экспериментальному факту уменьшения величины  $p_m$ .

*Скорость вращения.* О вращении Земли известно с тех пор, как Коперник предложил гелиоцентрическую систему, принципиально отличающуюся от системы мира Птолемея. Однако ещё Гиппарх во втором веке до нашей эры нашел, что земная ось перемещается вокруг оси эклиптики, обеспечивая прецессию. В 1737 г. Дж. Брайль открыл явление нутации - колебания оси вращения Земли, которые накладываются на прецессионное движение. В 1758 г. Л. Эйлер разработал теорию вращения абсолютно твердой Земли вокруг оси главного, полярного момента инерции  $C$ , при условии отсутствия моментов внешних сил. Частота эйлеровой прецессии  $w_E = (C - A) \dot{\varphi}_0 / A$ , где  $A$  - экваториальный момент инерции,  $\dot{\varphi}_0$  - имеет размерность (сутки)<sup>-1</sup>. Период прецессии Эйлера составляет 305 суток. В действительности, Земля не абсолютно твердое, а упругое, деформируемое тело и поэтому в спектре вращения Земли эйлеровой прецессии не наблюдается. В 1892 г. С. Чандлер обнаружил в спектре движения полюса вращения Земли вокруг оси инерции период, равный примерно 428 суток ( $\approx 14$  месяцев). Это 14-месячное колебание названо в его честь чандлеровским периодом, а сами колебания чандлеровскими. Американский астроном С. Ньюком показал, что чандлеровский период, это тот же период Эйлера для упругой Земли.

В настоящее время хорошо известно, что чандлеровский период не остается постоянным во времени - он флуктуирует, отклоняясь от среднего не более  $\pm 4$  %. По-видимому, это вызвано вариацией параметров Земли: жесткости, степени сжатия и т.п. Известно также, что период чандлеровского движения и его амплитуда пропорциональны друг другу (коэффициент корреляции 0.88), причем увеличение периода чандлеровских колебаний коррелирует с уменьшением амплитуды этих колебаний (Мельхиор, 1968).

Несмотря на почти вековую историю исследований чандлеровских колебаний, природа их остается загадкой. Так, например, до сих пор по этому поводу высказываются совершенно различные, подчас противоположные друг другу, мнения. Л. Мансина и Д.Е. Смайли в 1967 г. выдвинули предположение о том, что чандлеровские колебания возбуждаются при землетрясениях (Стейси, 1972). Ранее, обсуждая эту проблему, У. Манк и Г. Макдональд (1964) такой механизм не считали возможным. Оценки порядков величин изменения моментов инерции, подтверждают неприемлемость этого предложения. По мнению Ф. Стейси (1972), корреляция между землетрясениями и малыми движениями оси вращения представляется парадоксальной. Попытки объяснить природу чандлеровских колебаний атмосферными флуктуациями и магнитосферными вариациями, вызванными изменениями интенсивности потока солнечного ветра, показали, что эти явления на много порядков, меньше момента, необходимого для поддержания чандлеровских колебаний. Стейси предполагает, что существует какой-то механизм возбуждения колебаний, о котором мы совершенно не подозреваем.

Из астрономических наблюдений известно, что в настоящее время вращение Земли замедляется за счет приливного трения, увеличивая длину суток примерно на 1.5 мс за 100 лет. Известно, что примерно две тысячи лет тому назад скорость замедления  $1/w \cdot dw/dt$  была примерно в два раза выше - около 3 мс за 100 лет, или  $= 4 \times 10^{-22}$  рад/с<sup>2</sup>. Однако такое замедление вращения Земли представляет собой тренд, на фоне которого происходят как сезонные колебания скорости вращения Земли порядка  $\Delta w/w \leq 10^{-8}$ , так и долгопериодные изменения того же порядка. Скорость вращения Земли наименьшая в апреле и ноябре, а наибольшая - в конце января и июле. Принято считать, что главная причина сезонной неравномерности вращения Земли, это атмосферная циркуляция. Атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад - дуют западные ветры, а в умеренных и высоких широтах - с запада на восток. Момент импульса ветров: восточных - отрицателен, а западных, - положителен. Сезонная неравномерность состоит в перераспределении моментов импульса, причем, момент импульса восточных ветров в несколько раз меньше момента импульса западных.

Можно обсуждать другие причины сезонной неравномерности вращения, например, астрономическую, когда учитывается перекачка импульса из вращательного движения в поступательное и наоборот. Или изменение скорости вращения за счет сезонной зависимости величины океанических приливов, возмущающих форму Земли наиболее сильно и т.п. (Кузнецов, 1990). Хорошо известна взаимосвязь скорости вращения Земли с явлениями Эль-Ниньо. Это явление связано с переменной направления течений в Тихом океане. Наиболее сильное возмущение величины  $w$  за счет этого явления наблюдалось на рубеже 1982-83 г.г. (более подробно в Главе IX).

Изменения  $\Delta w/w$  должны коррелировать с вариацией силы тяжести  $\Delta g/g$ , однако, до внедрения в практику гравиметрического мониторинга криогенных сверхчувствительных гравиметров, этого обнаружить не удавалось. После постановки таких приборов в некоторые обсерватории, синхронные вариации  $\Delta g/g$ , в частности, чандлеровский период в гравитационном поле Земли, были зафиксированы.

Поиски корреляции долгопериодных вариаций скорости вращения Земли с различными геофизическими явлениями постоянно занимали особое место в работах по физике Земли. В частности, речь шла, например, о связи  $\Delta w/w$  с сейсмичностью Земли. Считалось, что такая связь распространяется на глубоководные землетрясения, а неглубокие землетрясения со скоростью вращения не связаны. Многие пытались найти взаимосвязи  $\Delta w/w$  с вариацией магнитного поля Земли, с амплитудой и длительностью чандлеровского периода, с вулканизмом и т.д. Несколько лет тому назад считалось, что такие корреляции вполне достоверны. Однако жизнь показала (в том числе и наши исследования), что значимых корреляций в действительности нет. Все геофизические параметры не имеют простой прямой связи с вариацией величины скорости вращения, хотя утверждать обратное, что на них не оказывает никакого влияния вращение Земли, тоже нельзя.

Принято считать, что Земля раньше вращалась значительно быстрее, чем сейчас. В доказательство этому, в физике Земли обычно ссылаются на данные по продолжительности года, суток, периода лунных приливов и т.п., по анализу кольцевых наростов и подсчету темно- и светлоокрашенных серий слоев известковых скелетов на срезах ископаемых кораллов, моллюсков и раковин. Чередование различно окрашенных слоев связывается с развитием скелета моллюска и изменением физико-географических условий его обитания и сопоставляется с годовыми кольцами деревьев. По поводу этой методики у специалистов нет ясного и однозначного мнения, насколько достоверны подсчеты колец на срезах древних моллюсков. Литература по этим вопросам очень обширна. Сошлемся на работу В.Н.Сакса с сотрудниками (Козлова и др., 1973), которые считают, что наблюдаемые слои в какой-то мере все же отражают суточные колебания жизнедеятельности животных в течение года, но не все суточные слои или пары слоев видны в разрезе достаточно четко и поддаются подсчету. В качестве аргумента авторы



приводят результаты исследования современных коралловых полипов, у которых даже годовые слои не всегда четко выражены и легко могут быть пропущены. В ещё большей степени это может проявляться в крайне тонких суточных слоях нарастания. Таким образом, к данным, полученным по анализу древних кораллов, моллюсков и пр., следует относиться весьма осторожно. Вероятно, это можно отнести и ко всем другим методам, основанным на расшифровке “каменной летописи” Природы. Грамотно прочесть их - пока проблема.

На рис. 3-9 приведены данные измерений длительности суток, полученные по кораллам (Wells, 1963; Berry and Barker, 1975; Pannela, 1972; Longer., 1996; Sonett et al., 1996; Zahnle, Walker; 1987). На рисунке изображена зависимость изменения длительности периода  $T$  обращения Земли вокруг оси от времени эволюции. Кривая построена по нашей модели. Точки – эксперимент. Последняя точка для 900 млн. лет опубликована в журнале *Astronomy* (Longer., 1996). Из рисунка следует, что оценка величины  $T$  полученная при подсчете слоев кораллов не противоречит модели. Заметим, что в данном случае мы использовали закон сохранения вращательного момента Земли. Учет влияния Луны должен привести к ещё большему расхождению модели и данных, полученных по кораллам. Дело в том, что обычно полагают, что момент вращательного импульса сохраняется:  $0.33MR^2\omega = const$ , однако, учет перераспределения вращательного момента Земли с Луной дает:

$$0.33 MR^2\omega + [M'm/(M+m)] \times L^2 \omega_1 = const, \quad (3.17)$$

где  $m$  - масса Луны,  $L$  - расстояние до Луны, а  $\omega_1$  - скорость её вращения. Учет второго члена уравнения приводит к уменьшению длительности периода вращения Земли. Можно ли считать, что выявленное несоответствие модели и данных по кораллам показывает несостоятельность модели горячей Земли? Полагаю, что отвергать модель на этом основании нельзя.

Обратимся к формуле (3.15), из которой следует, что если в результате эволюции Земли её радиус будет увеличиваться, то скорость вращения должна уменьшаться ( $j \approx GM/R + W^2R^2/2$ ). Соответственно, должна наблюдаться зависимость:  $T \sim 1/W \sim R(t)$ .

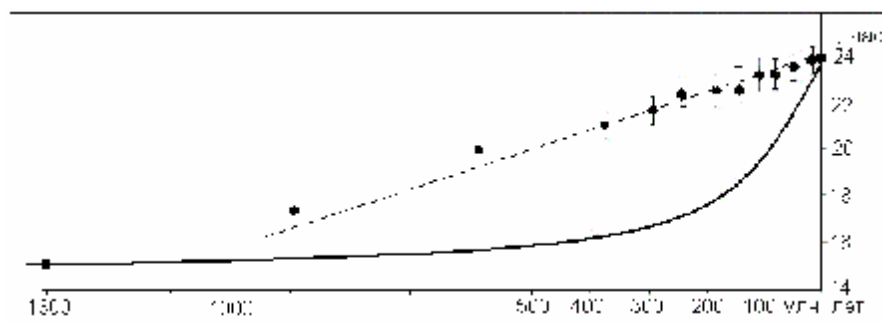


Рис. 3-9. Изменение скорости вращения Земли по нашей модели и данным по кораллам и строматолитам (ссылки в тексте).

Более того, в 2003 г. в средствах массовой информации, в частности, в сети Интернет (Земля замедляет, 2003) и агентства Синьхуа (Xinhuanet, 2003), появилась новая информация о палеовращении Земли. Согласно этой информации (не получившей пока подтверждения в научных публикациях) китайские ученые из Тяньцзиньского института геологии и минеральных ресурсов Zhu Shixing и др., на основе анализа напластований строматолитов, обнаруженных в древних пластах горы Яньшань, показали, что 1.3 млрд. лет тому назад Земля вращалась значительно быстрее, чем сейчас. В сутках ранней Земли было всего 15 часов (см. рис 3-9). Если этот результат подтвердится, будет признан научной общественностью и опубликован в научном журнале, то его можно считать прямым доказательством правомерности модели горячей Земли. Согласно модели (рис. 3-

9) длительность суток в этот период эволюции должна действительно составлять примерно 15 часов. Это соответствует радиусу Земли равному  $\approx 4$  тыс. км.

Вращение Земли монотонно замедляется. Этот факт никто не подвергает сомнению. Можно ли считать, что скорость замедления всегда была такой, как сейчас? Можно ли предложить какой-либо тест, с помощью которого внести определенность в эту проблему? Оказывается, что такой тест имеется, он состоит в выяснении характера поведения во времени системы Земля - Луна. Известно, что в настоящее время Луна, за счет диссипации энергии вращения океаническими приливами, удаляется от Земли со скоростью 3.3 см/год. Если проследить эволюцию системы Земля - Луна во времени назад, то оказывается, что в прошлом Луна была гораздо ближе к Земле, чем сейчас. При этом, очевидно, предполагается, что и скорость замедления Земли, и скорость удаления Луны, были такими же, как в настоящее время. Линейная экстраполяция полученных оценок в прошлое дает изменение радиуса орбиты Луны  $L$  за время  $4.5 \times 10^9$  лет, равное  $1.5 \times 10^5$  км, что составляет почти половину современного значения величины  $L$ . Тот факт, что амплитуда прилива, а, следовательно, и скорость замедления вращения и скорость удаления Луны пропорциональны  $1/L^3$ , значительно увеличивает скорость замедления. Так, например, согласно модели Гестенкорна (Стейси, 1972), когда Земля и Луна располагались очень близко друг от друга, на расстояниях, несколько больших предела Роша, орбита Луны была почти полярной. Это происходило примерно  $1.78 \times 10^9$  лет тому назад. До этого времени Луна должна была двигаться по орбите в направлении противоположном нынешнему. Надо сказать, что перенос в прошлое современной скорости удаления Луны приводит к парадоксальной ситуации (Кузнецов, 1990). Выходом из неё многие считали отказ от такого переноса. В оправдание приводились аргументы относительно того, что современные океаны возникли сравнительно недавно и таких приливов, тормозящих Луну, раньше не было. По-видимому, в этом есть некий здравый смысл. По крайней мере, этот тезис не противоречит нашей модели горячей Земли. Скорее всего, Луна всегда находилась на расстояниях от Земли, если и меньших, чем современное, то не настолько, чтобы "заставлять" её вращаться в противоположную сторону и приближаться к Земле на опасное расстояние порядка предела Роша. Проблема практически снимается, если учесть, что на Земле в более ранние эпохи не было современных океанов, а, следовательно, не было и такого приливного торможения Луны, как сейчас.

### III. 3. Упругие свойства вещества внутреннего ядра.

*Модули упругости железа и вещества внутреннего ядра Земли.* Принято считать, что ядро Земли железное, внутреннее ядро - в кристаллическом состоянии, внешнее - в виде расплава. Этот тезис практически не подвергается сомнению, в то время как многочисленные экспериментальные факты не могут быть использованы в поддержку этого мнения. Считается, что знание упругости и реологии железа при давлении характерном для ядра Земли очень важно для понимания сейсмологических наблюдений, таких как малое затухание сейсмических волн, малые величины скоростей сдвиговых волн и анизотропия скорости распространения волн сжатия. Многочисленные группы геофизиков экспериментаторов и теоретиков получили значительное количество новых данных по реологии железа и, тем не менее, до сих пор остается не совсем ясным, как устроена Земля и её ядро, в частности.

Считается, что радиус внутреннего ядра увеличивается в течение времени эволюции Земли путем кристаллизации из расплава железа в виде гексагонального монокристалла. Внешнее ядро при этом остается маловязким, жидким и хорошо проводящим субстратом, обеспечивающим возможность гидродинамических течений вполне определенной, заданной конфигурации, необходимых для генерации геомагнитного поля. Следует добавить, что Земля обменивается с космосом энергией и веществом и поэтому её можно считать открытой системой. Земля генерирует тепловой

поток, а так же ей свойственно наличие таких процессов как движение материков, вулканизм и сейсмичность, что всё вместе говорит о её диссипативном характере. Эти, казалось бы, очевидные каноны, тем не менее, содержат весьма значительные внутренние противоречия, которые мы попытаемся вскрыть при тщательном анализе известных, опубликованных данных.

В последнее время появились работы, в которых рассматривались реология, модули упругости и вязкость железа при давлении и температуре, свойственным ядру Земли (Boehler, 2000; Brown, McQueen, 1986; Зельдович и др., 1995; Mao et al., 1998; Steine-Neumann et al., 2001). С другой стороны, сравнительно недавно определена скорость сдвиговых волн, проходящих через внутреннее ядро (Кузнецов, 1997). По выражению Тромпа: обнаружен «святой Грааль» сейсмологии. Этим фактом доказано, что внутреннее ядро является твердым. Обнаруженная анизотропия внутреннего ядра истолкована так, что оно, возможно, представляет собой гексагональную структуру. Проведем сравнение между собой упругих модулей железа и вещества внутреннего ядра Земли, приведенных в Таблице 3.3.

Таблица 3.3. Модули упругости (GPa) и коэффициент Пуассона железа (при высоком давлении и температуре) и внутреннего ядра Земли.

	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{66}$	$K$	$\mu$	$\sigma$	
1	1697	809	757	1799	421	444	1085	445	0.28	Mao et al., 1998
2	2130	2010	925	1470	140	60	1425	145	0.45	Steine-Neumann
3	1630	1284		1660	150	173	1400	170	0.44	наши оценки

В первой строке Таблицы 3.3 приведены величины модулей железа (Mao et al., 1998) измеренные при давлении 211 ГПа и плотности железа  $r = 12.8 \text{ г/см}^3$ . В этой работе применялись статические и динамические методы для определения плотности и объемного модуля гексагонально (h.c.p.) упакованного железа при давлениях от 16 до 220 ГПа. Авторы использовали широкий набор экспериментальных методов, включая дифракцию рентгеновских лучей и сверхзвуковые методы. На одном кристалле определялись: модуль сдвига, тензор упругости, скорости волн сжатия и волн сдвига, и анизотропию этих скоростей в железе. Обнаружено, что скорость сдвиговых волн в железе значительно выше, чем во внутреннем ядре:  $V_S = 5.9 \text{ км/с}$  в железе против  $V_S = 3.65 \text{ км/с}$  во внутреннем ядре (см. рис. 3-10). Авторы наблюдали в железных образцах сильную решеточную анизотропию напряжения. Коэффициент Пуассона определен по величинам  $V_P$  и  $V_S$ .

Во второй строке Таблицы 3.3 приведены рассчитанные упругие модули для h.c.p. железа при  $r = 13 \text{ г/см}^3$  и температуре  $T = 6000 \text{ К}$  (Steine-Neumann et al., 2001). Авторы вычисляли энергию Гельмгольца гексагональной решетки в изотермическом приближении и оценивали величины изотермических, упругих модулей. Затем, для оценки величин  $K$  и  $m$ , эти модули преобразовывались в адиабатические постоянные. Оценка авторами коэффициента Пуассона  $s$  (при  $T = 5700 \text{ К}$ ) показала хорошее совпадение с величиной этого параметра, принятой для вещества внутреннего ядра.

В третьей строке Таблицы 3.3 приведены оцененные нами модули упругости вещества внутреннего ядра. Здесь принято, что скорость Р-волн, равная 11.2 км/с (рис. 3-10) соответствует:  $V_P'' = (C_{11}/r)^{1/2}$ . Учитывая анизотропию внутреннего ядра, состоящую в том, что скорость Р-волн, проходящих вдоль оси вращения (обозначим их  $V_P'$ ) примерно на 1 – 2 % больше, чем скорость волн, проходящих в экваториальной плоскости ( $V_P''$ ), примем:  $V_P' = 11.3 \text{ км/с}$ . Скорость сдвиговых S-волн, проходящих через внутреннее ядро в экваториальной плоскости, равна  $V_S'' = 3.65 \text{ км/с}$  (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Положим, что величина коэффициента Пуассона ( $\sigma$ ) во внутреннем ядре анизотропией не обладает, тогда, полагая, что  $s = 0.44$ , величина скорости  $V_S' = 3.7 \text{ км/с}$ . Принимая

плотность внутреннего ядра  $r \approx 13 \text{ г/см}^3$ , получаем величины модулей упругости внутреннего ядра, приведенные на третьей строчке Таблицы 3.3. В этой строке пропущено значение модуля  $C_{13}$ . Оценить его величину можно было бы по формуле (Steine-Neumann et al., 1999):

$$1/b = K = [(C_{33} (C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2) / C_S], \quad (3.18)$$

где  $C_S = C_{11} + C_{12} + 2C_{33} - 4C_{13}$ . Однако определение нами величины модуля  $K$  по этой формуле (в качестве её проверки), дает величину  $K$  для данных (Mao et al., 1998 ):  $K = 690$ , вместо 1085, и для данных (Steine-Neumann et al., 2001):  $K = 900$ , вместо 1425. По-видимому, этой формулой пользоваться не стоит. Тем не менее, если, к примеру, знать точные величины всех упругих модулей, можно было бы, в принципе, определить отношение  $c/a$  (Steine-Neumann et al., 1999) гексагональной решетки внутреннего ядра. Зная величины модулей упругости, можно сравнить параметры анизотропии для всех трех случаев, представленных в Таблице 3.3.

Параметр анизотропии волн сжатия (Steine-Neumann et al., 1999)  $\Delta_P = C_{33} / C_{11}$ : в экспериментах (Mao et al., 1998)  $\Delta_P = 1.06$ ; при расчетах (Steine-Neumann et al., 2001 )  $\Delta_P = 0.69$ ; во внутреннем ядре, как следует из измерений скоростей Р-волн,  $\Delta_P = 1.02$ . Аналогичный параметр для сдвиговых волн -  $\Delta_S = C_{44}/C_{66}$ . В первом случае  $\Delta_S = 0.94$ , во втором -  $\Delta_S = 2.3$  и в третьем (во внутреннем ядре) -  $\Delta_S = 0.87$ .

Анализируя данные по величинам модулей упругости приведенным в Таблице 3.3, можно уверенно утверждать, что: 1) измеренные модули упругости для гексагонального железа при давлении до 211 ГПа, модули оцененные теоретически для того же железа при температуре 6000 К и упругие модули, оцененные по скоростям Р- и S-волн во внутреннем ядре, не совпадают; 2) во всех рассмотренных случаях не совпадают и параметры анизотропии модулей упругости; 3) по-видимому, совпадение коэффициентов Пуассона во втором и третьем, случаях является следствием того, что в расчетах (Steine-Neumann et al., 2001) железо находилось почти в расплавленном состоянии, а, как известно, коэффициент Пуассона при плавлении:  $\nu \rightarrow 0.5$ . Поэтому, подбирая соответствующую температуру твердого тела, всегда можно получить желаемую величину коэффициента Пуассона.

Известно, что скорость Р-волн во внутреннем ядре практически вдоль радиуса не меняется, оставаясь равной 11.2 км/с при изменении величины давления от 320 до 360 ГПа. С другой стороны, известно, что скорость Р-волн в железе, в этом диапазоне давлений, - измерена (Mao et al., 1998). Здесь же показано, что скорость  $V_P$ , возрастает на  $\Delta V_P \approx 1 \text{ км/с}$  при изменении давления от 320 до 360 ГПа. Если бы внутреннее ядро Земли действительно состояло из кристаллического железа, то скорость  $V_P$ , по мере продвижения от границы ядра к центру Земли, должна возрасти до величины  $\approx 12.2 \text{ км/с}$ . Этот факт так же ставит под сомнение тезис относительно наличия кристаллического железа во внутреннем ядре.

Анализ данных, приведенных в Таблице 3, дает основание считать, что внутреннее ядро Земли не может состоять из кристаллического h.c.p. железа. Эти данные показывают, что внутреннее ядро твердое, обладает анизотропией упругости и, возможно, гексагональной структурой. Для того чтобы ответить на важный вопрос: как устроено ядро Земли, следует рассматривать его как структуру, состоящую из гомогенного вещества, находящегося в состоянии двух фаз: жидкого – внешнего и твердого – внутреннего. Надо заметить, что это общепринятая точка зрения. Так же общепринятым считается, что твердая фаза образуется путем кристаллизации из расплава однородного вещества в его центральной части. Рассмотрим этот процесс подробнее. Будем придерживаться канвы рассуждений, высказанных Лангером (Langer, 1980). Однако прежде сошлемся на то, что идея однородного вещества ядра Земли была подтверждена сравнительно недавним определением величины скорости сейсмических волн, проходящих через внутреннее ядро как сдвиговые. Речь идет об измерении скорости РКЖР-волны (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Как известно, величина этой скорости

была оценена теоретически, исходя из учета уравнения Адамса и Вильямсона, при анализе факта возрастания скорости Р-волн на границе внутреннего ядра. Оцененная таким образом величина скорости S-волн 3.5 км/с во внутреннем ядре практически совпадает с измеренной в (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000). Есть все основания считать, что вещество ядра Земли однородно по химическому составу и находится в различных фазах, как, например, лед и вода.

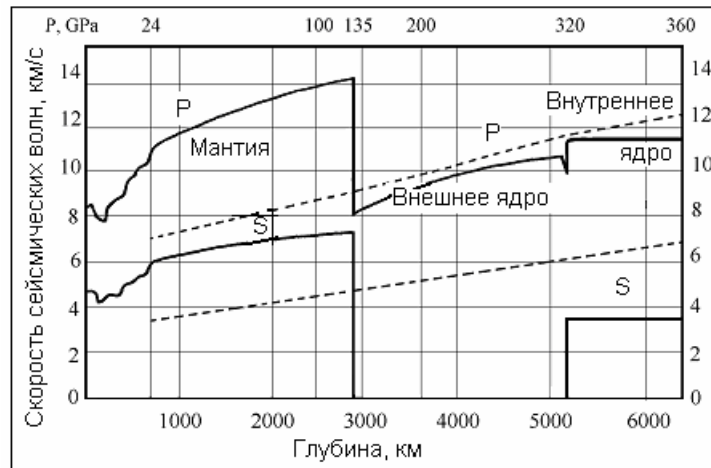


Рис. 3-10. Распределение скоростей сейсмических Р- и S-волн: по глубине Земли (Джеффрис, 1960) – сплошные линии, в железе, от давления при статическом сжатии (Мао et al., 1998) – прерывистые линии.

В общепринятой модели Земли, температура вещества внутреннего ядра выше температуры внешнего. Насколько подобная ситуация физически однозначна, и какие могут быть следствия из такого утверждения? Рассмотрим подобную задачу. Возьмем некое тело, состоящее из однородного вещества, находящегося в состоянии двух фаз: в центре тела фаза II, при температуре  $T^II$ . Фаза II окружена веществом, в состоянии фазы I, при температуре  $T^I$ , причем,  $T^II > T^I$ . Для упрощения задачи примем, что тело находится в равновесии с окружающей средой и здесь теплообмена не происходит, в то же время рассматриваемая нами двухфазная система диссипативна, существует тепловой поток  $dQ$  от вещества в состоянии фазы II к веществу в состоянии фазы I. При выполнении этих условий, в такой системе продуцируется энтропия:  $dS = dQ(1/T^I - 1/T^II)$ . Здесь  $dQ > 0$  - количество тепла полученного фазой I от фазы II. Так как  $dS$  величина положительная (энтропия возрастает), а  $(1/T^I - 1/T^II) > 0$ , то:

$$dQ = c_V dT + L_T dV - U_{TV} dx$$

по условию, тоже должна быть величиной положительной. Здесь:  $c_V$  – теплоемкость при постоянном объеме,  $L_T$  – скрытая теплота изменения объема,  $U_{TV}$  – теплота фазового перехода (положительна при экзотермической реакции),  $x$  - степень полноты реакции (Пригожин, 2001). Для стационарных условий, когда  $dT = dV = 0$ :  $dQ \sim -U_{TV} dx$  и, следовательно, для выполнения  $dQ > 0$ , необходимо чтобы теплота фазового перехода должна быть отрицательной величиной. Если принять, что фаза II – вещество в твердом состоянии, в I – жидкость (расплав), то условие  $dS > 0$  выполняется только в том случае, если происходит плавление, и оно не выполняется, если происходит кристаллизация.

Задача, связанная с затвердеванием чистой субстанции из ее расплава, например, замораживание льда в образце чистой воды, (в математической постановке – задача Стефана) подробно рассмотрена Лангером (Langer, 1980). В случае чистого вещества, процесс затвердевания (кристаллизации) управляется тепловым потоком. Скорость затвердевания в любой точке на поверхности раздела “жидкость – твердое”, определяется

тем, как быстро скрытая теплота плавления выделяется (или поглощается) в точке, где проводится выборка. Лангер рассматривает две возможных в эксперименте схемы, причем в обоих случаях чистая жидкость содержится в камере, в которой её стенки поддерживаются при заданной температуре, меньшей, чем температура плавления. В случае наиболее близком к рассматриваемой нами ситуации, затвердевание происходит в центре камеры. Жидкость первоначально переохлаждена и её температура ниже температуры плавления, причем, затвердевания, как и следует из предыдущего, не происходит. Этот процесс начинается только в том случае, если в центр камеры вводится специальная затравка - ядро кристаллизации. Скрытая теплота фазового перехода должна быть отведена через жидкость для обеспечения роста кристалла путем конвективной транспортировки. Ситуация с началом кристаллизации из центра камеры нестабильна, поверхность раздела фаз (фронт кристаллизации) разбивается на дендриты, которые вырастают относительно быстро из центральной части твердого тела. Например, аналогичная ситуация имеет место при росте снежинок.

Исследования, выполненные Лангером, применительно к нашей ситуации, позволяют сделать важный вывод о том, что кристаллизация вещества внутреннего ядра в центре его расплава, возможна только в том случае, если его температура ниже температуры плавления, а начало кристаллизации инициировано специальной затравкой. Кроме этого, фронт кристаллизации неустойчив, а результат кристаллизации представляет собой типичную дендритную структуру. Расплав в такой структуре – это стекло, или переохлажденная жидкость, вязкость которой очень велика. Причем, вязкость жидкости на линии плавления повышается с ростом температуры (Скрипов, Файззулин, 2001). Так, например, вязкость воды при обычных условиях  $10^{-3}$  Па с возрастает до  $10^{12}$  Па с - в области стеклования (Скрипов, Файззулин, 2001). По всей видимости, вязкость железа внешнего ядра, при условии, что кривая распределения температуры будет идти по линии плавления и ниже, будет не меньше, чем у воды и составлять не менее  $10^{12}$  Па с.

Надо сказать, что мнения, по поводу величины вязкости вещества внешнего ядра, - крайне противоречивы. По мнению Бражкина и Ляпина (2000), вязкость вещества внешнего ядра составляет от  $10^2$  Па·с до  $10^{11}$  Па·с, по оценке Джеффриса -  $10^9$  Па·с (Джеффрис, 1960), по оценке Магницкого (1965) -  $10^{12}$  Па·с. Наиболее часто употребляемое значение, полученное по анализу астрономических данных, -  $10^8$  Па·с. Сравним эти цифры с величиной вязкости расплава Fe-FeS измеренной экспериментально.

Расплав Fe-FeS принято считать основным кандидатом в состав внешнего ядра (Terasaki et al., 2001). В этой связи величина вязкости расплава, определенная экспериментально при температуре и давлении, соответствующим давлению и температуре внешнего ядра, представляет собой одно из наиболее важных физических свойств. Особую роль величина вязкости играет при исследовании динамики конвекции во внешнем ядре. Авторы (Terasaki et al., 2001) измерили вязкость этого расплава в диапазоне температур 1233-1923 К и давлений 1.5 - 6.9 ГПа, которая изменялась, соответственно, от 0.008 до 0.036 Па·с, что не намного больше, чем вязкость воды при нормальных условиях. Значительное несовпадение данных по величине вязкости экспериментальных ( $10^{-2}$  Па·с), теоретических (до  $10^{13}$  Па·с) и полученных по анализу астрономических данных ( $10^8$  Па·с) можно считать ещё одним аргументом против идеи железного ядра.

Рассмотрим фазовые диаграммы вещества Земли и железа. Имеют ли они общность, или между ними такая же большая разность, как между данными по упругости и вязкости? Здесь встречается определенная трудность, состоящая в том, что в отличие от железа, Земля представляет собой сложную многокомпонентную систему, уравнение состояния которой не может быть простым и однозначным, следовательно, не может быть простой и фазовая диаграмма. Выход один – построить фазовую диаграмму железа и сравнить его с «реперными» точками, присущими Земле.

Приведем термодинамические параметры железа: температура плавления  $1539^\circ\text{C}$ , температура кипения  $2872^\circ\text{C}$ , удельная теплоемкость  $c_p = 641\text{ Дж/кг К}$ , теплота плавления  $U_{\text{п}} = 13.77\text{ кДж/моль} \approx 0.25\text{ кДж/г}$ , теплота испарения  $U_{\text{и}} = 350\text{ кДж/моль} \approx 6.25\text{ кДж/г}$ , критическая температура  $T_c = 9600\text{ К}$ , критическое давление  $p_k = 8.25 \cdot 10^8\text{ Па}$ , критическая плотность  $\rho_k = 2.03\text{ г/см}^3$ . Воспользуемся этими данными при построении фазовой диаграммы железа (см. рис. 3-11). Зависимость температуры плавления железа при высоких давлениях от 50 ГПа до 200 ГПа хорошо изучена экспериментально (кривая 1 на рис. 3-11), она приведена в обзоре (Boehler, 2000). Кривая 2 - «конденсация-испарение» железа может быть продолжена в область температур  $T > T_c$  (кривая 2-а) и давлений  $p > p_k$ , если воспользоваться подходом, развитым Зельдовичем и Райзером (1966), где предложено рассматривать вещество, находящееся при  $pT$  параметрах, превышающих критические, как смесь индивидуальных веществ, обладающих различной теплоемкостью  $c_v$ :  $c_v = 3 R_g$  (конденсированное состояние) и  $c_v = 3/2 R_g$  (газ), где  $R_g$  - газовая постоянная. Если температура вещества  $T > T_p$ , то оно находится в газообразном состоянии, если меньше ( $T < T_p$ ), то - в конденсированном. К примеру, для железа нормальной плотности,  $T_p \approx 20\ 000\text{ К}$ . При увеличении давления  $p$  и сжатии вещества, растет и температура:  $T_p \sim p/r$  ( $r$  - плотность). Предельное значение величины  $T_p$ , ( $T_p \sim U_w/R_g$ ) железа (Зельдович, Райзер, 1966) оказывается порядка  $70\ 000\text{ К}$ . Таким образом, можно продолжить верхнюю кривую состояния железа в области температур  $T_c < T < T_p$  и получить кривую равновесия фаз железа в области температур и давлений, принятых для центра Земли, где  $p \approx 360\text{ ГПа}$  (кривая 2 на рис. 3-11). Надо заметить, что линия плавления вещества мантии Земли ( $\text{MgO}$ ) примерно соответствует линии плавления железа, но шкала температур в этом случае выше на  $1000\text{ К}$ . Этим можно воспользоваться при построении кривых равновесия фаз вещества Земли. Принципиальных различий с кривой железа быть не должно.

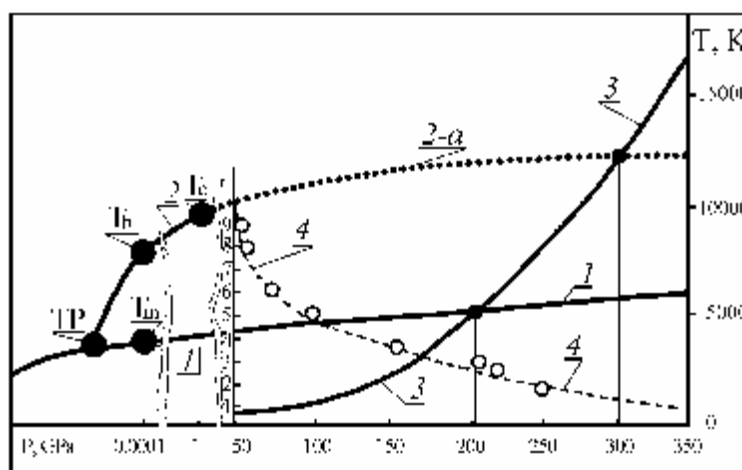


Рис. 3-11. Фазовая диаграмма железа: 1 - линия «плавление – кристаллизация» (Boehler, 2000); 2 - линия «испарение – конденсация», 2-а – продолжение 2 для  $T > T_c$ . Ударная адиабата 3 - вещества ядра, согласно модели горячей Земли, 4 - зависимости давления в ударной волне от радиуса шара ( $dp/dr$ ) в сферическом приближении (Зельдович и др., 1995). Температура:  $T_m$  - плавления,  $T_b$  - кипения,  $T_c$  - критическая, TP – тройная точка.

Оценка распределения температуры по глубине Земли представляет достаточно сложную задачу. Дело в том, что известны данные о величине и распределении теплового потока, теплопроводности пород земной коры и температурного градиента, измеренных на очень небольших глубинах. С большей или меньшей правдоподобностью оценивается температура на глубине  $h = 100\text{ км}$ . Известно также давление на этой глубине.

Дальнейшие рассуждения относительно хода температурной зависимости по глубине, как правило, находятся в тесной связи с используемой авторами моделью строения Земли и ее химическим составом. Принятый путь оценок  $dT/dh$  основан на представлении об адиабатическом характере распределения температуры в недрах Земли. Зная  $pT$ -условия на глубине 100 км и приняв определенный закон, например, адиабату, вычисляют распределение температуры по глубине. Для оценки  $dT/dh$  используется выражение адиабаты Пуассона:

$$(pV^\gamma = \text{const}, TV^{\gamma-1} = \text{const}, c_p/c_v = \gamma); (\mathcal{T}/\mathcal{P})_S = T/c_p (\mathcal{V}/\mathcal{T})_p, \quad (3.19)$$

которое преобразуется в:  $dT/dh$  заменой  $dp = -\rho g dh$ .

Земля диссипативная система, здесь происходит постоянный рост энтропии. По-видимому, адиабата Пуассона, не лучшее приближение к реальности. Для оценки характера поведения температуры в недрах Земли больше подходит аппроксимация температуры законом ударной адиабаты Гюгонио. Этот закон учитывает диссипативные свойства среды, и применим для систем, энтропия которых увеличивается. Ударная адиабата имеет существенное отличие от адиабаты Пуассона (реализуемой в идеальном газе с постоянной теплоемкостью, в недиссипативных процессах с постоянной энтропией).

Адиабата Гюгонио зависит от двух параметров, давления и объема в начальном состоянии. Уравнения ударной адиабаты (Зельдович, Райзер, 1966):

$$\begin{aligned} e_1(p_1 V_1) - e_0(p_0 V_0) &= 1/2 (p_1 + p_0) (V_0 - V_1), \\ w_1 - v_0 &= 1/2 (p_1 - p_0) (V_0 + V_1), \\ v &= (e + pV). \end{aligned}$$

Эти уравнения определяют связь между термодинамическими величинами по обе стороны разрыва - "скачка" характеристик среды. Надо заметить, что поверхность разрыва термодинамических характеристик системы (Земли, в нашем случае) часто называют неподвижной ударной волной. Этот факт еще раз подтверждает, что только адиабата Гюгонио может использоваться для оценки характера  $dT/dh$  Земли. Подставляя:

$$e = c_v T = pV/(\gamma - 1); v = c_p T = \gamma/(\gamma - 1) pV,$$

решаем уравнения относительно температуры  $T_1$ :

$$T_1/T_0 = p_1 V_1 / p_0 V_0.$$

На рис. 3-11 (кривая 3) изображена зависимость  $dT/dp$ , построенная по адиабате Гюгонио:

$$dT = -T(\Gamma/V)dV + 1/2c_v[(V_0 - V)dp + (p - p_0)dV],$$

здесь  $\Gamma$  - коэффициент Грюнайзена. Пересечение адиабаты Гюгонио, с кривыми, соответствующими кривым равновесия фаз железа "отбивают" границы: в первом случае "твердое-жидкость", во втором - "жидкость-газ".

Применение ударной адиабаты Гюгонио для оценки распределения  $dT/dh$  предполагает, что Земля образовалась путем очень быстрого процесса самогравитации вещества Земли, при котором основную роль играли ударные процессы сжатия, сопровождающиеся возникновением ударных волн и фазовых границ. Земля при таком процессе образования оказывается достаточно горячей.

В задаче исследования степени соответствия свойств железа и вещества ядра Земли широко используется величина коэффициента Пуассона  $s$ :

$$s = 1/2 (3K - 2m) / (3K + m) = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2). \quad (3.20)$$

Причем, если напряжения  $s_{xx}$  и  $s_{yy}$  - однозначно связаны с сжимающей силой  $p$ :

$s_{xx} = s_{yy} = p s / (1 - s)$ , то коэффициент Пуассона не должен зависеть от величины давления.

В работе (Кулиев, 2000), посвященной определению коэффициента Пуассона в напряженных средах, утверждается, что величина коэффициента Пуассона должна быть постоянной для рассматриваемого материала и независимой от величины действующих внешних нагрузок. С другой стороны, Falzone и Stacey (1980) полагали, что давление



оказывает весьма заметное влияние на коэффициент Пуассона, причем, настолько, что железо может иметь его равным 0.445. Экспериментальное исследование упругости и реологии железа вплоть до давления в 220 ГПа путем сжатия образца в алмазной наковальне (Мао et al., 1998) показало, что скорости  $P$  и  $S$  волн равномерно увеличиваются с ростом давления таким образом, что коэффициент Пуассона остается постоянным вплоть до 200 ГПа и, по аппроксимации авторов (Мао et al., 1998), должен оставаться таким вплоть до давления, характерного для центра Земли (линия 2 на рис. 3-12). Эта линия практически совпадает с линией 1, показывающей ход коэффициента Пуассона в мантии Земли, и в целом по Земле, где величина  $\nu$  равна 0.5 во внешнем ядре, и  $\nu = 0.45$  - во внутреннем ядре. Величина коэффициента Пуассона ( $\nu = 0.45$  - во внутреннем ядре) была оценена ранее на основании использования уравнения Адамса и Вильямсона:

Авторы (Okal, Cansi, 1998; Deuss et al., 2000) попытались объяснить слишком высокое значение коэффициента Пуассона ( $\nu = 0.45$ ) нормальной кристаллической структурой внутреннего ядра без привлечения идеи частичного плавления железа из-за громадного давления в центре Земли, что находится в противоречии с экспериментом (Мао et al., 1998).

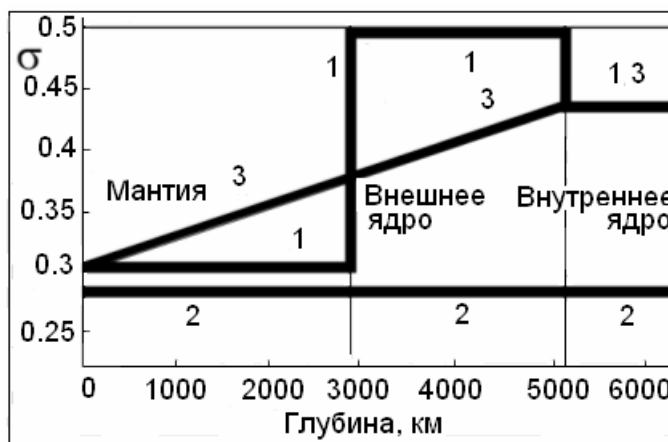


Рис. 3-12. Коэффициент Пуассона  $\sigma$ : 1 - Земли, 2 - железа (Мао et al., 1998), 3 - железа по данным (Brawn, McQueen, 1986; Steine-Neumann et al., 2001).

Оценки величины коэффициента Пуассона были выполнены в экспериментах по ударному сжатию железа (Brawn, McQueen, 1986). Оказалось, что эти данные находятся в противоречии как с данными коэффициента Пуассона Земли, так и статически сжатого железа (см. кривая 3 на рис 3-12). Изломанная линия 3 получена путем пересчета данных (Brawn, McQueen, 1986), приведенных авторами для зависимости коэффициента Пуассона от плотности железа, а так же с учетом данных (Steine-Neumann et al., 2001).

Анализ известных данных экспериментов и расчетов характеристик вещества внутреннего ядра и кристаллического гексагонально упакованного железа однозначно показывает, что внутреннее ядро не может состоять из кристаллического железа. Однако, с другой стороны, утверждать, что ядро Земли не может быть железным (с примесями, или без них) так же нет достаточных оснований. Кроме этого, необходимо учесть неоспоримый факт, что внутреннее ядро твердое и оно, возможно, имеет гексагональную упаковку. Более того, если согласиться с точкой зрения на то, каким образом образовалась Земля и допустить, что она сформировалась за счет механизма быстрой самогравитации, то, похоже, вообще в этой ситуации нельзя найти приемлемое решение. Следует учесть, что согласно модели горячей Земли вещество внутреннего ядра находится в газообразном состоянии, вернее, представляет собой плотную слабо ионизованную плазму. Как это ни кажется парадоксальным, именно в том, что внутреннее ядро Земли представляет собой плазму, находится объяснение всем приведенным нами парадоксам. Остается главный

вопрос: как же так, твердое ядро состоит из плотной плазмы? Однако в физике плазмы это не является невозможным. Известно, что плотная астрофизическая плазма (Van Horn, 1991) обладает квантовыми свойствами, представляет собой Вигнеровский кристалл (Wigner, 1934), который, как известно, сдвиговые волны пропускает. Более того, в последнее время в физике плазмы обнаружено и интенсивно изучается явление, названное пылевой кристаллической плазмой. Экспериментально обнаружено, что такое вещество обладает гексагональной кристаллической структурой, в таком веществе распространяется «пылевой» звук (Maddox, 1994; Thomas et al., 1994; Thomas, Morfill, 1996). Как было обнаружено совсем недавно, в пылевой кристаллической плазме распространяется сдвиговая волна. Этот факт, по-видимому, можно считать подтверждением правомерности нашей модели.

*Эксперименты со сжатием железа сходящейся сферической ударной волной.* Рассмотрим результаты экспериментов по нагружению образца стали сферической ударной волной (Зельдович и др., 1995). Стальной шар диаметром 40 мм был окружен слоем взрывчатого вещества толщиной 20 мм. При подрыве взрывчатого вещества на шар воздействует сферическая ударная волна. По мнению авторов, ударная волна вызывает испарение центральной части шара диаметром около 5 мм, плавление в узкой области толщиной около 1 мм, а так же вязкое течение и наклеп во внешней части шара. На фотографии центральной части разрезанного образца (рис. 3-13) можно выделить три области. Центральная, почти сферическая полость, в которой вещество в момент эксперимента находилось в газообразном состоянии, представляет собой гомогенную структуру. Вокруг неё находится полость, содержащая вещество, прошедшее стадию плавления, последующей кристаллизации и образования дендритной структуры. Внешняя полость шара так же как его центральная часть, гомогенны, но в отличие от центральной части, она вся пронизана радиальными «следами», напоминающими прорывы жидкого вещества в направлении в поверхности шара. Вся картина, изображенная на срезе стального образца, весьма напоминает внутреннее устройство Земли, если, к примеру, обратиться к «японской» модели глобальной геодинамики (Лобковский, Котелкин, 2000), с центральным внутренним ядром, внешним – жидким и мантией, пронизанной следами от всплывающих плюмов.

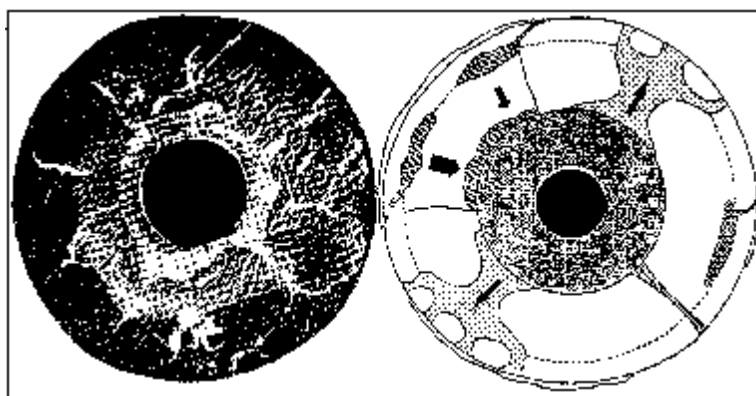


Рис. 3-13. Фотография разреза центральной части железного шара после нагружения ударной волной (Зельдович и др., 1995) - слева; справа - схема внутреннего устройства и глобальной геодинамики Земли (Лобковский, Котелкин, 2000).

Авторы измерили распределение микротвердости  $H_m$  стального шара от расстояния  $r$  и давления  $p$  до центра (рис. 3-14-а). Твердость стали до нагружения, равна  $220 \text{ кг/мм}^2$ . После нагружения шара ударной волной, она увеличилась до  $300 - 400 \text{ кг/мм}^2$ . Измерений скорости звука ни в момент нагружения шара, ни после релаксации его вещества, не

проводилось. Хотя, казалось бы, знание распределения скоростей звука по радиусу шара могло бы либо подтвердить, либо опровергнуть аналогию между железным шаром и Землей.

Для того чтобы перейти от известных данных распределения микротвердости к картине распределения скоростей акустических волн по радиусу шара можно построить (возможно, не совсем корректно) зависимость:  $V \sim (H_{\mu})^{1/2}$  (рис. 3-14-b). Ниже, для сравнения, приведено распределение скоростей Р волн в нижней мантии и ядре Земли в трактовке Джеффриса (1960) (рис. 3-14-с). Рисунки 14-b и 14-с имеют общность, что может служить формальным подтверждением правомерности аналогии между стальным шаром, после нагружения его ударной волной, и внутренним строением Земли.

Совпадение рисунков 3-14-b и 3-14-с, по-видимому, не случайно. Наличие довольно резких изменений величины  $H_m$  вдоль радиуса шара говорит об изменении фазового состояния вещества в момент нагружения. По-видимому, похожая картина происходит и на Земле, где резкие изменения скоростей сейсмических волн показывают изменение состояния фаз его вещества. Легко показать, что энергии взрывчатого вещества, используемого в обсуждаемом нами эксперименте, недостаточно для того, чтобы полностью испарить все вещество стального шара (массой  $M_{ш}$ ). Для этого необходима масса взрывчатого вещества  $M_{ев} \approx 2 M_{ш} U_u / E_{ев}$ , где:  $E_{ев}$  – эффективность взрывчатого вещества ( $E_{ев} \approx 4$  кДж/г), а коэффициент 2 следует из критерия полного испарения, применение которого было обосновано в (Зельдович, Райзер, 1966). По-видимому, этот коэффициент должен быть ещё больше, так как мы не учитываем того, какая часть энергии взрывчатого вещества будет использоваться на создание ударной волны. Тем не менее, величина  $M_{ев}$  оказывается порядка одного кг, в то время как в эксперименте применялось около 300 г.

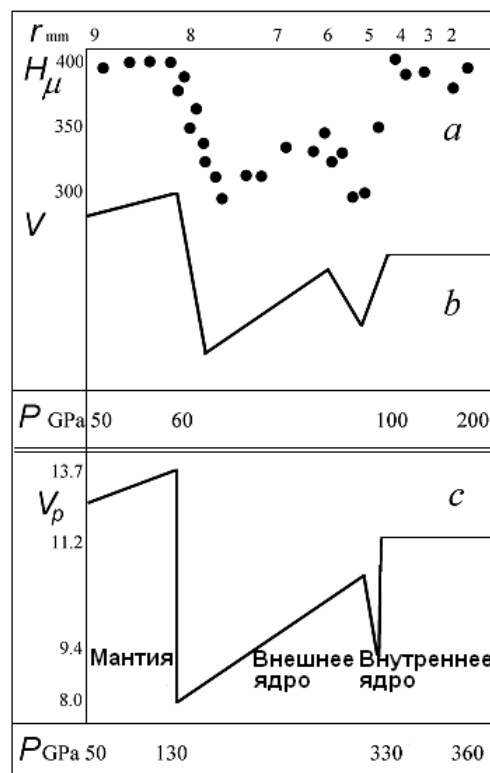


Рис. 3-14. **a** - зависимость микротвердости  $H_m$  стального шара от радиуса  $r$  и давления  $p$  в сферической сходящейся ударной волне (по данным Зельдович и др, 1995); **b** - зависимость скорости акустических волн (в отн. ед.):  $v \sim (H_{\mu})^{1/2}$  от величины давления в ударной волне; **c** - скорость Р волн от давления в нижней мантии и ядре Земли (по Джеффрису, 1960).

*Обсуждение экспериментальных данных.* Предположим, что Земля состоит исключительно из железа. Сколько энергии ВВ потребуется для того, чтобы полностью испарить вещество Земли? Подставляем вместо  $M_{\text{ж}}$  массу Земли ( $6 \cdot 10^{27}$  г) и получаем величину необходимой энергии, равной примерно  $10^{39}$  эрг. Для сравнения, гравитационная энергия Земли:  $E = 3/5 \times GM^2/R = 2 \cdot 10^{39}$  эрг, здесь:  $G$  – гравитационная постоянная,  $R$  – радиус Земли. Использование коэффициента  $3/5$  вместо  $1/2$ , следующего из теоремы вириала, обосновано Магницким (1965). Таким образом, гравитационной энергии Земли вполне достаточно для того, чтобы полностью испарить её вещество. Естественно, это может произойти при условии, что процесс образования Земли шел настолько быстро, что энергия, выделяемая при сжатии её вещества, не успевала излучиться в космос. Условием быстрого сжатия вещества Земли может быть, например, превышение скорости сжатия  $(GM/R)^{1/2}$  над скоростью звука  $(gRT/m)^{1/2}$ , где  $m$  – атомный вес вещества Земли (критерий Джинса). При выполнении такого условия процесс образования Земли должен соответствовать ударному сжатию её вещества, а распределение температуры по радиусу Земли – соответствовать адиабате Гюгонио.

Вернемся к рис. 3-11, где приведено распределение температуры Земли (кривая 3) от давления, рассчитанное по адиабате Гюгонио, а так же кривые плавления (кривая 1) и испарения (кривая 2) железа. Пересечение кривой Гюгонио с линиями уравнения состояния железа, маркируют начало плавления железа на границе внешнего ядра и мантии и испарения его – на границе внутреннего ядра. Результаты ударных экспериментов (Brown, McQueen, 1986) соответствуют температурам железа, большим, чем температура плавления при заданном давлении (Boehler, 2000). Многие из авторов этих экспериментов приходят к выводу относительно того, что железо в них находится в каком то необычном (*b*) состоянии. Авторы не делали попытки оценить температуру железа в этом эксперименте, по их мнению, часть вещества шара испарилась, а другая – расплавилась, остальная оставалась твердой. Это дает основание считать, что интервал температур в этом эксперименте был достаточно велик и мог пересекать линии «твердое - жидкость» и «жидкость-пар». Возможно, и в других ударных экспериментах интервал значений температур был заметно выше, чем авторы приводят в своих работах. При таком подходе, особое состояние железа, которое многими авторами называется как *b*-Fe, возможно, представляет собой двухфазную (жидкость + пар) среду, или даже трехфазную (твердое + жидкость + пар) среду. Рассматриваемый нами эксперимент с нагружением стального шара, это, вероятно, именно такой случай.

Все ударные эксперименты имели целью перевести железо в состояние расплава. Этой же цели преследовали эксперименты по лазерному нагреву образцов (Boehler, 2000), находящихся в алмазной наковальне при очень высоких давлениях. Нагревая эти образцы, экспериментаторы стремились воспроизвести явление плавления железа при давлении, равном давлению на границе ядра с мантией. В этих экспериментах негласно предполагалась идея, что Земля состоит только из железа.

Физика явлений, происходящих при  $pT$  параметрах вещества и, в частности, железа, при которых  $p$  примерно равно давлению в центре Земли, а температура  $T$  составляет несколько эВ (10000 – 30000 К) очень сложна, т.к. здесь могут сосуществовать кристаллическая и жидкая фазы вещества, а так же вещество в состоянии неидеальной сжатой плазмы или слабо ионизированного газа (Зельдович, Райзер, 1966). При дальнейшем увеличении давления и температуры, железо будет существовать – только в жидкой и плазменной фазе (Альтшулер и др. 1999). По всей видимости, результаты ударных экспериментов с железом в области давлений 100 – 400 ГПа (Brown, McQueen, 1986) по оценке величины коэффициента Пуассона, показывают, что вещество не было полностью расплавлено. Вполне возможно, что в этих экспериментах часть вещества находилась так же и в состоянии пара. Об этом свидетельствуют следы напыления вещества ударника и мишени на элементах конструкции после проведения эксперимента.

Надо заметить, что оценить температуру вещества в ударных экспериментах не всегда можно в достаточной степени корректно. Само понятие температуры, когда вещество находится в метастабильном состоянии не вполне оправдано. Если учесть, что время ударного эксперимента составляет примерно  $10^{-6}$  сек, толщина образца  $x = 0.1$  см, а коэффициент температуропроводности  $\zeta = 10^{-2}$  (см<sup>2</sup>/с), то время выравнивания температуры  $t = x^2 / \zeta$  порядка секунды, что значительно больше времени эксперимента. Это означает, что температура не может быть равновесной по всей толщине образца. Если сделать аналогичные оценки для Земли, то оказывается, что время релаксации её вещества  $t$  может достигать  $10^{10}$  -  $10^{12}$  лет, что значительно превышает возраст Земли. Эта оценка показывает, что вещество Земли полностью не релаксировало.

*Упругие свойства кристаллической пылевой плазмы.* В последние годы, начиная с выхода работы (Thomas et al., 1994) внимание многих исследователей привлекает экспериментально обнаруженное необычное состояние вещества, названное пылевой кристаллической плазмой, или плазма - кристаллом. Кристаллическая плазма образуется при искусственном или естественном введении в область газового разряда пылевых частиц, которые обычно приобретают отрицательный заряд ( $Z$ ) равный нескольким сотням зарядов электрона, и, выстраиваясь на равных дистанциях друг от друга, - создают гексагональную кристаллическую структуру. Размер пылинки варьируется от долей микрона до десяти и более микрон, а расстояние между ними составляет несколько сотен микрон (Melzer et al., 1994).

Заметим, что пылевая кристаллическая плазма (ПКП) не является каким-то особым экзотическим состоянием вещества. Считается, например, что она может присутствовать в лабораторных установках, предназначенных для исследования реакции термоядерного синтеза. Здесь ПКП может образоваться в результате воздействия высокотемпературной плазмы на стенки термоядерных устройств (Winter, 2000) и, возможно, оказывать влияние на их работу. Принято считать, что ПКП присутствует в космосе и, к примеру, является одним из главных компонентов пылевых туманностей и планетарных колец (Цытович, 1997). Обнаружено присутствие пылевых частиц в непосредственной близости от Солнца, что может говорить об их относительной устойчивости (Гуляев, Щеглов, 2001). Пылевые частицы и ПКП возникают и оказывают влияние в ряде технологических операций, например, в операции травления - при производстве устройств микроэлектроники (Цытович, 1997) и т.п. Изучению свойств ПКП посвящено большое количество работ (Lampe et al., 2000; Игнатов, 1998, 2001; Merlini et al., 1998; Chu, Lin, 1994; Thomas, Morfill, 1996; Melzer, et al., 1994; Stenflo, Shukla, 2000; Shukla, 2000; Stenflo et al., 2000). Проводятся специальные конференции, вышли в свет несколько монографий (см. ссылки в (Stenflo, Shukla, 2000; Shukla, 2000; Stenflo et al., 2000)) и обстоятельных обзоров (Цытович, 1997). Тем не менее, среди известных публикаций нет ни одной работы, в которой бы обсуждался вопрос, насколько ПКП действительно «твердая» и подобна «кристаллу». Этот вопрос можно сформулировать иначе - обладает ли вещество в таком состоянии свойствами, присущими упругим твердым телам? Если бы удалось однозначно ответить на этот вопрос, то, возможно, это бы открыло путь для объяснения ряда свойств вещества, находящегося в ядрах звезд, коричневых карликов и планет. Очевидно, что решение этой проблемы служило бы подтверждением правомерности модели горячей Земли.

Многочисленные попытки создать теорию, или хотя бы непротиворечивую модель ПКП, пока не привели к положительному результату. Основной ключевой вопрос состоит в том, что не находится правдоподобной силы, которая приводила бы к взаимному притяжению частиц пыли, обладающих зарядом одной полярности. Причем, эта сила должна быть не меньше кулоновской силы расталкивания  $f_e = Ze^2/R^2$ . Здесь  $e$  – заряд электрона,  $R$  – расстояние между пылинками. Пылинки находятся в плазме, которая,

экранируя действие кулоновских сил, уменьшает их в  $k$ - раз:  $k = \exp(-R/l)$ , где  $l = (kT/4\pi ne^2)^{1/2}$  - дебаевский радиус экранирования, а  $n$  – концентрация плазмы. Физики, в «противовес» силам кулоновского расталкивания, привлекают «теневые» (shadowing) силы, якобы возникающие при экранировании пылинками потоков плазмы (Lampe et al., 2000; Игнатов, 1998), аналогично тому, как это было предсказано 200 лет тому назад Лесажем, который пытался создать теорию гравитации на эффекте экранирования гравитирующими телами потока эфира. Идея, согласно которой притяжение между пылевыми частицами возникает за счет экранирования ими потоков плазмы возможно правильная, однако пока она не имеет экспериментального подтверждения. Более того, это объяснение годится только в случае лабораторных экспериментов. В природе экранирующие потоки плазмы находятся далеко не во всех случаях. Например, таким случаем можно считать и внутреннее ядро Земли.

Обратимся к сравнительно малоизвестному эксперименту, в котором исследовались силы притяжения между макротелами. Речь пойдет об эффекте притяжения между телами, который предсказал Казимир ещё в 1948 г. Эффект, получивший его имя, был многократно экспериментально реализован в различных научных центрах (Лифшиц, 1954; Лифшиц, 1955; Мостепаненко, Трунов, 1990; Дерягин, 1985; Lamogaux 1997; и др.). Обнаруженная экспериментально сила стала называться силой Казимира. Суть эффекта Казимира состоит в том, что на единицу площади двух проводящих металлических (в пределе идеальной проводимости) плоскопараллельных пластин, расположенных в вакууме на расстоянии  $R$  друг от друга должна действовать сила притяжения  $f_C = -(\pi^2/240)(hc/R^2)$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света. Эта сила уникальна, т.к. она не зависит ни от масс, ни от зарядов, ни от каких-либо иных констант связи.

Первым теорию эффекта, как теорию молекулярных сил притяжения между конденсированными телами с учетом влияния температуры на эти силы, разработал Лифшиц (1954, 1955) ещё до того, как эффект получил свое название. Затем причина появления силы Казимира стала интерпретироваться как изменение спектра нулевых колебаний электромагнитного вакуума из-за обращения в нуль тангенциальной составляющей электромагнитного поля на пластинах. К настоящему времени исследована лишь та разновидность сил Казимира, которая связана с нулевыми колебаниями электромагнитного поля, и по существу совпадает с запаздывающими силами Ван-дер-Ваальса (Мостепаненко, Трунов, 1990).

На начальной стадии экспериментов было обнаружено, как это и предсказывал Казимир, притяжение между металлическими пластинами в вакууме. В последствии экспериментаторы стали испытывать притяжение между различными объектами. В частности, этот эффект экспериментально наблюдался не только в глубоком вакууме, и не при очень низкой температуре, и не между металлами, а и в других возможных ситуациях, в частности, между диэлектриками различной формы (Дерягин и др., 1985). Экспериментально исследованы далеко не все возможные ситуации и способы измерения силы Казимира. Эти исследования продолжаются в различных научных центрах (Lamogaux, 1997; Mohideen, Roy, 1998).

В нашей модели, при оценке величины упругости ПКП, в качестве потенциала, приводящего к притяжению пылинок друг к другу, т.е. потенциала, противодействующего кулоновскому расталкиванию, будем пользоваться силой Казимира  $f_C$ . Зная потенциал взаимодействия пылинок, можно оценить сжимаемость системы пылинок в плазме и, таким образом, оценить величину упругих свойств ПКП. Для оценки упругости ПКП воспользуемся подходом (Михайлов и др., 1964), развитым для вычисления скорости звука в ионных кристаллах. Энергия «кристаллической решетки» ПКП:  $U = N\phi$ , где  $N$  – число пар пылевых частиц, а  $\phi$  – потенциал. Здесь стоит  $N$ , а не  $2N$ , поскольку при расчете полной энергии решетки кристалла  $U$ , считается каждая взаимодействующая пара только один раз.

Потенциал кристаллической решетки можно выразить:  $j = \sum j_{ij}$ , где  $j_{ij}$  - сумма потенциала сил кулоновского отталкивания и потенциала сил Казимира  $f_c$ , отвечающего за притяжение пылевых частиц:  $j_{ij} = f_c/R_{ij}^n - e^2/R_{ij}$ . Подставляя известные значения величин, потенциал ПКП:

$$j = \pi^2 hcS/240R^3 - [(Ze)^2/R] \exp(-R/I). \quad (3.21)$$

Выразим сжимаемость ПКП ( $1/b$ ) через вторую производную от энергии по объёму:

$$1/b = Vd^2U/dV^2 = V[dU/dR \cdot d^2R/dV^2 + d^2U/dR (dR/dV)^2]. \quad (3.22)$$

Учитывая то, что в большинстве экспериментальных исследований ПКП утверждается, что в плазме газового разряда возникает гексагональная кристаллическая структура, объем ячейки можно выразить:  $V \gg 3N R^3$ . В состоянии равновесия ПКП:  $dU/dR = 0$ . Учитывая, что  $(dR/dV)^2 = 1/81 N^2 R^4$ , и подставляя значение  $j$ , получаем:

$$U = N[\pi^2 hcS/240R^3 - [(Ze)^2/R] \exp(-R/I)],$$

и, отсюда:

$$d^2U/dR^2 = N [12\pi^2 hcS/240R^5 - [2(Ze)^2/R^3] \exp(-R/I)]. \quad (3.23)$$

Учитывая условие равновесия, выразим параметр  $\exp(-R/I)$ :

$$dU/dR = N[-3\pi^2 hcS/240R^4 + [(Ze)^2/R^2] \exp(-R/I)] = 0, \\ \exp(-R/I) = \pi^2 hcS/80R^2 (Ze)^2.$$

подставляя, получаем выражение второй производной от энергии по объёму

$$d^2U/dR^2 = N [\pi^2 hcS/40R^5],$$

тогда сжимаемость ПКП равна:

$$1/b \gg 10^{-3} \pi^2 hcS/R^6. \quad (3.24)$$

Оценим применимость полученной формулы (3.24). Легко показать, что условие  $f_c = f_e$  выполняется при:  $R \gg I \gg (S)^{1/2}$  и  $Z \rightarrow 1$ , что не всегда соответствует большинству современных экспериментов с пылевой плазмой, в которых наблюдается:  $R \gg I \gg (S)^{1/2}$  и  $Z \rightarrow \infty$ , но, тем не менее, как будет показано ниже, полученная формула сжимаемости может быть использована в случаях плотной плазмы.

Сравним полученную нами формулу сжимаемости пылевой плазмы, с аналогичной формулой сжимаемости ( $1/b$ ) металлов (Михайлов и др., 1964):  $1/b = A(Ze)^2/18 R^4$ , где  $A$  - постоянная Маделунга. Заменим в нашей формуле  $hc = e^2/a$ , здесь  $a$  - постоянная тонкой структуры, которая характеризует электромагнитное взаимодействие ( $a = 1/137$ ), и получим:  $1/b \gg \pi^2 (Ze)^2/10^3 aR^4$  (полагая  $S \gg R^2$ ), получаем качественное совпадение нашего результата с известной формулой сжимаемости металлов.

О величине модулей упругости можно судить по величине скоростей продольных и сдвиговых волн в упругой среде и анизотропии этих скоростей. Распространение волн в кристаллической среде описывается законом Гука, согласно которому выполняется соотношение между создаваемым напряжением  $T$  и возникшими в среде деформациями  $S$ :  $T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl}$ , где  $C_{ijkl} = (\partial T/\partial S)$  - тензор модулей упругости. Тензор модулей упругости гексагональной кристаллической структуры:

$$\begin{array}{cccccc} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{array}$$

Скорости продольных  $V_P$  и сдвиговых  $V_S$  волн гексагональной структуры равны соответственно: для волн, распространяющихся вдоль оси  $Z$ :  $V'_P = (C_{33}/r)^{1/2}$ ,  $V'_S = (C_{44}/r)^{1/2}$  и распространяющихся поперек оси  $Z$ :  $V''_P = (C_{11}/r)^{1/2}$ ,  $V''_S = ((C_{11} - C_{12})/2r)^{1/2}$ .

Для гексагональной структуры модуль объемного сжатия  $1/b$  ( $K$ ) можно выразить через модули упругости (Steine-Neumann et al., 1999):

$$1/b = K = [(C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2)/C_S], \text{ где } C_S = C_{11} + C_{12} + 2C_{33} - 4C_{13}.$$

Эти формулы позволяют вычислить модули упругости гексагональной кристаллической структуры, к которой относят и ПКП.

В эксперименте (Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002) измерены скорости  $V'_P$  и  $V'_S$ . Следовательно, мы могли бы вычислить только модули  $C_{33}$  и  $C_{44}$ . Однако, учитывая то, что мы рассматривали гексагональную решетку, а в эксперименте (Nosenko et al., 2002) – 2D решетка, эти оценки не совсем правомерны, тем не менее, несомненный интерес представляет сравнение порядка величины модуля сжатия  $K$  полученного из эксперимента и оцененного по формуле (3.24).

Сделаем оценку модуля упругости ПКП для типичного эксперимента с пылевой плазмой. При размере пылинки 0.01 мкм ( $S = 10^{-12}$  см<sup>2</sup>) и расстоянии между ними  $R = 10$  мкм, величина сжимаемости  $1/b \approx 10^{-12}$  дин/см<sup>2</sup>. Принимая плотность ПКП равной  $10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>, скорость звука в плазме оказывается порядка  $10^{-4}$  см/с. Много это или мало? В (Цитович, 1997) утверждается, что скорость пылевого звука обычно на много порядков меньше скорости обычного звука, однако - на сколько порядков эта скорость меньше скорости «пылевого звука» пока не оценено.

Эксперимент (Merlino et al., 1998) показывает, что в ПКП распространяются акустические (возможно, пылевые) волны, скорость которых около 10 см/с. Эта скорость больше, чем оцененная нами скорость на пять порядков. Однако сравнивать эти скорости не совсем правомерно т.к. в этом эксперименте размер частиц составлял 0.7 микрон, расстояние между ними  $\approx 50$  микрон, а газовый разряд помещен в продольное магнитное поле  $\approx 100$  Гаусс.

Есть основания считать, что результаты экспериментов с пылевой плазмой, полученные в (Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002) прямо свидетельствуют о наличии упругих свойств пылевой плазмы. Условия проведения экспериментов:  $R \approx I \approx 0.8$  мм;  $Q = Ze \approx 10000 e$ ; масса пылинки  $m = 5 \cdot 10^{-10}$  г; диаметр 8.7 микрон. Авторы измерили скорости волн сжатия и сдвига в пылевой лабораторной плазме:  $C_L = 24.2 \pm 1.7$  мм/с и  $C_T = 5.4 \pm 0.5$  мм/с. Переводя используемые авторами обозначения скоростей на общепринятый в сейсмологии язык:  $V_P = C_L$ ;  $V_S = C_T$ ,  $x = V_P/V_S = C_L/C_T$ , оценим величину коэффициента Пуассона:

$$\sigma = (V_P^2 - 2V_S^2)/2(V_P^2 - V_S^2) = (x^2 - 2)/(x^2 - 1).$$

Получаем:  $x = 4.48$  и  $\sigma = 0.47$ . Напомним, что  $\sigma = 0.28$  для железа, 0.5 – жидкости, 0.48 – резины, 0.45 – вещества внутреннего ядра.

Зная величины скоростей  $V_P$ ,  $V_S$  и плотности плазмы  $\rho$  ( $\rho \approx 5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>), можно оценить модуль сжатия  $1/b$ :  $K = 1/b \approx V_P^2 \times r \approx 5 \cdot 10^{-6}$  дин/см<sup>2</sup> и модуль сдвига:  $m \approx V_S^2 \times r \approx 0.25 \cdot 10^{-6}$  дин/см<sup>2</sup>.

Для сравнения, оценим  $K$  по формуле (3.24), полагая:  $Z \approx 10000$ ,  $e \approx 4.8 \cdot 10^{-10}$  CGSE,  $(Ze)^2 \approx 2 \cdot 10^{-11}$ ,  $R = 0.08$  см. Величина  $K = 1/b \approx 10^{-6}$  дин/см<sup>2</sup>.

Как видно,  $K$  из эксперимента, и  $K$ , полученный по формуле (3.24), по порядку величины совпадают. Здесь предполагалось выполнение условия  $S \gg R^2$ . Эти расчеты позволяют оценить порядок величины  $K$  для вещества внутреннего ядра, или, точнее, полагая, что  $K = 1/b \approx 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>, оценить характерные размеры  $R$  элементарной кристаллической ячейки (аналога пылевой частицы). Предполагая, что формула (3.24) справедлива и в области мегабарных давлений, характерный размер  $R$  можно оценить приближенно таким образом:



$$K \gg 10^{-3} \pi^2 hc S / R^6, \text{ учитывая } S \gg R^2, \text{ получаем: } K \sim 1/R^4.$$

Полагая характерный размер «пылинки» кристаллической лабораторной плазмы  $R$  порядка 100 микрон, при увеличении  $K$  в  $10^{18}$  раз, характерный размер «пылинки» - элементарной кристаллической ячейки «кристаллического вещества» внутреннего ядра будет составлять примерно  $3 \text{ \AA}$ . (Очевидно, что это очень грубая оценка, определяющая только порядок величин. Тем не менее, она показывает принципиальную возможность существования «твердого, кристаллического» вещества, состоящего из слабо ионизованной плазмы, сжатой мегабарным давлением. Обычную плазму принято считать четвертым состоянием вещества. По-видимому, плотную, кристаллическую, пылевую плазму, возможно, следует выделить в особое, пятое состояние).

В ряде работ по кристаллической плазме авторы утверждают, что в плазме образуется кристалл Юкавы - Yukawa crystal (Hamaguchi, Farouki, 1994; Farouki, Hamaguchi, 1994; Ohta, Hamaguchi, 2000; Pramanik et al., 2002; Nosenko et al., 2002; Piel et al., 2002). В теории используется потенциал типа потенциала Юкавы:

$$j \sim 1/R \exp(-R/I_B), \quad (3.25)$$

где  $I_B$  - (как и в нашей работе) дебаевский радиус экранирования. В потенциале Юкавы  $I_B$  - это комптоновская длина волны промежуточного (виртуального) бозона. Для миллиметровой области действия, примерно соответствующей нашей модели, масса бозона с  $I_B \sim 1 \text{ мм}$ ,  $m_B \leq 10^{-4} \text{ эВ}/c^2$ . Если использование потенциала Юкавы правомерно в нашей модели, то это позволяет конкретизировать механизм взаимодействия между частицами типа Казимира путем обмена между пылинками массовыми бозонами. Сила Юкавы, так же как и сила Казимира, способна обеспечить притяжение частиц, расталкивающих под влиянием кулоновских сил.

Реализация экспериментов с пылевой кристаллической плазмой в области больших мегабарных давлений и плотностей, позволила бы по-новому взглянуть на существующие в настоящее время представления о физике плазмы, и о физике кристаллического состояния вещества. Осуществление таких экспериментов дало бы новый стимул в изучении физических свойств вероятных компонентов и состояния вещества ядра Земли, а также, возможно, в понимании природы шаровой молнии (Кузнецов, 2004).

Как отмечалось, формула (3.24) для оценки упругости пылевой плазмы применима при выполнении условия:  $R \gg l \gg (S)^{1/2}$  и  $Z \rightarrow 1$ . Это условие ближе всего соответствует соотношениям, характерным для шаровой молнии, где вместо пылинок рассматриваются капли воды, размер которых  $< 1 \text{ мкм}$ , а расстояние между каплями  $R \approx 5 \text{ мкм}$ . Величина не скомпенсированного электрического заряда капли ( $Z$ ) не известна, но она не должна быть очень большой. Для плазмы шаровой молнии можно применить нашу формулу, если величина  $Z$  порядка нескольких единиц. Если предположить, что поверхностное натяжение шаровой молнии ( $a_S$ ) обязано наличию силы Казимира, то можно оценить эту величину:  $a_S = fc/r$ ,  $r$  - радиус шаровой молнии. Подстановка известных констант, величин  $S$ ,  $R$ , и  $r = 5 \text{ см}$ , дает величину  $a_S \approx 10^{-5} \text{ дин}/\text{см}$  ( $a_S$  воды  $70 \text{ дин}/\text{см}$ ).

Условие:  $R \gg l \gg (S)^{1/2}$  и  $Z \rightarrow 1$  выполняется и для астрофизической плазмы (Van Horn, 1991), упругие свойства которой, вполне возможно, определяются силами Казимира. Если в астрофизической плазме  $R \approx 10^{-8} \text{ см}$  ( $1 \text{ \AA}$ ), то её плотность и упругие свойства будут близки к аналогичным величинам, характерным для металлов.

*«Кристаллическая» ячейка вещества внутреннего ядра Земли.* Внутреннее ядро, согласно общепринятой модели холодной Земли, представляет собой твердое кристаллическое железо, которое образовалось внутри расплава железа. Как мы показали выше, эта модель при ближайшем рассмотрении оказывается несостоятельной. В нашей, альтернативной модели вещество внутреннего ядра находится в состоянии плотного газа (пара, плазмы). По данным о прохождении сейсмических скоростей это «твердое и кристаллическое» вещество, обладающее гексагональной структурой. Кроме этого, внутреннее ядро

обладает анизотропией: скорость продольных волн вдоль оси вращения во внутреннем ядре примерно на 1-2 % больше чем скорость волн, проходящих в плоскости экватора. Мы пришли к выводу, что оказывается можно соединить в единое целое два таких противоречивых свойства, как гексагональная структура и состояние плазмы. Остается выяснить, что это за «кристалл», который существует при давлении 3.6 Мбар, температуре «газа» порядка 3 эВ, и «молекулярный» вес его  $m \approx 10$ . Мы уже отмечали, что  $m \approx 10$  может быть получен, если вещество состоит из железа ( $m \approx 56$ ) и водорода ( $m \approx 1$ ) в пропорции: один атом железа на 5 атомов водорода.

В модели горячей Земли постулируется, что Земля (как и другие планеты) образовалась в едином процессе формирования звезды – Солнца. Состав вещества прото Земли в момент её образования идентичен составу вещества Солнца. В процессе образования Земля потеряла практически весь водород, в то время как более тяжелые элементы остались в её составе. В Таблице 5.3 (V глава) приведены относительные концентрации атомов в веществе, из которого состоит Солнце. За единицу принята концентрация водорода  $N = 10^{12}$  частиц.

Полагая, что гелий является продуктом термоядерного синтеза, происходящего на Солнце, его не может быть в ядре Земли, учитывать в дальнейшем гелий не будем. Примем, что железо «традиционно» присутствует в ядре, а элементы, относительная концентрация которых меньше чем у железа (Na, Al, K, Ca) – исключим из рассмотрения. Примем концентрацию железа за единицу, ( $N_{Fe} = 1$ ) тогда относительная (на один атом железа) концентрация других элементов на Солнце (округленно):

- серы:  $N = 10^{(7.3 - 6.6)} = 5$
- магния:  $N = 10^{(7.4 - 6.6)} = 6$
- кремния:  $N = 10^{(7.5 - 6.6)} = 8$
- углерода:  $N = 10^{(8.7 - 6.6)} = 126$
- кислорода:  $N = 10^{(9 - 6.6)} = 250$
- водорода:  $N = 10^{(12 - 6.6)} = 2.5 \cdot 10^5$  (~237 - в ядре Земли)

Согласно нашей модели, концентрация водорода, за счет захвата его Солнцем, как более легкого, уменьшилась в момент образования Земли примерно на 3-4 порядка (см. гл. II), в то время как относительная концентрация других элементов оставалась неизменной. При выполнении этого условия можно оценить концентрацию более тяжелых (чем водород) элементов, исходя из того, что средний «молекулярный» вес вещества ядра  $m \approx 10$ . Будем полагать:  $m = 1/n \sum N_i n_i$ , что для Fe + S + Si + Mg;  $n = 1 + 5 + 8 + 6 = 12$ ;  $\sum N_i n_i = 1 \cdot 56 + 5 \cdot 32 + 8 \cdot 28 + 6 \cdot 24 = 584$ ; отсюда получаем  $m$  тяжелого элемента (ТЭ) =  $584/20 = 19$ . Выясним, что представляет собой ТЭ:  $m(C + O + TЭ) = \sum N_i n_i = 12 \cdot 126 + 16 \cdot 250 + 19 \cdot 20 = 1512 + 4000 + 584 = 6096$ .  $m$  всех элементов без водорода =  $6096/396 = 15.4$

Для того чтобы  $m = 10$ , количество атомов водорода  $\approx 237$ :  $m \sim (6096 + 237) / (396 + 237) = 6333/633 = 10$  (количество нуклонов, деленное на количество атомов). Если  $m < 10$ , количество атомов водорода, естественно, увеличивается.

Один «кластер» (= 633 атома) обладает общим весом  $6333 \cdot 1.6 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 10^{-20} \text{ г}$ . В  $\text{см}^3$  вещества находится  $\approx 13 \cdot 10^{20}$ , «кластеров», следовательно, один «кластер занимает объем  $7.7 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$ . На один атом приходится (в среднем)  $770/633 = 1.2 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$ , т.е. среднее расстояние между атомами составляет около 1 Å.

При температуре ~ 3 эВ степень ионизации (по Саха) не превышает 1 %, принято считать, что это слабоионизованная плазма. Это позволяет нам не учитывать, в первом приближении, коллективные свойства электрического расталкивания плазмы.

При изменении давления от 3.2 до 3.6 Мбар, скорость продольных волн не меняется (см. рис. 1-2, гл. I) и остается равной 11.2 км/с, скорость сдвиговых волн = 3.6 км/с, коэффициент Пуассона = 0.45. Упругие модули внутреннего ядра, оцененные по величинам скоростей сейсмических волн в предположении гексагональной структуры внутреннего ядра, приведены в третьей строке Таблицы 3.3 (см выше). Напомним, что в

первой строке Таблицы 3.3 приведены модули железа, измеренные в прямом эксперименте по статическому сжатию монокристалла гексагонального (h.c.p.) железа (Мао et al., 1998), во второй - модули железа, рассчитанные теоретически (Steine-Neumann et al., 2001) по схемам, приведенным в (Steine-Neumann et al., 1999). Очевидно несовпадение данных, приведенных в этой таблице, в которой представлены, для сравнения, реальные модули вещества внутреннего ядра и данные экспериментов и расчетов. Авторы (Steine-Neumann et al., 2001) в своей счетной модели стремились получить совпадение величин коэффициентов Пуассона ( $\sigma = 0.45$ ). В экспериментах (Мао et al., 1998) величина  $\sigma$  железа не меняется в широком диапазоне давлений (до 220 GPa), оставаясь равной 0.28.

В нашем «кластере», как отмечалось выше, 633 атома, из них железо и магний – обладают наименьшим потенциалом ионизации  $\approx 7.6 - 7.8$  эВ (см. Таблицу 3.4). Степень ионизации – не более 1 %, что составляет 6 - 7 ионов кластера. Таким образом, в «кластере» атомы железа и магния – ионизованы, и саму систему можно рассматривать как ионный кристалл, в котором находятся нейтральные атомы кислорода, водорода, углерода, серы и кремния.

Таблица 3.4

	H	C	O	Mg	Si	S	Fe
E, эВ	13.59	11.26	13.61	7.46	8.15	10.35	7.89

Рассмотрим упрощенный вариант модели. Исключим из состава ядра элементы, обладающие малой концентрацией. Оставим: кислород, углерод и водород, причем, примем, что водорода и кислорода примерно поровну, а углерода – в два раза меньше. Предположим, что именно эти элементы образуют гексагональную решетку, аналогичную описанной в (Jephcoat, Refson, 2001) для h.c.p. железа, как основного компонента ядра Земли. В этой решетке - 17 узлов (см. рис. 3-15). Будем считать, что из них 5 центральных принадлежат водороду (маленькие точки на рисунке). Для выполнения условия:  $\mu \approx 10$ , необходимо 4 атома углерода (большие кружки) и 8 атомов кислорода (квадраты). Число нуклонов = 171,  $\mu = 10.6$ . Общий вес решетки:  $181 \cdot 1.6 \cdot 10^{-24}$  г =  $290 \cdot 10^{-24}$  г. При плотности внутреннего ядра  $\rho = 13$  г/см<sup>3</sup>, её объем  $V = 22 \cdot 10^{-24}$  см<sup>3</sup>. Полагая расстояние между узлами основания решетки равным  $a$ , высоту решетки  $\approx 1.5 a$ , её объем  $V \approx 4 a^3$ , ( $a \approx 1.75$  Å), а высота решетки  $\approx 2.6$  Å.

Скорость объемных волн вдоль направлений  $a$  и  $b = 11.2$  км/с, а вдоль высоты ( $c$ ) - примерно на 1 – 2 % выше (анизотропия ядра). Решетка сжата давлением порядка 3.5 Мбар.

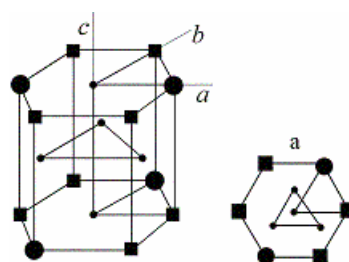


Рис. 3-15. Возможная объемная конфигурация ячейки кристаллической, плазменно-пылевой структуры вещества внутреннего ядра Земли.

Для того чтобы обсуждаемая модель обладала необходимой доказательной силой, требуется в дальнейшем:

- Рассчитать упругие модули кристаллической гексагональной структуры «кластера».
- Сравнить модули и коэффициент Пуассона с реальными параметрами внутреннего ядра. Меняя параметры (например, концентрацию водорода) подобрать наиболее близкие величины модулей.

- Оценить электропроводность такого «кристалла».
- Выяснить, что представляет собой «расплав» такого «кристалла» и можно ли считать, что на его границе реализуется экзотермический фазовый переход - конденсация?

III. 4. Принцип минимизации гравитационного потенциала - основной закон эволюции планет.

*Основные соотношения.* Гравитационный потенциал  $j$  удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta j = -4\pi Gr. \quad (3.26)$$

Здесь  $G$  – гравитационная постоянная,  $r$  - плотность вещества. Решение уравнения (3.26) записывается в виде:

$$j = G \int (rdV)/r + C, \quad (3.27)$$

$r$  - расстояние между элементом объема  $dV$  и точкой, в которой определяется потенциал  $j$ ,  $C$  – постоянная. Потенциал  $j$  определим и интеграл (3.27) сходится в том случае, когда при  $r \rightarrow \infty$ ,  $r$  убывает быстрее, чем  $r^{-2}$ . Если  $r = const$ , то интеграл (3.27) расходится и состояние формы гравитирующего шара оказывается неустойчивым.

Потенциал притяжения  $rj$  является функцией, регулярной на бесконечности, т.е.  $\lim (rj)_{(r \rightarrow \infty)} = GM$ , при этом сама функция  $j$  стремится к нулю:  $\lim j_{(r \rightarrow \infty)} = 0$ . Принято представлять потенциал силы тяжести реальной Земли  $w(x, y, z)$  как сумму:

$$W(x, y, z) = j(x, y, z) + \chi(x, y, z), \quad (3.28)$$

где  $j(x, y, z)$  - потенциал сфероида, а  $\chi(x, y, z)$  – возмущающий потенциал, т.е. часть потенциала, связанная с аномалиями силы тяжести. Уравнение (3.29) называется уравнением геоида, где  $T = const$ .

$$W(x, y, z) = j(x, y, z) + \chi(x, y, z) = T. \quad (3.29)$$

Рассмотрим семейство урovenных поверхностей потенциала  $W$ . Предположим, что через некоторую точку проходит урovenная поверхность:  $W(x, y, z) = T$ . Если  $\chi(x, y, z) = 0$ , то урovenная поверхность соответствует нормальному сфероиду  $j(x, y, z) = T$ . Добавим к  $j(x, y, z)$  некий малый потенциал  $\chi(x, y, z)$ . Тогда положение рассматриваемой урovenной поверхности изменится и некая точка  $P$ , находящаяся на этой поверхности, переместится в точку  $P'$ . Расстояние между точками  $P'$  и  $P$  обозначим  $\Delta n$ , тогда:

$$\Delta n = N = -\chi' / (j'/n) = \chi/g, \quad (3.30)$$

где  $g = -j'/n$  – производная функции  $j$ . Запишем основное уравнение гравиметрии, связывающее аномалии силы тяжести  $\Delta g$  с величиной возмущающего потенциала:

$$\Delta g = 1/g (jg'/n) \chi - jx'/n. \quad (3.31)$$

Уравнения (3.30, 3.31) показывают связь аномалии силы тяжести  $\Delta g$  с величиной возмущающего потенциала  $\chi$  и высотой геоида  $N$ .

Равновесной формой самогравитирующего изотропного тела, обладающего фазовой поверхностью, как известно, является шар. С другой стороны, в соответствии с принципом Гиббса-Кюри, форма шара присуща жидким изотропным телам в отсутствие внешних полей. В этом случае равновесная форма шара определяется минимумом свободной поверхностной энергии:

$$a \int dS = \min, (V = const). \quad (3.32)$$

Здесь  $a$  - поверхностное натяжение,  $S$  - площадь поверхности раздела фаз,  $V$  – объем шара. Приобретение телом шарообразной формы, как в случае самогравитации, так и при проявлении поверхностных эффектов в жидкости, базируются на общем для обоих случаев принципе пространственной корреляции структуры вещества и эффекте возникновения дальнего порядка. Возникновение дальнего порядка (упорядоченной фазы) имеет в физике фундаментальный характер. Как при самогравитации, так и при образовании фазовой поверхности, частицы вещества «чувствуют» не только ближайших к ним соседей, но и весь их «ансамбль». Причиной возникновения дальнего порядка в

самогравитирующей структуре может быть, например, континуальное вращение планеты, или, как показано в (Tsallis, 1999), - негиббсовская термодинамика самогравитирующих структур.

Представим себе, что дальний порядок устанавливается в объеме фазовой границы самогравитирующего тела. Допустим, что слой фазовой границы примерно соответствует земной коре толщиной  $z$ . Предположим, что именно в этом слое реализуется принцип минимизации площади  $S$ . Сила притяжения слоя:  $dF = (GMdM)/r^2$ , его гравитационная энергия  $dE = (GMdM)/r$ . Приравняем гравитационную энергию слоя литосферы толщиной  $z$ , энергии «поверхностного натяжения»:  $(GMdM)/r \approx a \int dS$ .

Отсюда получим выражение принципа минимизации гравитационного потенциала:

$$(GMdM)/r \rightarrow \min. \quad (3.33)$$

Полученное выше равенство позволяет оценить величину  $a$ :

$$a = GMzr/R. \quad (3.34)$$

Подставляя значения для гравитационной постоянной, массы Земли, толщины слоя ( $z \gg 10$  км), плотности литосферы и радиуса Земли, получаем величину  $a$  порядка  $10^{19}$  дин/см.

Принцип минимизации гравитационной энергии планеты и его роль в процессах, происходящих на поверхности планеты, заключается в том, что площадь фазовой поверхности самогравитирующего шара радиусом  $R$  стремится быть минимальной. В нашем случае фазовой поверхностью является поверхность геоида. Ниже рассмотрим следствия, вытекающие из этого принципа и механизмы его реализации. Обратим внимание на то, что выполнение этого принципа выражается как требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара. Выполнение его приводит к минимизации площади поверхности планеты.

Обратим внимание на ряд моментов, в той или иной степени связанных с гравитационной энергией и принципом её минимизации у Земли и планет. Принцип минимизации “заставляет” планеты стремиться к гидростатическому равновесию. Пути достижения этой цели известны, это геодинамика, сейсмичность и вулканизм.

Сравним: высота гор и самых глубоких впадин составляет примерно  $10^{-3}$  от радиуса Земли, отношение величины максимальных значений гравитационных аномалий, к силе тяжести составляет около  $10^{-4}$ , а отношение высоты геоида, к радиусу Земли -  $10^{-5}$ . Следовательно, Земля, эволюционируя, стремится минимизировать даже не величину гравитационных аномалий ( $\Delta g$ ), а высоту геоида ( $\zeta$ ). Иначе, Земля стремится достичь гидростатического равновесия, при котором её равновесная форма (когда высота геоида  $\zeta \rightarrow 0$ ) примет форму эллипсоида, с величиной обратного сжатия  $1/\epsilon = 298$  (а не 232, как следовало бы для “жидкой” Земли) (см. Гл. VII). Очевидно, что для не вращающейся планеты равновесная форма, это шар.

Предположим, что в результате растекания литосферы, как следует из нашей модели (см. Гл. VII), или “встряхивания” Земли при помощи её собственных землетрясений, с целью сделать Землю более компактной, как это следует из серии статей Чао и Гросса, реальный радиус Земли уменьшился на 6 мм (на  $10^{-9}$  его часть). Так как полная гравитационная энергия Земли составляет  $2 \times 10^{39}$  эрг, то такое уменьшение эквивалентно “выделению”  $2 \times 10^{30}$  эрг “реактивной” энергии. Какая часть этой энергии может быть затрачена на диссипативные процессы, сказать однозначно пока трудно, но такую возможность исключать нельзя. Вполне возможно, что часть из “выделившейся” таким способом энергии, может быть потрачена на дальнейшее уменьшение земного радиуса и еще большее увеличение доли этой энергии.

Заметим, что принцип минимизации обязан “работать” не только на Земле, но и на других достаточно крупных космических объектах. Вполне возможно, что процесс выделения диссипативной энергии является причиной вулканизма и сейсмичности Марса, Луны, Ио и др. Т.е. он, возможно, является источником энергии на тех планетах и спутниках, на которых уже давно нет внутреннего ядра с его колоссальным запасом энергии.

Для того чтобы понять, как работает принцип минимизации, обратимся к структуре Земли и особенностям строения её оболочек. Воспользуемся данными по собственным колебаниям оболочек и пространственному распределению их splitting-функций. На рис. 3.16 изображено изменение параметров Земли, полученное по анализу этих функций во внутреннем G-ядре (на границе его с внешним), мантии (D''- слое) в виде сечений по экватору, и по “нулевому” меридиану. На этих же рисунках представлены данные по изменению высоты геоида  $\zeta$  (в тех же сечениях). Для ещё большей наглядности, переведем данные по splitting-функциям, которые обычно представлены как изменение скоростей сейсмических волн (в процентах), в расстояния. Под расстояниями будем понимать вариации радиуса соответствующей оболочки от некоего среднего значения. Используем для этого известные значения градиентов скорости  $dv_p/dR$  в области вариаций splitting-функций. Тогда изменение значений splitting-функций на 1%, при градиенте скорости  $dv_p/dR = 1\text{ км/с} / 100\text{ км}$ , при величине скорости  $v_p = 10\text{ км/с}$ , эквивалентно изменению радиуса Земли  $\Delta R = 10\text{ км}$ .

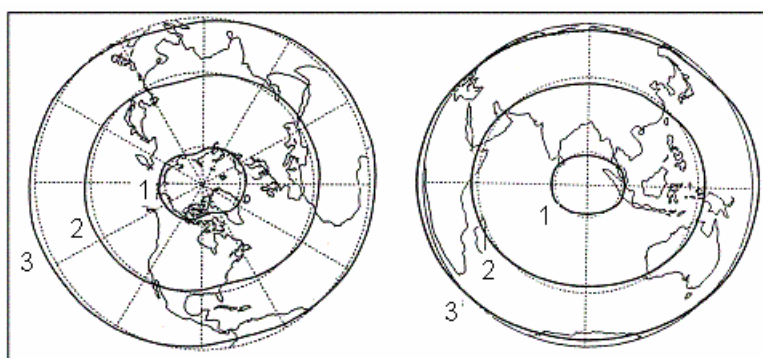


Рис. 3-16. Пространственная структура оболочек Земли полученная по splitting-функциям. 1 - внутреннее G-ядро (на границе его с внешним ядром), 2 - мантия (D''- слой), в виде сечений по экватору (рис. 3-16 - слева), и по “нулевому” меридиану (рис. 3-16 - справа). На этих же рисунках данные по изменению высоты геоида  $\zeta$  (в тех же сечениях) - 3.

Действительно, наши оценки величины цилиндрической анизотропии внутреннего ядра дают примерно такой же порядок (20 км). Примерно такая же величина  $\Delta R$  (20 - 40 км) характеризует колебания splitting-функций на границе ядро-мантия. Для сравнения: как мы отмечали, максимальный разброс значений высот геоида значительно меньше ( $\zeta \approx \pm 60\text{ м}$ ).

Рисунок 3-16 демонстрирует поразительное пространственное совпадение вариаций акустических свойств внутреннего ядра и мантии, а так же высоты 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. Рассматривая этот результат в контексте нашей модели, получаем подтверждение принципиальной возможности постулированной нами взаимосвязи двух фазовых переходов (ФП) “конденсация-испарение” (на границе внутреннего ядра) и “кристаллизация-плавление” (на границе ядро-мантия). Обратим внимание ещё на одну деталь. Пространство, где ФП происходит наиболее интенсивно, проецируются на Тихий океан (в области  $180^\circ$ ), с одной стороны, и Атлантический - Индийский ( $0^\circ$ ), с другой, т.е. на регионы максимального расширения Земли. Сравнивая величины  $\Delta R$  G-ядра и D''-слоя с высотой геоида  $\zeta$ , легко видеть, что высота геоида почти на три порядка меньше (На наших рисунках соотношение этих величин не выдержано). Этот факт свидетельствует о том, что в минимизации гравитационной энергии и высоты геоида принимает участие только самая верхняя часть литосферы, возможно, только земная кора.

Обратимся к механизмам реализации принципа минимизации. Выше мы называли их: это геодинамика, т.е. “течение” - горизонтальный перенос вещества литосферы; вулканизм и сейсмичность. Вулканизм и сейсмичность, в определенном смысле, являются механизмами вертикального (радиального) переноса. При этом либо переносится вещество, что происходит при излиянии вулкана, либо переносится тензор момента - при землетрясении. Легко видеть, что эти механизмы взаимосвязаны, хотя подчас такую связь выявить нелегко. Например, горизонтальный перенос изменяет структуру напряжений части литосферы, что вызывает возникновение землетрясения, которое приводит к перераспределению касательных напряжений, являющихся причиной течения и т.д. Аналогичную цепочку взаимосвязей можно проследить и при взаимодействии: геодинамика – вулканизм - геодинамика. Воспользуемся подходами, развитыми в синергетике. Будем в дальнейшем считать, что горизонтальное течение, - это перенос, а сейсмичность и вулканизм, явления, по своей физике, близкие к “просачиванию” - перколяции. Как принято считать в синергетике, симбиоз взаимодействующих механизмов переноса и перколяции приводит к самоорганизации структуры, в которой проявляются эти механизмы.

*Процессы самоорганизации.* Самоорганизующиеся системы описываются уравнением Фоккера-Планка (Ф-П). Физический смысл решения уравнения Ф-П можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (амплитуда, энергия и т.п.), тем меньше вероятность появления этого решения. Многие сейсмологи склонны считать график повторяемости землетрясений, известный как закон Гутенберга-Рихтера, фликкер-шумом. В этом случае он показывает, что в открытой диссипативной структуре, имеющей целью минимизировать гравитационный потенциал, или, что примерно одно и то же, минимизировать высоту геоида, происходят процессы самоорганизации. Т.о. мы приходим к важному выводу: ***реализация принципа минимизации гравитационного потенциала планеты (высоты геоида) и стремление её к установлению гидростатического равновесия, сопровождается процессом самоорганизации.***

График повторяемости землетрясений описывается известной в сейсмологии формулой:

$$\lg N(M) = a - bM, \quad (3.35)$$

где  $N(M)$  число событий с магнитудой  $M$ , которая однозначно связана с энергией землетрясений  $E$ :  $\lg E \sim M$ . Коэффициент  $b$  имеет смысл хаусдорфовой размерности. В самоорганизующихся процессах, чем ниже размерность, тем выше степень самоорганизации. В этом случае, по-видимому, выше обратная связь и степень взаимодействия между процессами переноса и перколяции.

График повторяемости землетрясений далеко не единственная характеристика такого рода. По-видимому, впервые аналогичную зависимость обнаружили древние египтяне. Анализируя частоту разливов Нила различной интенсивности, они обнаружили, что очень большие разливы встречаются крайне редко. Значительно чаще происходят разливы меньшей интенсивности, ещё меньшей интенсивности – ещё чаще и т.п. Впоследствии зависимости, определяемые формулой, аналогичной (3.35), обнаруживались практически во всех природных процессах, в той, или иной форме, связанных с энергией события. Например, солнечные вспышки, так же как землетрясения, подчиняются закону фликкер-шума, т.е. наблюдается линейная логарифмическая зависимость энергии вспышки, и числа вспышек с этой энергией в определенный промежуток времени. Вспышки, так же как и землетрясения, являются способом «сбросить» избыточную энергию хромосферы Солнца. Во многих работах показано, что если процесс можно свести к прямой в логарифмических координатах, где по осям отложена энергия и частота явлений с заданной величиной энергии, то это характеризует фрактальность процесса, а фрактальная размерность, это угол наклона прямой. Чем выше степень самоорганизации

процесса, тем ниже фрактальная размерность. Фрактальная размерность, это принципиально не целая величина. Наличие такой характеристики в солнечных вспышках говорит о том, что в солнечной короне происходит взаимодействие, по крайней мере, двух взаимосвязанных механизмов, приводящих к возникновению вспышки. В соответствии с теорией самоорганизации Хакена, эти механизмы должны соответствовать гидродинамическому переносу и диффузии.

Аналогичные зависимости наблюдаются в космических лучах, распределении высоты гор (Глава VII), величины нефтяных месторождений (Глава V) и пр. Складывается впечатление, что практически все процессы, происходящие на Земле, - процессы самоорганизации. Это дает основание считать Землю открытой самоорганизующейся планетой.

В третьей главе обосновывается модель горячей Земли, рассмотрены её ключевые моменты:

- Земля образовалась в результате быстрого сжатия её вещества за счет самогравитации. Температура вещества Земли в момент её образования достигала нескольких десятков тысяч градусов. Вещество находилось в газообразном состоянии. Температура вещества планеты, звезды, спутника, - определяется величиной её массы:  $T \sim E/Mc_p \sim M/Rc_p \sim M^{2/3}/c_p$ .

- В модели горячей Земли её начальный радиус  $R_0$  принят равным 3.5 тыс. км. Величина начальной плотности вещества Земли ( $r_0$ ) могла достигать  $35 \text{ г/см}^3$ .

- В процессе эволюции Земли, её вещество охлаждалось, конденсировалось – образуя внешнее ядро, и кристаллизовалось, – образуя мантию. Радиус Земли в процессе эволюции возрастал пропорционально  $t$ :  $\Delta R \sim t^2$  ( $t$  – время эволюции).

- Зависимость  $\Delta R \sim t^2$  является однозначно обратной:  $h \sim t^{1/2}$  ( $h$  – глубина астеносферы, а  $t$  – время, отсчитанное назад, от современного).

- Данные по изменению в течение времени эволюции таких параметров, как гравитационное и магнитное поле, а так же скорость вращения Земли, не находятся в противоречии с характером их поведения, следующим из модели горячей Земли.

- Модель горячей Земли решает вопрос о физике теплового потока и его равномерном распределении по поверхности Земли.

- Показано, что убывание температуры поверхности Земли связано с уменьшением величины силы тяжести, которое, в свою очередь, определяет толщину атмосферы.

- Из модели горячей Земли следует нетривиальный вывод о том, что Жизнь на Земле может возникнуть только при наличии силы тяжести, следовательно, она не могла быть привнесена на Землю из Космоса.

- Предложена теория, описывающая упругие свойства пылевой кристаллической плазмы на основе использования силы Казимира. Полученная формула позволяет оценить величину модуля сжатия вещества внутреннего ядра Земли.

- Анализ данных по скорости распространения сейсмических волн во внутреннем ядре, величине плотности и анизотропии позволяет оценить величины модулей сжатия ядра Земли. Полученные значения модулей сравниваются со значениями модулей железа, определенными экспериментально и оцененными теоретически. Сравнение показывает, что вещество внутреннего ядра не соответствует упругим свойствам железа.

- Земля подвержена действию принципа минимизации гравитационного потенциала.

Выполнение этого принципа выражается как требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара. Этот принцип приводит к минимизации площади поверхности планеты, минимизации её высоты геоида.



### *Литература*

- Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д. и др. Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений. УФН. 1999. Т. 169. № 3. С. 323-344.
- Бай Ши-и. Динамика излучающего газа. М.: Мир. 1968. 323 с.
- Блинов В.Ф. Основные направления исследований расширяющейся Земли. В сб. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.
- Бражкин В.В., Ляпин А.Г. Универсальный рост вязкости металлических расплавов в мегабарном диапазоне давлений: стеклообразное состояние внутреннего ядра Земли. УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 535-551.
- Веселов К.Е. Гравитационное поле и геологическое развитие Земли. Советская геология. 1976. N. 5. С. 70-80.
- Веселов К.Е. Случайные совпадения или явления природы. Геофизический журнал. 1981. № 3. С. 50-61.
- Веселов К.Е., Долицкая Т.В. Формирование земной коры континентов с позиций гипотезы расширения Земли. В сб. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. 191 с.
- Веселов К.Е., Карус Е.В., Савинский К.А., Долицкая Т.В. Физико-геологические основы концепции глобального рифтогенеза. М.: МГУ. 1993. 128 с.
- Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука. 1985. 399 с.
- Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и строение. М.: ИЛ. 1960. 484 с.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966. 686 с.
- Зельдович В.И., Литвинов Б.В., Пурыгин Н.П. и др. Квазисферическое взрывное нагружение стали с давлением до 200 ГПа. ДАН. 1995. Т. 343. № 5. С. 621-624.
- Земля замедляет свое вращение. 2003. URL: <http://www.webphysics.ru/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=14>
- Игнатов А.М. Квазигравитация в пылевой плазме. УФН. 2001. Т. 171. С. 213-217.
- Козлова Л.Е., Киприкова Е.Л., Найдин Д.П., Сакс В.Н. О природе концентрической слоистости в рострах белемнитов. Геология и геофизика. 1973. № 9. С. 38-49.
- Кренделев Ф.П. Изменение силы тяжести в геологическом прошлом Земли по результатам изучения химического состава костей позвоночных. Геология и геофизика. 1977. № 9. С. 154-157.
- Кулиев Г.Г. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах. ДАН. 2000. Т. 370. № 4. С. 534-537.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 216 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений Новосибирск: Наука. 1992. 92 с.
- Кузнецов В.В. Гравитационное поле Земли в геологическом прошлом. Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 10. С. 98-107.
- Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли. УФН. 1997. Т. 167. № 9. С. 1001-1012.
- Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели. Сб. докладов. ИКИР. 2004.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука. 1964. 567 с.
- Ларин В.Н. Гипотеза изначально гидридной Земли. М.: Недра. 1980. 216 с.
- Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между конденсированными телами. ДАН СССР. 1954. Т. 97. С. 643-646. ДАН.
- Лифшиц Е.М. Влияние температуры на молекулярные силы притяжения между конденсированными телами. ДАН СССР. 1955. Т. 100. С. 879-881.
- Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Двухъярусная термохимическая модель конвекции в мантии и её геодинамические следствия. В сб. Проблемы глобальной геодинамики. М.: Геос. 2000. С. 29-53.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.

- Макаренко Г.Ф. Вулканические моря Земли и Луны. М.: Недра. 1983. 143 с.
- Манк У., Макдональд Т. Вращение Земли. М.: Мир. 1964. 384 с.
- Мельхиор П.Ф. Земные приливы. М.: Мир. 1968. 482 с.
- Мёрнер Н.А. Эвстазия, изменение геоида и взаимодействия многих геофизических факторов. Сб. Катастрофы и история Земли. М.: Москва. 1986. С. 394-412
- Милуков В.К. Изменяется ли гравитационная постоянная. Природа. 1978. № 6. С. 96-104.
- Михайлов И.Г., Соловьев В.А. Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики М.: Наука. 1964. 514 с.
- Мостепаненко В.М., Трунов Н.Н. Эффект Казимира и его приложения. М.: Энергоатомиздат. 1990. 215 с.
- Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 412 с.
- Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.- Ижевск: РХД. 2001.
- Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. М.: Недра. 1984. 250 с.
- Сакс В.Н. Климаты прошлого на севере СССР. Природа. 1947. №12. С. 19-32.
- Салоп Л.И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра. 1982. 460 с.
- Скрипов В.П. Файзулин М.З. Вязкость жидкостей на линии плавления и в переохлажденном состоянии. ДАН. 2001. Т. 378. С. 620-623.
- Смирнов Л.С., Любина Ю.Н. О возможности изучения изменения силы тяжести с геологическим временем. ДАН СССР. 1969. Т.187, № 4. С. 874-877.
- Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир. 1972. 342 с.
- Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. и др. Земля: введение в общую геологию. Ч. 2. М.: Мир. 1974. 845 с.
- Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы и облака. УФН. 1997. Т. 167. С. 57-99.
- Чумаков Н.М. Климатические колебания и биотические события. Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С.30-39.
- Шмидт-Нильсон К. Как работает организм животного М.: Мир. 1976. 140 с.
- Шульдинер В.И. Свидетели ранней истории Земли. Природа. 1985. № 4. С. 72-79.
- Эванс М.Л., Мур Р., Хазенстайн К.-Х. Как корни растений реагируют на силу тяжести. В мире науки. 1987. № 2.
- Ashpole E. Expanding Earth. Spectrum. 1985. № 193. P. 6-8.
- Berry W.B.N., Barker R.M. Growth increments in fossil and modern bivalves. Growth Rhythms and the History of the Earth's Rotation. Ed. S.K.Rosenberg. London. John Wiley and Sons. 1975. P. 9-25.
- Boehler R. High-pressure experiments and phase diagram of lower mantle and core materials. Rev. Geophys. 2000. V. 38. N. 2. P. 221-245.
- Brans C., Dicke R.H. Mach's principle and relativistic theory of gravitation. Phys. Rev. 1961. V. 124. N. 3. P. 925-935.
- Brown J.M., McQueen R.G. Phase transitions, Grüneisen parameter and elasticity for shocked iron between 77 GPa and 400 GPa. J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 7485-7494.
- Canuto V.M. The Earth's radius and the G-variation. Nature 1981. V. 290. P.739-744.
- Carey S.W. The expanding Earth. Amsterdam: Elsevier. 1976. 488 p.
- Chu J.H., Lin I. Coulomb lattice in weakly ionized colloidal plasma. Physica A. 1994. V. 205. P. 183-190.
- Chandrasekhar S. Hydrodynamics and hydromagnetic stability. Oxford: Clarendon Press. 1961. 654 p.
- Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversal, polar wander, and core-mantle coupling. Science 1987. V. 237. P. 1140-1147.
- Deuss A., Woodhouse J.H., Paulssen H., Trampert J. The observation of inner core shear waves. Geophys. J. Int. 2000. V. 142. P. 67-73.
- Dicke R.H. Implication for cosmology of stellar and galactic evolution rates. Rev. Mod. Phys. 1962. V. 34. N. 1. P. 110-122.

Dirac P.A.M. A new basis for cosmology. *Proc. Roy. Soc. London A.* 1938. V. 165. P. 199-206.

Egyed L. The expanding Earth. *Trans. N.Y. Acad. Sci. Ser. 11.* 1961. V.23. N. 5. P. 424-432.

Falzone A.J., Stacey F.G. Second-order elasticity theory: explanation for the high Poisson's ratio of the inner core. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1980. V. 21. P. 371-377.

Farouki R.T., Hamaguchi S.J. Thermodynamics of strongly-coupled Yukawa systems near the one-component-plasma limit. II. Molecular dynamics simulations. *Chem. Phys.* 1994. V. 101. P. 9885-9893.

Flandren T.C. Determination of rate of change of  $G$ . *Month. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1975. V. 170. N 2. P. 333.

Fuller M., Weeks R. Superplumes and superchrons. *Nature* 1992. V. 356. P. 16-17.

Hamaguchi S. J., Farouki R.T. Thermodynamics of strongly-coupled Yukawa systems near the one-component-plasma limit. I. Derivation of the excess energy. *Chem. Phys.* 1994. V. 101. P. 9876-9884.

Hilgenberg O. *Vom wachsenden Erdball.* B. 1933. 56 p.

Holmes A. *Trans. geol. Soc. Glasg.* 1947. V. 21. P. 117-152.

Holmes A. *Principles of physical Geology.* Nelson. London. 1965. 1260 p.

Jephcoat A., Refson K. Core beliefs. *Nature* 2001. V. 413. P. 27-30

Jordan T.H. The deep structure of the continents. *Sci.Amer.* 1979. V. 240. N 1. P.70-82.

Kapp R.O. *Towards a unified Cosmology.* Hutchinson. London. 1960. 303 p.

Lamoreaux S.K. Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6  $\mu\text{m}$  range. *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 78. P. 5-8.

Lampe M., Joyce G., Ganguli G., Gavrishaka V. Interactions between dust grains in a dusty plasma. *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 3851-3861.

Langer J.S. Instabilities and pattern formation in crystal growth. *Rev. Mod. Phys.* 1980. V. 52. P. 1-28.

Larson R.L. Geological consequences of superplumes. *Geology.* 1991. V. 19. P. 963-966.

Longer days ahead. *Astronomy.* 1996. V. 24. N. 10. P. 28.

Maddox, J. Plasma dust as model crystals. *Nature* 1994. V. 370. P. 411.

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

Melzer A., Trottenberg T., Piel A. Experimental determination of the charge on dust particles forming Coulomb lattices. *Phys. Lett. A.* 1994. V. 191. P. 301-308.

Merlino R.L., Barkan A., Thompson C., D'Angelo N. Laboratory studies of waves and instabilities in dusty plasmas. *Phys. Plasmas.* 1998. V. 5. P. 1607-1614.

Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth. *Science* 1969. V. 166. P. 609-611.

Mohideen U., Roy A. Precision measurement of the Casimir force from 0.1 to 0.9  $\mu\text{m}$ . *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81. P. 4549-4552.

Nosenko V., Goree J., Ma Z.W., Piel A. Observation of shear-wave mach cones in a 2D dusty-plasma crystal. *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. P. 135001-4.

Ohta H., Hamaguchi S. Wave dispersion relations in Yukawa fluids. *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. P. 6026-6029.

Okal E.A., Cansi Y. Detection of PKJKP at intermediate periods by progressive multi-channel correlation. *Earth Plan. Sci. Lett.* 1998. V. 164. P. 23-30.

Owen H.G. The Earth is expanding and we don't know why. *New Scientist.* 1984. P. 27-29.

Owen H.G. Has the Earth increased in size? *New concepts in Global Tectonics.* Eds. Chatterjee S. and Hotton N. 1992. Texas Tech. University Press. Lubbock. 450 p.

Pannella G. Paleontological evidence on the Earth's rotational history since Early Precambrian, *Astrophysics and Space Science.* 1972. V. 16. P. 212-237.

Piel A., Nosenko, Goree J. Experiments and molecular-dynamics simulation of elastic waves in a plasma crystal radiated from a small dipole source. *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 89. P. 085004.

Pramanik J., Prasad G., Sen A., Kaw P.K. Experimental observations of transverse shear waves in strongly coupled dusty plasmas. *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. P. 175001-4.

Sabbata V. On the variation of the gravitational constant G. *Acta cosmol. Zes.nauk UJ.* 1980. V. 570. N. 9. P. 63-90.

Scalera G. Palaeopoles on an expanding Earth: a comparison between synthetic and real data sets. *Phys. Earth Planet Inter.* 1990. V. 62. P. 126-140.

Shapiro I.I., Counselman C.C., King R. Verification of the principle of equivalence for massive bodies. *Phys. Rev. Lett.* 1976. V. 36. N. 11. 555-558.

Schmidt P.W., Embleton B.J.J. A geotectonic paradox: has the Earth expanded? *J. Geophys.* 1981. V. 49. P. 20-25.

Shukla P.K. Generation of zonal flows by drift waves in a dusty plasma. *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 3822-3825.

Smith P.J. Intensity of the Earth's magnetic field in the geological past. *Nature* 1967. V. 216. P. 989-900.

Sonett C.P., Kvale E.P., Zakharian A., Chan M.A., Demko T.M. Late Proterozoic and Paleozoic tides, retreat of the Moon, and rotation of the Earth. *Science* 1996. V. 273. P. 100-4.

Steine-Neumann G., Stixrude L., Cohen R.E. First-principles elastic constants for the hcp transition metals Fe, Co, and Re at high pressure. *Phys. Rev. B.* 1999. V. 60. P. N 791-799.

Steine-Neumann G., Stixrude L., Cohen R.E., Gulseren O. Elasticity of iron at the temperature of the Earth's inner core. *Nature* 2001. V. 413. P. 57-60.

Steiner J. An expanding Earth on the basis of sea-floor spreading and subduction rates. *Geology.* 1977. V. 5. P. 313-318.

Stenflo L., Shukla P.K. Dust acoustic waves in thin dusty layers. *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 3472-3473.

Stenflo L., Shukla P.K., Yu M.Y. Dust acoustic surface waves on a dusty plasma slab. *Phys. Plasmas.* 2000. V. 7. P. 2731-2732.

Stewart A.D. Palaeogravity in Palaeogeophysics (edit. by Rankorn, S.K) Academic Press, London. 1970.

Stewart A.D. Palaeogravity from the compaction of fine-grained sediments. *Nature* 1972. V. 235. P. 322.

Terasaki H., Kato T., Urakawa S., et al. The effect of temperature, pressure, and sulfur content on viscosity of the Fe-FeS melt. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. V. 190. P. 93-101.

Thomas, H., Morfill G.E., Demmel V. et al. Plasma crystal: coulomb crystallization in dusty plasma. *Phys. Res. Lett.* 1994. V.73. P. 652-655.

Thomas H., Morfill G. Melting dynamics of a plasma crystal. *Nature* 1996. V. 379. P. 806-809.

Tsallis C. Nonextensive statistics: theoretical, experimental and computational evidence and connections. *Brazilian Journal of Physics.* 1999. V. 29. № 1. P. 1 – 35.

Van Horn H.M. Dense astrophysical plasmas. *Science* 1991. V. 252. P. 384-389.

Wells J.W. Coral growth and geochronometry. *Nature* 1963. V. 197. P. 948-950.

Wigner, E. On the interaction of electron in metals. *Phys. Rev.* 1934. V. 46. P. 1002-1011.

Winter J. A new challenge in nuclear fusion research? *Phys. Plasmas* 2000. V. 7. P. 3862-3866.

Xinhuanet. Algae fossil betrays time secret of 1.3 billion years ago. 2003-07-07.  
<http://www.china.org.cn/english/scitech/69268.htm>

Zahnle K., Walker J.C. A constant daylength during the Precambrian era? *Precambrian Res.* 1987. V. 37. P. 95-105.

## Глава IV. ТЕРМОДИНАМИКА ГОРЯЧЕЙ ЗЕМЛИ

Термодинамика холодной Земли базируется на идее расплавленного железного ядра, внутри которого находится кристаллическое твердое железное ядро. Собственно, эта модель «определяет» «реперные точки» температуры и общий ход её по глубине Земли. Ещё раз отметим, что это искусственная модель, которую до сих пор никто никогда не смог получить, ни экспериментально, ни численно. Действительно, попробуйте внутри ведра с водой образовать лед или получить кристаллическое железо внутри расплава. Этого, при условии, что вязкость расплава останется неизменной, а форма кристаллизующегося тела – сферической, никогда не удастся сделать. Например, Мясников и Фаддеев (1980), создавая численную модель образования жидкого ядра, не смогли получить в центре его твердое внутреннее ядро, какие бы термодинамические условия и уравнения состояния вещества они не задавали (частное сообщение В.П. Мясникова). В первой и третьей главах этой книги обращалось внимание на то, что идея затвердевания (кристаллизации) внутреннего ядра внутри расплавленного внешнего находится в противоречии с решением задачи Стефана. Всё это еще раз может говорить о несостоятельности модели холодной Земли.

Следуя холодной модели, температура, по мере увеличения давления, должна возрастать все с меньшим и меньшим градиентом и, в конце концов, выйти на асимптоту. Наилучшим описанием такого хода является адиабата Пуассона. Однако адиабата Пуассона характеризует поведение недиссипативной среды - идеального газа. Очевидно, что Земля, - это диссипативная структура и её вещество далеко не всегда можно представлять идеальным газом. В такой термодинамической структуре, по мере её эволюции, постоянно растет энтропия. По всей видимости, адиабата Пуассона, не лучшее приближение к реальности. На наш взгляд, для описания характера поведения температуры в недрах Земли больше подходит аппроксимация температуры законом ударной адиабаты, или, ее называют еще, адиабатой Гюгонио. Этот закон учитывает диссипативные свойства среды, и применим для систем, энтропия которых увеличивается. Отсюда следует вывод, что горячая модель Земли требует создания своей термодинамики (Кузнецов, 1998).

### IV. 1. Оценки величин термодинамических параметров.

*Оценка температуры.* Гравитационная энергия Земли:  $E = 3/5 GM^2/R$ , ( $G$  - гравитационная постоянная,  $M$  - масса, а  $R$  - радиус Земли) равна, по оценке Магницкого (1965),  $E = 2.25 \times 10^{39}$  эрг. Поделим эту энергию на массу Земли и на приемлемую величину теплоемкости её вещества ( $c_p = 0.3$  кал/г град.). Температура земного вещества оказывается порядка 30 000 К. При этом, Магницкий делает такой вывод: "Однако такая оценка бессмысленна, так как разогрев Земли целиком определяется принятой схемой образования планеты из протопланетного облака, поскольку при этом возникают огромные потери тепла через излучение" (Магницкий, 1965, стр. 41). Как было показано выше, и будет ясно из последующего, наша модель горячей Земли базируется на утверждении о том, что начальная температура вещества Земли (и планет) была именно такой большой.

Очевидно, что вещество, имеющее такую высокую температуру, будет находиться в газообразном состоянии, точнее, в состоянии перегретой жидкости, ещё точнее, - слабоионизованного газа - плазмы. Земное вещество может нагреться до такой температуры при его сжатии за счет самогравитации. Внутреннее (газокинетическое) давление вещества, по мере увеличения его температуры, будет возрастать. Сжатие остановится в тот момент, когда газокинетическое давление станет равным давлению самогравитации (в соответствии с известным критерием Джинса). Воспользуемся этим критерием для оценки термодинамических параметров вещества Земли в момент ее образования. Сделаем одно весьма существенное для нашей модели предположение. Будем считать, что в настоящее время земное вещество в "первородном" состоянии

находится во внутреннем ядре. Мы отмечали, что это очень важное предположение. Если это действительно так, то все остальное в нашей модели является его физически непротиворечивым следствием. Температура  $T = 30\,000\text{ К}$  взята нами как исходная. В последствии, мы постараемся оценить интервал допустимых температур в т.н. "реперных" точках Земли: в центре и на границах внутреннего и внешнего ядра.

*Начальный радиус Земли.* Согласно критерию Джинса, гравитационное сжатие вещества Земли остановится в тот момент, когда скорость звука в среде, то есть в идеальном газе:  $(g R_g T/m)^{1/2}$ , будет равна т.н. альвеновской (гравитационной) скорости:

$$(R_g T g/m)^{1/2} = (GM/R)^{1/2}, \quad (4.1)$$

здесь  $g = c_p/c_v$  - показатель адиабаты,  $R_g$  - газовая постоянная,  $m$  - молекулярный (атомный) вес вещества. Скорость звука это, иначе, скорость прохождения Р-волн. Она, как известно, во внутреннем ядре равна:  $v_p = 11.2\text{ км/с}$ . (Обратим внимание на такой факт: скорость  $v_p$  практически постоянна вдоль радиуса внутреннего ядра, что соответствует газу, а не веществу в конденсированном состоянии).

Будем считать, что мы более или менее верно оценили начальную температуру вещества Земли ( $T = 30\,000\text{ К}$ ), будем полагать, что величина  $g$  не слишком отличается от единицы. При этом можно приближенно оценить атомный вес вещества, который оказывается равным:  $m \approx 10$ , полагая начальный радиус Земли  $R_o \approx 3.5$  тыс. км. Выше мы отмечали, что в пользу правдоподобия последней оценки говорит такое весьма интересное наблюдение: радиус внешнего ядра Земли равен 3.5 т. км. Площадь поверхности внешнего ядра точно равна суммарной площади материков. Это обстоятельство может говорить, например, о том, что Земля имела первоначальный размер, равный размеру ее внешнего ядра, а материки занимали полностью всю ее поверхность.

*Величина начальной плотности.* Поделив массу Земли на объем внешнего ядра, можно получить оценку начальной плотности вещества Земли и, возможно, плотности вещества внутреннего G-ядра. Величина начальной плотности  $r_G$  может достигать  $35\text{ г/см}^3$ . Порядок величины плотности вещества внутреннего ядра можно оценить другим способом. Для этого положим газокинетическое давление  $nkT$  ( $k$  - постоянная Больцмана) равным литостатическому давлению в центре Земли ( $p \approx 3.5\text{ Мбар}$ ). Подставляя вместо плотности газа  $n$  выражение  $n = r_G/m$  ( $m$  - масса протона), получаем примерно такую же величину плотности вещества внутреннего ядра ( $r_G = pm/kT$ ). Заметим, что оцененная нами выше величина молекулярного (атомного) веса вещества Земли ( $m = 10$ ) показывает, что в ее составе значительное место принадлежит водороду. В качестве примера представим, что внутреннее ядро Земли состоит из водорода и железа. Выше мы уже отмечали, что молекулярный вес  $m$  "молекулы", составленной из атомов железа и водорода, будет равен примерно 10, если один атом железа будет "окружен" пятью атомами водорода. Для того чтобы плотность такого вещества была равной, оцененной нами для вещества внутреннего ядра ( $r_G = 35\text{ г/см}^3$ ), линейный размер такой "молекулы" не должен быть больше  $0.8\text{ \AA}$  ( $1\text{ \AA} = 10^{-8}\text{ см}$ ).

Сравним полученную величину размера "молекулы" с известными размерами атомов и ионов водорода и железа. Размеры: атома железа =  $1.26\text{ \AA}$ , иона  $\text{Fe}^{+2} = 0.8\text{ \AA}$ , иона  $\text{Fe}^{+3} = 0.67\text{ \AA}$ ; иона водорода  $\text{H}^+ = 1.36\text{ \AA}$ , атома водорода =  $0.28\text{ \AA}$ . Очевидно, что "создавая" такую "молекулу", необходимо заметно уменьшить первоначальные размеры исходных элементов "ободрав" с них верхние электроны. Такой способ "обдирки" атомов очень высоким давлением известен (Ландау, Лифшиц, 1964; Зельдович, Райзер, 1966). В экспериментах по лазерному термоядерному синтезу удавалось сжать вещество, увеличив его плотность в 100 раз по сравнению с исходной плотностью. Теоретический предел такого сжатия оценен в 10 000 раз (Басов и др., 1982).

Очевидно, что вещество в таком газообразном, сжатом состоянии с плотностью в  $35 \text{ г/см}^3$  не встречается свободно в природе. Считается, что вещество при такой плотности находится в метастабильном состоянии и, со временем, релаксирует, превращаясь в нормальное, конденсированное состояние. Атомы вещества восстанавливают прежнюю форму электронных оболочек и занимают соответственно больший (чем в метастабильном состоянии) объем. Вещество при этом расширяется, а его плотность принимает “нормальное” значение (для вещества ядра Земли - порядка  $10 \text{ г/см}^3$ ). Плотность вещества Земли при фазовом переходе его из метастабильного состояния в нормальное конденсированное может уменьшиться на  $\sim \Delta r = 25 \text{ г/см}^3$ . Такое явление обязано перестройке электронных оболочек атомов сжатых мегабарным давлением. При фазовых переходах первого рода (конденсации и испарении) вещество изменяет свое агрегатное состояние, т.к. сжать вещество значительно проще в том случае, когда оно находится в газообразном состоянии.

В качестве иллюстрации сказанному, приведем пример такого состояния вещества, воспользовавшись идеями, изложенными в (Кузнецов, 1985). Представим себе кусок медной проволоки, который используется в качестве электрического предохранителя. Сжать медную проволоку до сколь угодно большой плотности никаким давлением не удастся. Пропустим через нее ток такой величины, что проволока мгновенно испарится. Она еще не успела разлететься как пар и пока “держит” форму. Что она представляет собой, металл или диэлектрик? Проволочка представляет собой вещество в газообразном состоянии или, точнее, в состоянии перегретой жидкости (т.е. уже не металл) и если воздействовать на него внешним давлением, то его можно сжать до сколь угодно высокой плотности. Если снять (отпустить) внешнее давление, то пары металла будут расширяться, расширяясь, - охлаждаться, и охлаждаясь, - конденсироваться. Вещество, находящееся в конденсированном состоянии при мегабарных давлениях и высокой температуре, при перегреве, способно испариться, и может быть сжато внешним давлением до высокой плотности. Эти достаточно простые представления составляют основу преобразований агрегатного состояния вещества, на которых базируется предлагаемая здесь модель “горячей” Земли.

*Роль фазовых переходов.* Согласно нашей модели, в момент образования Земли ее вещество представляло собой пересжатый, слабоионизованный газ (плазму). Как мы отмечали, начальный радиус Земли был равен 3.5 т. км. Вещество охлаждалось, при этом переходило из газообразного состояния в конденсированное, формируя, таким образом, внешнее ядро, и, охлаждаясь еще, - кристаллизовалось на границе внешнего ядра, образуя мантию. Таким образом, от поверхности внешнего ядра во внутрь его перемещался фронт фазового перехода (ФФП) - конденсация, в то время как на этой же границе “действовал” фронт кристаллизации.

Рассмотрим требуемый характер перемещения масс внутри планеты, с той целью, чтобы это движение привело к наименьшему значению гравитационной энергии. Масса и момент инерции при этом должны оставаться неизменными. Иначе, нам следует выяснить, какой должна бы быть структура вариации плотности. Перемещение массы вдоль радиуса, происходящее при превращении однородной модели в многослойную, должно сопровождаться ответным «перемещением» масс в обратном направлении, таким образом, чтобы соблюдалось постоянство момента импульса. При этом, гравитирующий шар (звезда, планета, спутник) должен рассматриваться как самоорганизующаяся структура в терминах теории самоорганизации и оптимальных процессов.

Движение вещества через ФФП можно представить как дрейф, с одной стороны, и, т.к. на границе ФП всегда имеет место “скачек” плотности, - в виде стационарной ударной волны (Ландау, Лифшиц, 1986) - с другой. Скорость такого дрейфа определяется скоростью отвода тепла из области ФП. Здесь механизм отвода тепла (конвективного или кондуктивного) играет роль перколяции - просачивания.

Размер внутреннего ядра в процессе эволюции Земли постоянно уменьшался, радиус внешнего ядра оставался постоянным, его объем, естественно, возрастал, в то время как толщина мантии постоянно увеличивалась. В такой постановке, в системе должно выполняться правило сохранения моментов импульса, или, если скорости обеих процессов (конденсации, направленной внутрь Земли и кристаллизации, - наружу) равны, должен выполняться закон сохранения массы. Масса мантии должна быть равна массе разуплотненной части вещества внешнего ядра. Масса мантии, как известно, равна  $4 \times 10^{27}$  г. Масса разуплотненного вещества равна примерно  $4/3 \pi R_0^3 \Delta \rho$ . Оценка величины  $\Delta \rho$ , полученная таким способом, дает то же, что и полученное нами выше, значение:  $\Delta \rho = 25$  г/см<sup>3</sup>.

*Критические параметры.* Допустим, что состояние постулированного нами вещества в сверхсжатом газообразном состоянии можно описать уравнением Ван-дер-Ваальса. Это допущение не должно вызвать особых возражений, тем более что это известное уравнение используется для описания явлений, связанных с фазовыми переходами. Это допущение позволяет оценить порядок критической температуры вещества Земли. (Известно, что при критической температуре  $T_K$  исчезает грань между фазами: всё вещество находится в газообразном состоянии). Уравнение Ван-дер-Ваальса дает связь между критическими параметрами:  $T_K$ , давлением  $p_K$  и объемом  $V_K$ :  $p_K V_K / R_g T_K = 3/8$ . (Закон соответственных состояний). Подставляя вместо  $p_K$  давление в центре Земли (3.5 Мбар), а вместо  $V_K = m/r_G$  ( $m$  в молях) получаем:  $T_K \approx 3 \times 10^4$  К. Величина  $T_K$  примерно в три раза превышает критическую температуру железа в нормальных условиях. Полученную нами оценку, ни каким образом, нельзя считать попыткой определения критической температуры какого-то индивидуального вещества в общепринятом смысле. Критические параметры конкретных веществ индивидуальны и в большинстве случаев известны и помещены в справочниках.

Сравнивая  $pT$ -параметры вещества внутреннего ядра ( $T = 3 \times 10^4$  К,  $p = 3.5$  Мбар) с критическими параметрами железа ( $T_K \approx 10^4$  К,  $p_K \approx 5$  кбар) видно их несоответствие: давление и температура во внутреннем ядре (согласно модели горячей Земли) значительно выше критических параметров железа. Это может вызвать недоумение. Может возникнуть неправильное впечатление, что при давлении и температуре, превышающих критические, раздела фаз нет и железо находится только в газообразном состоянии. В действительности это не так. Этот вопрос оригинально решен Зельдовичем и Райзером (1966): вещество, находящееся при  $pT$ -параметрах, превышающих критические, следует рассматривать как смесь индивидуальных веществ, обладающих различной теплоемкостью  $c_V$ :  $c_V = 3 R_g$  и  $c_V = 3/2 R_g$ , где  $R_g$  - газовая постоянная. Как известно, теплоемкость  $c_V = 3/2 R_g$  характеризует газ, а  $c_V = 3 R_g$  - вещество в конденсированном состоянии. Если температура вещества  $T > T_p$ , то оно находится в газообразном состоянии, если меньше ( $T < T_p$ ), то в конденсированном. К примеру, для железа нормальной плотности,  $T_p \approx 20$  тыс. К. При увеличении давления  $p$  и сжатии вещества, растет и температура  $T_p \sim p/r$  ( $r$  - плотность). Предельное значение величины  $T_p$  (Зельдович, Райзер, 1966)  $T_p \sim U/R_g$ , что для железа оказывается порядка 70 тыс. К.

*Энтропия.* Полученная оценка критической температуры для мегабарных давлений показывает, что в этих условиях вещество будет находиться в газообразном, плазменном состоянии. Оценка величины полной энергии системы  $E$ , температуры  $T$ , давления  $p$  и величины объема мантии  $dV$ , позволяет определить порядок значений изменения энтропии системы  $dS$ . Для этого воспользуемся известной связью энергии диссипативной структуры с ростом (продуцированием) в ней энтропии:  $dE = T dS - p dV$ . Подставляя определенные нами величины термодинамических параметров системы, получаем  $dS \approx 1$



Дж/г град. Для сравнения, приводим критические энтропии ряда металлов: меди - 1.97; алюминия - 4.59; свинца - 0.87 Дж/г град. и т.п. (Кузнецов, 1985). Анализ оценки величины энтропии позволяет утверждать, что Земля представляет собой диссипативную систему, в которой продуцируется, возрастает энтропия.

Как известно, фазовые переходы первого рода, такие как конденсация, испарение, (плавление и кристаллизация), происходят с выделением (или поглощением) скрытой теплоты фазового перехода  $U$ . Величина  $U_K$  (конденсации, испарения) для некоторых металлов (медь, железо, алюминий и пр.) составляет примерно от 5 до 10 кДж/г (Кузнецов, 1985). Теплота перехода  $U_{II}$  (плавление, кристаллизация) примерно в 20 - 30 раз меньше. Для дальнейших оценок примем величину  $U_K = 10$  кДж/г. Это вполне приемлемое значение, т.к. известно, что  $U \gg T dS$ , и полагая, что температура вещества F-слоя порядка 10 000 К, получаем именно это значение.

Согласно Климонтовичу (1996), такая характеристика, как энтропия, может быть использована в качестве степени упорядоченности состояний открытой системы, к которой можно отнести и Землю. Переход ее вещества из газообразного и жидкого в кристаллическое, т.е. в более упорядоченное состояние, является фоном для реализации процесса самоорганизации.

Как отмечалось в Главе I, Земля открытая диссипативная, самоорганизующаяся структура, в которой происходит постоянный рост энтропии. Казалось бы, энтропия центральной части Земли должна быть самой большой, и она должна уменьшаться по мере движения вдоль радиуса Земли в сторону его увеличения. Этому очевидному правилу из необратимой термодинамики противоречит модель кристаллизации внутреннего ядра внутри расплавленного железного внешнего ядра.

Для обсуждения модели Земли с позиции второго начала термодинамики, ещё раз запишем основное термодинамическое равенство:

$$dE = T dS - p dV,$$

откуда следует выражение для энтропии системы:

$$S = 1/T \int dE + 1/T \int p dV + C.$$

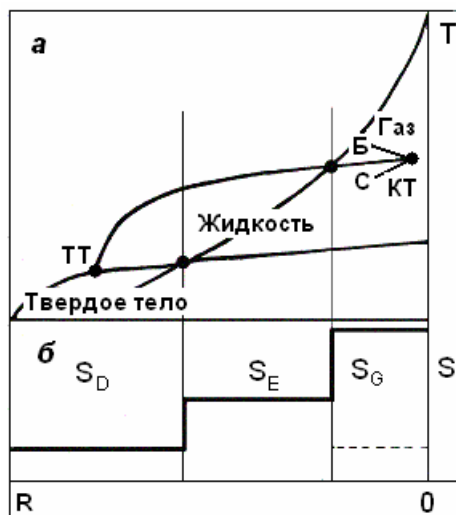


Рис. 4-1. Распределение температуры (а) и энтропии (б) по оболочкам Земли. а: диаграмма состояния вещества Земли и распределение температуры по адиабате Гюгонио, ТТ – тройная точка, КТ – критическая точка, Б – бинодаль, С – спинодаль.

Охлаждение системы, равно как и увеличение объема, приводит к росту энтропии. Итак, в процессе эволюции диссипативной, открытой, самоорганизующейся системы, такой как Земля, должно происходить увеличение энтропии ( $S$ ). Как известно, Земля состоит из внутреннего – G, внешнего - E ядра и мантии - D. Энтропия Земли

складывается из суммы энтропий её компонент:  $S = S_G + S_E + S_D$ . Распределение температуры по радиусу Земли очевидно:  $T_G > T_E > T_D$  (см. рис. 4-1-а). Казалось бы, что в процессе эволюции таким же должно было бы быть и распределение энтропий:  $S_G > S_E > S_D$ . Следствием этого распределения должно быть газообразное (плазменное) состояние вещества внутреннего ядра. С точки зрения баланса энтропии схема устройства Земли, в которой: мантия состоит из вещества в кристаллическом состоянии, внешнее ядро, – в жидком, а внутреннее ядро – в газообразном, представляется вполне логичной. Подобная система может эволюционировать посредством “работы” двух фазовых переходов первого рода: “конденсация-испарение” – на границе внутреннего ядра и “кристаллизация-плавление” – на границе ядро-мантия. На каждом таком фазовом переходе происходит резкое уменьшение энтропии, если “смотреть” из центра Земли к её периферии. Совсем не так выглядит распределение энтропии в случае т.н. модели холодной Земли, согласно которой внешнее ядро представляет собой расплав, а внутреннее ядро и мантия – кристаллическое состояние:  $S_G < S_E > S_D$  (рис. 4-1-б), что, как мы отмечали в Главе I, маловероятно.

*Тепловой поток.* Оценим порядок величины энергии  $E_U$ , выделившейся на Земле за время её эволюции ( $t = 4.5$  млрд. лет) посредством фазового перехода, полагая, что все вещество мантии сначала конденсировалось, а затем кристаллизовалось, а вещество внешнего ядра – конденсировалось. Для грубых оценок можно считать, что практически все вещество Земли (за исключением вещества внутреннего ядра, которое составляет ее незначительную часть, порядка 1 - 2 %) претерпело фазовый переход. В этом случае  $E_U = 6 \times 10^{38}$  эрг. Это составляет примерно 1/3 - 1/4 от полной гравитационной энергии Земли. Энергия  $E_U$  практически вся должна пойти на формирование теплового потока  $Q$ . Оценим величину потока  $Q$ , усредненного за время эволюции Земли  $t$ :  $Q = E_U/t = 10^{29}$  эрг/год. Полученная величина  $Q$  примерно на порядок больше наблюдаемой в настоящее время ( $1.5 \times 10^6$  кал/см<sup>2</sup>с  $\approx 10^{28}$  эрг/год), однако это несоответствие не должно особенно смущать, так как известно, что в более ранние геологические эпохи температурный градиент  $dT/dp$ , а, следовательно, и  $Q$ , были значительно выше. (В такой постановке равенство теплового потока на материках и океанах очевидно).

Сравним: годовая мощность теплового потока Земли равна примерно  $3 \times 10^{13}$  Вт, мощность магнитного поля Земли составляет  $\approx 10^{12}$  Вт, наибольшая выделяющаяся при землетрясениях и извержении вулканов мощность  $\approx 3 \times 10^{11}$  Вт. Видно, что у тепловой машины "Земля" механический КПД невелик (порядка процента), КПД преобразования энергии в магнитное поле выше и т.д.

*Диссипативная функция.* Диссипативная функция (ДФ) имеет смысл мощности в системах, в которых происходит продуцирование энтропии. В нашем случае можно полагать, что диссипативная функция, это ни что иное, как тепловой поток. Что может дать нового введение этой функции в рассмотрение термодинамики Земли? ДФ обычно вводится для учета перехода энергии упорядоченного движения в тепловую, характеризует степень убывания энергии системы. ДФ, деленная на температуру, определяет скорость возрастания энтропии в системе. Если тепловой поток, это ДФ, то, разделив его значение на величину  $T$ , получим скорость продуцирования энтропии:  $Q/T = dS/dt = 10^9$  Дж/°К×с для всей Земли. За время эволюции Земли произведено  $10^{26}$  Дж/°К, поделив эту величину на  $M$ , получаем, что оцененная таким образом  $dS$  меньше, чем полученное выше значение. Это означает, что раньше величина  $Q$  была в несколько раз больше современного значения.

*Давление.* Как отмечалось, фазовые переходы, реализующиеся в нашей схеме в F-слое, происходят с выделением (конденсация) или поглощением (испарение) энергии, а также с увеличением объема (конденсация и кристаллизация), либо с его уменьшением (испарение).

и плавлении). Принципиальной особенностью нашей схемы, отличающей ее от схем обычных, - является то, что плотность вещества в газообразном состоянии выше, чем в конденсированном. Плотность вещества в конденсированном состоянии выше, чем в - кристаллическом. Иначе, плотность вещества мантии, меньше плотности вещества внешнего ядра. Удельные объемы ( $V = 1/\rho$ ):  $V_{ж} > V_{г}$ , что обычно бывает наоборот. Полагая, условно, что вещество Земли «чистое, и не является смесью веществ», воспользуемся известным уравнением Клапейрона - Клаузиуса:

$$dP/dT = U/T(V_{г} - V_{ж}). \quad (4.3)$$

Выражение в скобках имеет знак "минус", и это должно вызывать появление отрицательного давления -  $\Delta p$ . Величина:

$$\Delta p = (\Delta T/T) (U/\Delta V) = (\Delta T/T) (U\Delta r_G). \quad (4.4)$$

Оценим  $U\Delta r_G$ , она оказывается порядка:  $U\Delta r_G = 2.5$  Мбар, т.е. эта величина достаточно близка к значению давления в центре Земли. Отношение  $(\Delta T/T)$  оценим позже, когда будем обсуждать ход зависимости  $dT/dp$ , а пока заметим, что (по нашей модели) в области фазового перехода (в F-слое) градиент  $dT/dp$  на кривой фазового состояния вещества должен быть отрицательным. Отсюда следует, что в цикле конденсации, когда величина  $Dr_G$  положительна, давление в области F-слоя возрастает, а в цикле испарения, наоборот, давление уменьшается. Этот факт, без сомнения, должен сказаться на характере движения сплошной среды в земном ядре и, в особой степени, в области F-слоя.

#### IV. 2. Уравнение состояния вещества.

*Зависимость температуры плавления от величины давления.* Как следует из нашей модели, исходное вещество, из которого была образована Земля, в значительной степени состояло из водорода. В процессе эволюции водород терялся, диссипируя в космическое пространство. В составе современной Земли, в её ядре и мантии присутствуют преимущественно (кроме водорода) кремний, кислород, железо и т.п.

Уравнение состояния железа при мегабарных давлениях изучено лучше всего. Исследователей интересовала температура плавления железа в зависимости от внешнего давления (Brown, McQueen, 1986; Boehler et al, 1990; Grover, 1990; Mao et al., 1990; Duba, 1992; Boehler, 1993; Saxena et al., 1994). В дальнейшем будем пользоваться этими данными. Однако из этого никак не следует, что в нашей модели ядро обязательно целиком железное, а мантия состоит из окиси кремния. Эти и другие элементы в различных концентрациях могут присутствовать в различных, земных оболочках (и во внутреннем ядре, естественно).

«Ядро – стеклянное?». Как известно, скорость S-волн в G-ядре мала и, естественно, велик коэффициент Пуассона ( $s = 0.44$ ), который намного больше, чем у железа ( $s = 0.28$ ). К примеру,  $s$  у:  $\text{SiO}_2 = 0.18$ ; льда = 0.35; резины = 0.47; жидкости = 0.5. Если бы во внутреннем ядре находилось железо, то при  $v_p = 11.2$  км/с скорость S-волн должна бы быть около 6 км/с. Бражкин и Ляпин (2000) опубликовали обзор в УФН, где высказали идею, что вещество внутреннего ядра находится в состоянии, подобном стеклянному, т.е. железо там существует не в кристаллическом виде, а в виде металлического стекла. В этом случае, по мнению авторов, можно объяснить большую величину коэффициента Пуассона (0.44), т.к. такая величина для стекол вполне обычна. Надо сказать, что утверждение авторов (Бражкин, Ляпин, 2000) относительно того, что внутреннее ядро может находиться в стеклообразном состоянии и именно этот факт объясняет большой коэффициент Пуассона, не убедительно. В качестве аргумента авторы ссылаются на (Кюнц, 1986), где специально рассматриваются механические свойства металлических стекол. В этой книге обсуждается поведение коэффициента Пуассона  $s$  металлических стекол, для которого имеются результаты непосредственных измерений. Оказывается, «прямое сравнение его значений со значением для кристаллического сплава того же состава пока не проводилось. С другой стороны, в аморфных сплавах значение  $s$  немного

больше, чем в чистых кристаллических металлах. Действительно, исходя из наблюдаемых изменений других упругих постоянных, и связи  $S$  с этими постоянными в изотропных телах, можно ожидать, что значения  $S$  в металлических стеклах должны быть на 3 – 7 % больше, чем в кристаллической фазе» (стр. 209). Но не в 1.5 раза!

Обратим ещё раз внимание на то, что скорость Р-волн во внутреннем ядре постоянна, причем это нельзя объяснить тем, что ядро «стеклянное». Кроме этого, как известно, стекло образуется при большой скорости охлаждения, порядка  $10^6$  К/с (Кюнц, 1986), что, как нам кажется, невозможно реализовать в ядре Земли. И, наконец, для того, чтобы получить стеклообразное состояние, необходимо охладить центральную часть ядра Земли, не охлаждая его периферию, чего сделать невозможно в принципе.

*Уравнение состояния.* Похоже на то, что ни один из авторов, исследующих уравнение состояния железа, не проявил интереса к другой его части, не менее важной и информативной. Речь идет о кривой давления паров от температуры, кривой, оканчивающейся критической точкой (КТ см. рис. 4-1-а). На этом рисунке изображена кривая, показывающая, весьма схематично, уравнение состояния условного вещества Земли, в котором, кроме критической точки имеется т.н. тройная точка ТТ (ТТ - температура сосуществования трех фаз, например, у воды ТТ = 0° С).

От КТ под небольшими углами к температурной кривой испарения идут две кривые. Одна из них, обозначенная буквой "Б", показывает линию бинодали, другая, обозначенная буквой "С", - спинодали. Бинодалью называется кривая сосуществования двух фаз "жидкость-пар". Спинодаль - граница термодинамической устойчивости жидкости. Область между спинодалью и бинодалью - метастабильное перегретое состояние вещества. Эта кривая определяет состояние вещества Земли в твердом "Т", жидком "Ж" и газообразном "Г" виде.

*«Пятое» состояние вещества.* Особенность строения Земли и, в частности, его внутреннего ядра, состоит в том, что оно не может находиться «просто» в газообразном состоянии, как это следует из рис. 4-1-а. Необходимо подобрать такое состояние вещества, которое проявляло бы ещё и свойства, свойственные твердым телам: оно должно пропускать сдвиговые волны, т.е. вести себя как кристалл. Одним из возможных состояний вещества внутреннего ядра могла бы быть астрофизическая плазма, которая, как известно, проявляет квантовые свойства и может быть уподоблена кристаллическому состоянию.

В работе (Van Horn, 1991) приведены фазовые диаграммы  $r(T)$  железа и водорода. Здесь выделены линии  $\Gamma = 178$ , разделяющие вещество, находящееся в кристаллическом квантовом состоянии ( $\Gamma > 178$ ) и состоянии квантовой жидкости ( $1 < \Gamma < 178$ ). В области параметров (плотности и температуры), характерных для ядра Земли, кривая  $\Gamma = 178$  в этой работе для железа точно не определена, она известна для  $r > 100$  г/см<sup>3</sup> и  $T > 10^5$  К, а для водорода, эта кривая пересекает интересующую нас область  $rT$  параметров. Из диаграмм можно оценить:  $dr/dT$  для железа ( $dr/dT \approx 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>/°К) и водорода ( $dr/dT \approx 10^{-1}$  г/см<sup>3</sup>/°К).

Оценим величину этого параметра в области границы внутреннего ядра Земли по данным известной РЕМ-модели Земли. Этот параметр ( $dr/dT$ ) примерно равен  $10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>/°К. Из рис. 4-2, построенного по данным Van Horn, видно, что ни железо, ни водород («в одиночку») не могут составлять вещество внутреннего ядра Земли.

Обратим внимание на такой любопытный факт, который может оказаться «спасительным» для нашей модели: В последние годы экспериментально (Thomas et al., 1994) обнаружено принципиально новое состояние вещества, названное авторами плазма-кристаллом (ПК). Газообразному веществу в ПК-состоянии, по-видимому, так же как астрофизической плазме и Вигнеровскому кристаллу (Wigner, 1934), присущи квантовые свойства и ряд других свойств, характерных для кристаллических тел.

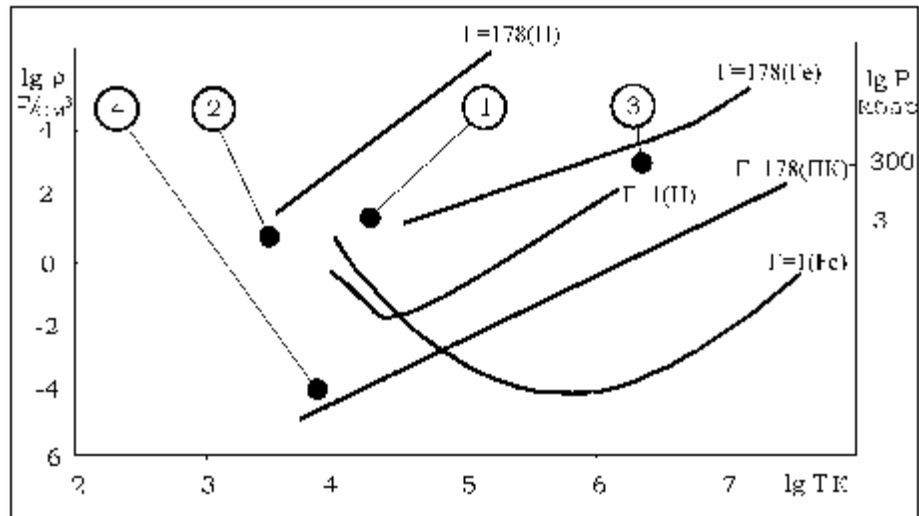


Рис. 4-2. Фазовая диаграмма «плотность-температура» для водорода и железа (по данным Van Horn, 1991). 1 - состояние вещества внутреннего ядра; 2 - параметры железа, полученные (Boehler, 1993) в экспериментах по ударному сжатию; 3 -  $\rho T$  центральной части Солнца; 4 - лабораторный результат (Thomas et al., 1994).

Этот факт дает основание рассматривать в качестве вещества внутреннего ядра, «кристаллическую» плазму, где в качестве «пылинок» могут быть частицы железа (или кремния), окруженные свободными электронами, возникающими при ионизации водорода. Именно в этом случае, как и в (Thomas et al., 1994), величина  $\Gamma$  может быть достаточно большой, а это означает, что кулоновские силы значительно превышают силы тепловые. Если предположить, что в центре Солнца так же находится плазма-кристалл и использовать экспериментальные данные из (Thomas et al., 1994), то можно, весьма условно, провести линию  $\Gamma = 178$  (ПК) для вещества в состоянии плазма-кристалл (рис. 4-2).  $\rho T$ -параметры внутреннего ядра оказываются выше этой линии, что могло бы означать «разумность» нашего предположения.

Надо заметить, что в последние годы в различных лабораториях мира энергично ведутся эксперименты с веществом в состоянии «плазма-кристалл» или, иначе, с «пылевой» плазмой. В России среди важнейших достижений в области физики за 1999 приведено следующее: «В Институте теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур выполнена серия экспериментальных исследований пылевой плазмы в стратах тлеющего разряда постоянного тока. Впервые получены упорядоченные структуры из протяженных цилиндрических макрочастиц длиной 300 микрон, диаметром 15 и 7.5 микрона. Заряженные пылевые частицы образуют структуру, подобную жидкому кристаллу».

Эксперименты с веществом в состоянии плазма-кристалл настолько просты, а результаты очевидны, что это, возможно, открывает принципиальную возможность проверить нашу идею в лабораторном эксперименте. Одним из возможных способов экспериментальной проверки высказанной идеи может быть проведение ударно-волнового сжатия мишени и определение ударных адиабат по измерению скоростей ударных волн и массовой скорости мишени. В качестве мишени можно было бы использовать металлы, способные поглощать большие объемы водорода, такие как, например, палладий (до 850 объемов водорода), никель, платина и др. Суть таких экспериментов могла бы состоять в выявлении возможности образования плазма-кристалла и условий его «плавления», в оценке величин плотности, молекулярного веса и т.п. По-видимому, «плавление» плазма-кристалла должно характеризоваться резким

изменением величины массовой скорости вещества мишени (или скорости звука, если удастся её измерить) при незначительных вариациях начальных параметрах эксперимента.

#### IV. 3. Распределение температуры.

*Адиабата Пуассона.* Проблема распределения температуры по глубине Земли всегда представляла достаточно сложную задачу. Дело в том, что нам доступна информация о величине и распределении теплового потока, теплопроводности пород земной коры и температурного градиента, измеренного на очень небольших глубинах. С большей или меньшей правдоподобностью оценивается температура на глубине  $h = 100$  км. Известно также давление на этой глубине. Дальнейшие рассуждения относительно хода температурной зависимости по глубине, как правило, находятся в тесной связи с используемой авторами моделью строения Земли и ее химическим составом. Принятый путь оценок  $dT/dh$  основан на представлении об адиабатическом характере распределения температуры в недрах Земли. Зная  $pT$ -условия на глубине 100 км и приняв определенный закон, например, адиабату, вычисляют распределение температуры по глубине.

Большинство авторов для оценки  $dT/dh$  пользуются выражением:

$$dT/dh = - (gbT)/c_p, \quad (4.5)$$

где  $g$  - ускорение силы тяжести,  $b = 1/V (\partial V/\partial T)_p$  - коэффициент температурного расширения. Эта формула получена из известного дифференциального уравнения адиабаты:

$$(\partial T/\partial p)_S = T/c_p (\partial V/\partial T)_p, \quad (4.6)$$

которое преобразуется в  $dT/dh$  заменой  $dp = -rg dh$ . В основе этого выражения используются формулы для адиабаты Пуассона:

$$pV^g = const, TV^{g-1} = const, (c_p/c_v = g). \quad (4.7)$$

При адиабатическом (пуассоновом) процессе энтропия остается постоянной ( $S_2 - S_1 = 0$ ), а тепло, сообщенное системе в этом процессе, равно нулю ( $dQ = 0$ ).

*Адиабата Гюгонио.* Как мы отмечали, это Земля диссипативная система. В этой термодинамической системе постоянно растет энтропия. По всей видимости, адиабата Пуассона, не лучшее приближение к реальности. На наш взгляд, для выяснения характера поведения температуры в недрах Земли больше подходит аппроксимация температуры законом ударной адиабаты, или, ее называют еще, адиабатой Гюгонио. Этот закон учитывает диссипативные свойства среды, и применим для систем, энтропия которых увеличивается. Ударная адиабата имеет существенное отличие от адиабаты Пуассона (реализуемой в идеальном газе с постоянной теплоемкостью, в не диссипативных процессах с постоянной энтропией).

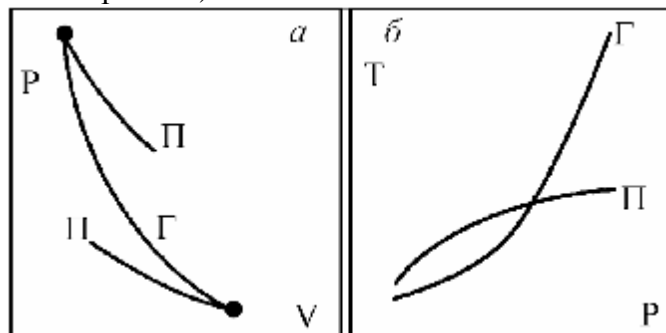


Рис. 4-3. Адиабаты Пуассона (П) и Гюгонио (Г) в координатах:  $pV$  - а и  $pT$  - б.

Уравнения Гюгонио (см. Главу III) определяют связь между термодинамическими величинами по обе стороны разрыва - “скачка” характеристик среды. Надо заметить, что поверхность разрыва термодинамических характеристик системы (Земли, в нашем случае)

Ландау и Лифшиц (1986) называют неподвижной ударной волной. Этот факт еще раз убеждает нас в том, что только адиабата Гюгионо может использоваться для оценки характера  $dT/dh$ , а не адиабата Пуассона. На рисунке 4-3, для сравнения, изображены зависимости адиабат Пуассона ("П") и Гюгионо ("Г") в координатах  $pV$  (рис. 4-3-а) и  $pT$  (рис. 4-3-б). Из этих рисунков видно, что в  $pV$ -координатах обе адиабаты различаются незначительно, в то время как характер зависимости температуры от давления имеет принципиальное различие для обеих адиабат. В дальнейшем, в нашей модели, при построении  $dT/dh$ , будем пользоваться адиабатой Гюгионо.

*Распределение температуры.* На рис. 4-4 изображены зависимости  $dT/dh$ , или, что то же самое,  $dT/dp$ , так как зависимость давления от радиуса Земли однозначна. Кривая (1) построена на основе аппроксимации температуры ("сверху", от  $T = 30\ 000$  К и "снизу", от температуры плавления железа) по формуле (4.10). Она в какой-то степени близка к аналогичной кривой (3 на рис. 4-4; 3 на рис. 3-11), построенной по адиабате Гюгионо (Brown, McQueen, 1986):

$$dT = -T(g/V)dV + 1/2c_v[(V_0 - V)dp + (p - p_0)dV], \quad (4.8)$$

здесь  $\gamma$  - коэффициент Грюнайзена. Пересечение линии (2), тоже адиабаты Гюгионо, с кривой, соответствующей уравнению состояния земного вещества (использующей данные по плавлению и критической точки железа), "отбивает" границы земных оболочек: мантии и внешнего ядра, а так же внешнего и внутреннего ядра. В первом случае адиабата (2) пересекает линию "твердое-жидкость", во втором - "жидкость-газ".

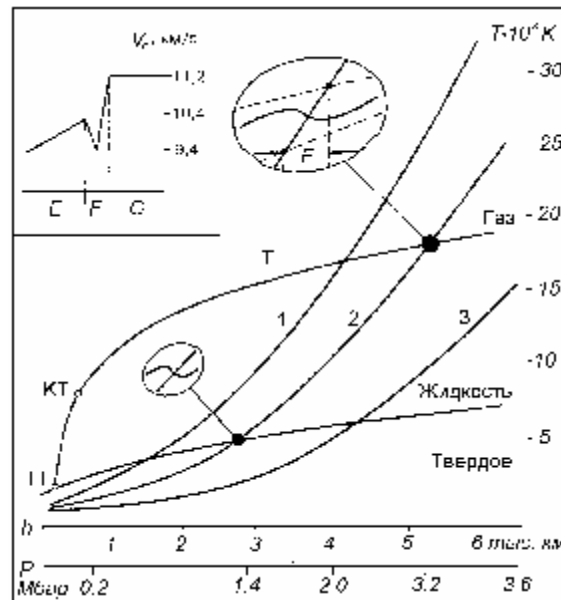


Рис. 4-4. Диаграмма фазового равновесия вещества Земли (ТТ - тройная точка, КТ - критическая точка,  $T_p$  - линия разделяющая фазы при  $T > КТ$  и  $p > p_k$ ). Адиабаты (А) Гюгионо: 1- рассчитана по формуле (Зельдович, Райзер, 1966), 3- рассчитана по формуле (Brown, McQueen, 1986), 2 - подобрана таким образом, чтобы она пересекалась с диаграммой равновесия на границе ядро-мантия и на границе внутреннего ядра с внешним. В верхнем левом углу - скорости Р-волн в области F-слоя (в интерпретации Джеффриса).

Как выше отмечалось, на кривой состояния фаз в области F-слоя должна наблюдаться особенность, состоящая в том, что градиент температуры в этой области становится отрицательным. Это происходит благодаря тому, что по уравнению (4.3) Клапейрона-Клаузиуса:  $dp/dT = U/T(V_g - V_{жс})$ , в то время как (по нашей модели):  $V_{жс} > V_g$ .

В подтверждение этому, сошлемся на несколько необычный характер поведения скоростей Р-волн в области F-слоя (по трактовке Джеффриса). Это распределение Р-волн приведено на вставке в левом верхнем углу рис. 4-4.

Преобразуем полученную нами выше формулу зависимости температуры по адиабате Гюгонио, заменяя  $1/V = r$  и учитывая, что  $dp/dr = v^2$ , где  $v$  - скорость Р-волн. Получаем:  $T_1 = T_0(v_1/v_0)^2$ . Зная характер поведения Р-волн в области F-слоя и полагая температуру на границе F-слоя и внешнего ядра равной  $T_F$ , температура, соответствующая минимуму скорости Р-волн, будет равна  $0.8 T_F$ , а температура на границе F-слоя с внутренним ядром -  $1.25 T_F$ . Если, к примеру, считать, что  $T_F$  порядка 10 000 К, то  $\Delta T \approx 2000$  К, а  $\Delta T/T \approx 0.2$ . Эта оценка понадобится нам в дальнейшем при обсуждении величины  $\Delta p$ .

Заметим, что аналогичная ситуация с поведением температуры вдоль кривой распределения фаз будет наблюдаться и при пересечении кривой адиабатой на границе ядро-мантия, т.е. в области D"-слоя мантии. Здесь, также как в случае F-слоя, имеет место резкое уменьшение величины скорости Р-волн, связанное (по нашей модели) с тем, что плотность жидкой фазы оказывается больше плотности твердой, или  $V_T > V_{ж}$ .

Оценим величину разности температур на внешнем ядре. Эта "реперная" оценка поможет нам определить ту часть из общей величины  $T$ , которая "падает" на промежутке между F- и D"-слоями. Согласно нашей модели, во внешнем ядре происходит ламинарная конвекция (см. Главу 7, где показано, что во внешнем ядре можно выделить 12 конвективных ячеек). Можно оценить, что число Релея в такой конвективной структуре не будет больше чем:  $Ra = 10\ 000$ , а число Нуссельта при этом:

$$Nu \approx 0.18 (Ra)^{1/3} = 5.$$

Как известно, тепловой поток, проходящий через конвективную структуру:

$$Q = I \Delta T / d,$$

где  $I$  - теплопроводность вещества ядра ( $I \approx 10^{-2}$  кал/град·см·с),  $\Delta T$  - перепад температур,  $d$  - эффективная толщина конвективного слоя:  $d = h/Nu$  ( $h$  - толщина внешнего ядра, равная примерно 2 000 км). Полагая величину  $Q$  равной  $1.5 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>·с, перепад температуры на внешнем ядре:  $\Delta T \approx 6\ 000$  К.

Аналогичным образом можно оценить  $\Delta T$  на слое мантии. Здесь, по всей видимости, происходит турбулентная конвекция, и число Релея может оказаться выше, чем в случае с внешним ядром. Соответственно, выше в несколько раз будет и число Нуссельта. Так как слой мантии примерно в 1.5 раза больше чем в ядре, то, учитывая все эти обстоятельства, величина  $\Delta T$  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  $\Delta T$  не представляется возможным. Из самых общих соображений, вряд ли  $\Delta T$  может оказаться больше чем 5 000 К (а если учесть, что скорость Р-волн во внутреннем ядре можно оценить по формуле для идеального газа:  $V = (gR_g T/m)^{1/2}$ , то и того меньше) поэтому максимальное значение температуры в центре Земли может составлять, ориентировочно, не более 15 000 К.

#### IV. 4. Скорости процессов конденсации и испарения.

Как отмечалось, в области фазового перехода, в F-слое по модели, конкурируют два процесса: конденсация и испарение, и ее более высокая стадия - кипение. Скорость конденсации  $K$  (с<sup>-1</sup> см<sup>-3</sup>) можно выразить воспользовавшись формулой Френкеля (1975):

$$K \gg 10^{26} \exp(-3/\ln S_{\Pi} + \ln S_{\Pi}), \quad (4.9)$$



здесь  $S_{\Pi}$  - пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина  $S_{\Pi}$  определяется температурой пара, его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной поверхностного натяжения жидкости и т.п. Скорость конденсации  $K$  показывает количество элементарных процессов слияния частиц, которое происходит в единицу времени в единичном объеме. Величина  $K$  определяет скорость образования и роста капель.

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

$$J (\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}) = 10^{37} \exp(-W/kT), \quad (4.10)$$

где  $W$  - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Зависимости  $K$  и  $J$  от температуры среды  $T$  (чисто качественные) изображены на рисунке 4-5. При температуре порядка  $T_0$ , 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  $T_0$  - носит исключительно гипотетический характер).

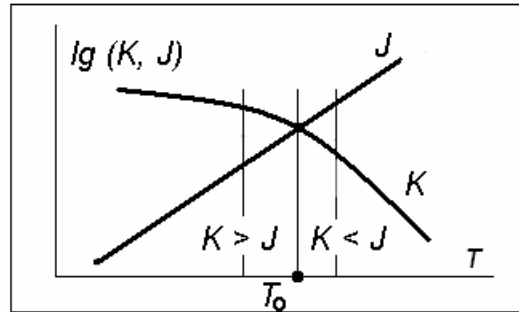


Рис. 4-5. Изменение  $\lg$  скоростей конденсации ( $K$ ) и испарения ( $J$ ) в зависимости от температуры  $T$  – вверх.

В определенный момент времени  $t_0 - (0)$  система была перегрета на  $\Delta T$  до температуры  $T > T_0$ . 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  $T < T_0$ . В точке  $T = T_0$ , 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.

#### IV. 5. Цикличность.

Оценим длительность цикла. Чем больше разность  $T - T_0$ , тем выше производная  $dT/dt$ , тем короче цикл и, наоборот, чем более плавно устанавливается термодинамическое равновесие, и чем дольше оно длится, тем длиннее цикл. Длительность цикла:  $t = C / [J - K]$ , где  $C$  – константа, - связана с концентрацией капель и пузырей. При смене цикла в точке  $T = T_0$ , происходит не только изменение режима работы фазового перехода и связанное с ним изменение геодинамического режима Земли (о котором пойдет речь

ниже), но и изменение полярности геомагнитного поля Земли - инверсия. Причиной инверсии (см. Гл. VI) является смена полярности электрического поля  $E$  двойного электрического слоя, в котором, по нашей модели, происходит генерация геомагнитного поля (см. рис. 4-5, 6-15). Длинные и сверхдлинные циклы, это, по нашей модели, - хроны и суперхроны (по терминологии, принятой в палеомагнетизме). Казалось бы, длительность цикла может быть очень большой, когда, например,  $J = K$ , а  $t \rightarrow \infty$ , однако, как будет показано ниже, такая ситуация невозможна в системе с самоорганизованной критичностью.

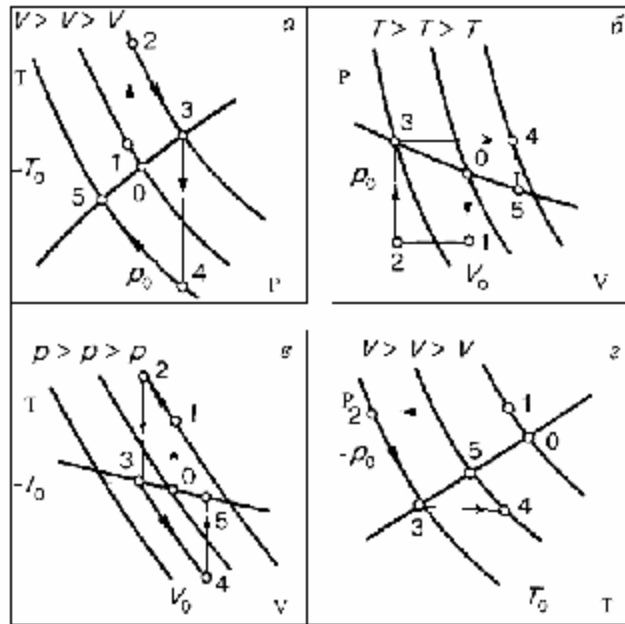


Рис. 4-6. Термодинамические циклы в области F-слоя -а, -б, -в и в области D"-слоя -г.

Оценим порядки величин, входящих в выражение  $t$ . Если принять:  $C \approx 10^{16}$  ( $1/\text{см}^3$ ), число атомов в одном пузыре (капле) равно, примерно,  $10^8$ , тогда длительность цикла  $t$  (в сек) меняется в интервале:  $10^{15} - 10^{11}$  (от суперхрона  $\approx 30$  млн. лет, до периода смены полярности МПЗ  $\approx 3$  т. лет). Величины  $J$ ,  $K$  и  $[J - K]$  принимают значения от 10 до  $10^5$ . (К примеру, скорость образования пузырей воды во время кипения при температуре 578 К и атмосферном давлении  $J = 10^4$  ( $\text{см}^{-3}, \text{с}^{-1}$ ), что говорит о "разумности" приводимых нами оценок).

*Модель цикла.* Рассмотрим подробнее, как меняются термодинамические параметры системы ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ) в течение цикла. Еще раз отметим, что процессы, обеспечивающие циклический характер эволюции Земли как термодинамической системы, происходят, согласно нашей модели, в F-слое, где, как отмечалось, наблюдается особенность в  $dT/dh$ . (Как будет показано ниже, аналогичные процессы могут иметь место и на границе ядромантия, где происходит кристаллизация (плавление) вещества мантии). Градиент  $dT/dh$  на кривой фазового равновесия, как мы выяснили, в области F-слоя принимает отрицательные значения (рис. 4-4). Очевидно, что эта особенность должна сказаться на характере процессов, происходящих в области фазовых переходов.

Предположим, что начальная точка  $[0, (p_0, V_0, T_0)]$  находится на линии, соответствующей уравнению состояния в термодинамическом равновесии. Допустим, что в силу каких-то причин система была нагрета на величину  $\Delta T$ , она перешла в состояние, соответствующее точке (1) (рис. 4-6-а). Допустим, что этот нагрев не изменил удельного объема системы  $V$  (средней плотности вещества F-слоя  $r$ ). Точка 1 перемещается в этом

случае вдоль по адиабате ( $V = \text{const}$ , см. рис. 4-6-а, -б, -в и таблицу 4.1). Перегрев системы на  $\Delta T$  сопровождается преимуществом скорости процессов испарения, над конденсацией (рис. 4-5,  $J > K$ ). Это, в свою очередь, приведет к тому, что некоторая часть вещества, находящегося в конденсированном состоянии, переходит в газообразное состояние (испаряется) (с большей плотностью). Объем системы уменьшается ( $V_2 < V_1$ ). Рабочая точка системы (показывающая состояние ее термодинамических параметров) перемещается вдоль адиабаты ( $p = \text{const}$ ) в положение 2. В этой точке (2) система имеет максимальные значения температуры и плотности ( $V - \text{min}$ ). Температура системы уменьшается, следуя вдоль адиабаты ( $V = \text{const}$ ) до пересечения ее с кривой уравнения состояния вещества (в точке 3). В этой точке пересыщение  $S_{II}$  достигает критической величины и, несмотря на то, что система находится в состоянии термодинамического равновесия ( $J = K$ ), начинается процесс конденсации. Этот процесс идет с расширением объема ( $\Delta V = V_4 - V_3$ ) и уменьшением средней плотности. Система "перескакивает" в точку (4), понижая при этом свою температуру на  $\Delta T = T_3 - T_4$ . Это понижение температуры, согласно уравнению Клапейрона - Клаузиуса, обязано увеличению давления ( $\Delta p = p_3 - p_2$ ),  $\Delta T/T = - \Delta p/\Delta r U_K$ . Выделившееся за счет скрытой теплоты конденсации  $U_K$  тепло идет на адиабатический нагрев жидкости:  $\Delta T \sim U_K/R_g$  и  $\Delta T = T_5 - T_4$ . Система возвращается на кривую уравнения состояния (в точку 5), однако, если она "проскочит" эту точку, что вполне вероятно, то рассмотренный нами цикл повторится вновь. Если система будет подходить к точке термодинамического равновесия достаточно плавно, т.е. величина  $\Delta p = p_5 - p_4$ , должна быть малой настолько, чтобы не вызвать заметного увеличения  $\Delta T$  в точке (5), то время следующего цикла может быть сколько угодно большим ( $K \gg J$  и  $t \rightarrow \infty$ ).

Таблица 4.1

Переход:	T	p	V
0 → 1	↑	↓	0
1 → 2	↑	0	↓
2 → 3	↓	↑	0
3 → 4	↓	0	↑
4 → 5	↑	↓	0

Знаки ↑ и ↓ означают увеличение или уменьшение параметра, 0 - его постоянство.

Как следует из нашей модели и рис. 4-6-а, -б, -в, в течение цикла в системе происходит необратимое увеличение объема  $\Delta V = V_5 - V_0$  и энтропии  $\Delta S = S_5 - S_0$ . Энтропия принимает максимальные значения, когда система достигает термодинамического равновесия. На Земле, за время цикла, происходит уменьшение температуры  $\Delta T = T_5 - T_0$  и давления  $\Delta p = p_5 - p_0$ . Изменение величины давления  $\Delta p$  и следующее за ним изменение объема  $\Delta V$ , играют значительную (определяющую) роль в движении вещества ядра и мантии.

*Связь термодинамических циклов с геомагнитным полем.* Эволюционные циклы, происходящие в F-слое, имеют (в нашей модели) непосредственную связь с изменением величины и полярности магнитного поля Земли. (Генерация магнитного поля, по модели, происходит в области F-слоя). Фазовые переходы и процессы тепломассопереноса, которые здесь происходят, "трассируются" на земной поверхности свободно проникающим сквозь ядро и мантию магнитным полем. Информация о них "записана" в палеомагнитных данных в виде инверсий, изменений величин склонений и наклонений, дрейфа магнитных полюсов и т.п.

Не вдаваясь в обсуждение модели генерации геомагнитного поля, в дальнейшем будем использовать лишь те его особенности, которые помогут разобраться в термодинамике Земли. В основном, это относится к свойству магнитного поля менять свою полярность при смене цикла конденсации на цикл испарения и наоборот. Кроме

этого, как указывалось, магнитное поле легко проникает через толщу Земли и “трассирует” процессы, происходящие в области ФП, в пространстве и во времени.

Очевидно, что если явления «трассировки» действительно имеют место, и они, по сути, - электромагнитные явления, а термодинамические процессы имеют конечное (и небольшое) время, то это налагает вполне определенные условия на величину электропроводности вещества внешнего ядра и мантии. По оценкам, электропроводность не может быть выше, чем  $10 - 100 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , что исключает возможность нахождения большого (определяющего) количества железа во внешнем ядре.

*Цикличность процессов в D"-слое.* На границе ядро-мантия, по нашей модели, реализуется фазовый переход первого рода кристаллизация-плавление. Процессы, происходящие здесь, в некотором роде аналогичны тем, которые мы рассматривали для F-слоя. Действительно, кристаллизация (как и конденсация) происходит с выделением скрытой теплоты фазового перехода  $U_{\text{п}}$ , а плавление (как и испарение) - с поглощением  $U_{\text{п}}$ . При кристаллизации объем системы увеличивается, при плавлении - уменьшается, т.к. плотность вещества в расплавленном состоянии в ядре больше плотности вещества мантии. (Здесь прослеживается аналогия с системой “вода-лед”, см. Гл. V).

Аналогично предыдущему, используя уравнение Клапейрона-Клаузиуса, получаем, что при выполнении этих условий, в области фазовых переходов уменьшение давления в системе вызывает рост температуры и наоборот. Казалось бы, разумно предположить, что и на этой границе могут реализовываться эволюционные циклы, похожие на рассмотренные нами выше. Если обозначить скорость плавления через  $M$  (melting), а скорость кристаллизации через  $C$  (crystallization), в тех же единицах ( $1/\text{см}^3\cdot\text{с}$ ), то длительность такого цикла, по аналогии,  $t \sim 1/[M - C]$ , должна быть примерно в 20-30 раз больше чем длительность цикла  $J - K$ . Различие в длительностях циклов обязано тому, что процессы кристаллизации и плавления заметно медленнее конденсации и испарения, а также тому, что величина  $U_{\text{п}}$  примерно в 20 раз меньше чем  $U_{\text{к}}$ . Еще одним отличием этого цикла от рассмотренного, может служить то, что фазовые переходы первого рода кристаллизация-плавление уже не связаны с генерацией магнитного поля и они полем не “трассируются”. Возможно, явления, происходящие в области F-слоя, могут оказывать влияние на циклы, происходящие на границе ядро-мантия (т.е. в области D"-слоя). Рассмотрим этот цикл подробнее.

$pT$ -диаграмма состояния вещества может быть представлена в виде семейства кривых ( $p \sim 1/T$ ), характерных для различных удельных объемов  $V$  (средней плотности вещества D"-слоя). Эти кривые пересекает линия, показывающая распределение температуры  $dT/dp$  (рис. 4-6-2). Представим себе, что начальное состояние системы характеризуется точкой  $[0, (p_0, T_0, V_0)]$ . Охладим систему без изменения величины  $V$ . Рабочая точка переместится в положение (1) вдоль кривой  $V = \text{const}$ . Охлаждение приведет к усилению процессов кристаллизации (1→2), связанных с изменением  $V$ . Выделившаяся теплота перехода  $U$  нагреет систему (2→3, по линии  $V = \text{const}$ ). Нагрев вызовет плавление части вещества (3→4) и связанное с ним охлаждение (4→5). Цикл замкнулся. При этом произошло уменьшение температуры и давления и увеличение объема системы ( $\Delta V = V_5 - V_0$ ).

Обратим внимание на два момента. Если в рассматриваемом нами цикле, когда система находится в точке (3), каким либо способом отвести из системы расплавленное вещество, то она в большей степени, чем раньше, увеличит свой объем ( $\Delta V = V_3 - V_0$ ). (Этот случай может оказаться интересным для модели плюмов). Если на систему, в которой происходит рассматриваемый нами цикл, можно оказать внешнее влияние, например, путем изменения внешнего (относительно системы) давления, то характер цикла может измениться. Поясним сказанное на примере. Допустим, что на Земле одновременно происходят фазовые переходы в F-слое и D"-слое. Как отмечалось, импульсное давление  $\Delta p$ , возникающее в области F-слоя, передается через внешнее ядро к

D"-слою. Это давление может оказать влияние на характер фазовых переходов "плавление-кристаллизация" вещества мантии. Увеличение  $\Delta p$ , если оно происходит в фазе кристаллизации, понижает температуру кристаллизации увеличивая ее скорость и, в конечном счете, увеличивает  $\Delta V$ . Наоборот, уменьшение  $\Delta p$  в этой фазе цикла приведет к увеличению  $T$  и уменьшению  $\Delta V$ . В фазе плавления должны наблюдаться обратные явления: увеличение  $\Delta p$  понижает температуру плавления, что приводит к уменьшению объема системы и т.д.

Изменения объема системы, иначе, объема мантии, реализуются посредством гидродинамических движений (течений). Эти течения происходят под действием как внутренних, эндогенных сил (рассматриваемых нами), так и под воздействием, например, сил, связанных с вращением Земли. В конечном счете, Земля, ее ядро, мантия и кора должны быть приведены в состояние гидростатического равновесия. Механизмом реализации этого является движение сплошной среды. В частности, в геодинамике, он реализуется, как будет показано в Главе VII, как растекание поверхностного слоя литосферы.

#### IV. 6. Гидродинамика F-слоя.

Выше мы рассмотрели роль фазовых переходов (ФП) в эволюции Земли. Смена режима ФП с преимущественно конденсации над испарением (или наоборот) вызывает замену цикла расширения циклом сжатия, смену полярности геомагнитного поля и т.д. Однако представляет несомненный интерес понять, как ведет себя такая термодинамическая система как Земля в спокойные периоды времени, в промежутке между этими грандиозными событиями. Это тем более интересно, т.к. сейчас Земля, по-видимому, переживает именно такой период. Как известно, в настоящее время она находится в фазе сжатия, т.е. немного уменьшает свой радиус, а амплитуда геомагнитного поля весьма стабильна и, тоже очень понемногу, - уменьшается. Разумно допустить, что в такой ситуации  $pT$ -параметры в области ФП во времени, значительно не изменяются. Предположим, что такая термодинамическая система должна стремиться поддерживать температуру ФП на одном уровне. Очевидно, что особую роль в этом процессе играют гидродинамические и тепловые переносы, происходящие в области F-слоя. Необходимо учитывать, что все эти явления происходят на фоне постоянного охлаждения Земли.

*Уравнения теплового баланса.* Система, включающая в свой состав фазовый переход первого рода, не может быть стационарной. Даже, если в течение некоторого периода времени, смены режима конденсации на испарение (или наоборот) не происходит, система охлаждается за счет отвода тепла. Температура фазового перехода (ТФП) при заданной величине давления величина постоянная, т.к. она должна поддерживаться на одном уровне, в системе реализуется кондуктивный или конвективный теплоперенос, обеспечивающий постоянство  $T$ . В последнем случае, возникает гидродинамический перенос массы. Это, как правило, в сферической системе радиальный перенос. Однако ряд обстоятельств, связанных с неравномерностью нагрева слоя ФП и вращением Земли (рассматриваемой нами системы), приводят к появлению так называемого «теплового ветра», не равномерного по поверхности ФП. Возникновение условий для возбуждения теплового ветра следуют из уравнений теплового баланса, а его гидродинамика, - из соблюдения требований, предъявляемых к вращающемуся «тонкому слою». Запишем основные уравнения:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 \quad (4.11)$$

означает, что скорость локальных изменений плотности балансируется дивергенцией потока массы. Во вращающихся системах ( $\omega$  - частота вращения Земли) вместо него используется уравнение геострофического баланса (геострофического равновесия) между ускорением Кориолиса и градиентом давления:

$$2Wu = g \nabla h / \nabla x, \quad (4.12)$$

где  $h$  - отклонение (возмущение) от потенциальной поверхности,  $u$  – скорость гидродинамического переноса.

В системах с ФП этот баланс, возможно, не выполняется в силу того, что сам фазовый переход, когда он «заморожен» (см. ниже) может быть дивергентным.

Уравнение гидростатики:

$$p = rgh. \quad (4.13)$$

Уравнение сохранения количества движения в вязкой среде определяется вторым законом Ньютона:

$$r \nabla v / \nabla t = -grad p + rP + m \nabla^2 v + (l + m) grad div v, \quad (4.14)$$

где  $p$  – сила, приводящая систему в движение со скоростью  $v$ , в среде с вязкостью  $l$  и  $m$ .

Эти уравнения необходимо дополнить первым законом термодинамики:

$$rde/dt = -prd(r^{-1})/dt + k \nabla T + c + rQ, \quad (4.15)$$

где  $e$  – внутренняя энергия единицы массы,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $c$  – приток тепла из-за вязкой диссипации,  $Q$  – скорость потока тепла.

*Скорости сейсмических волн в F-слое.* Как и в случае с плотностью и химическим составом вещества внутреннего ядра, распределение скоростей звука (Р-волн) в области F-слоя, пограничного с внутренним ядром, неоднозначно. Воспользуемся трактовкой Джеффриса, согласно которой, скорость звука на границе F-слоя и E-ядра уменьшается от 10,4 до 9,5 км/с, а затем, возрастает до 11,2 км/с на границе F-слоя и внутреннего G-ядра. Заметим, что поведение скорости Р-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 ( $v_{жс}$ ):

$$v_{жс} = UmpV_1/R_gT(c_{p1}T)^{1/2}, \quad (4.16)$$

$V_1$  - удельный объем первой фазы. Скорость звука в паре (газе) с незначительным количеством жидкости в виде капелек ( $v_2$ ):

$$1/v_2^2 = m/RT - 2/U + c_{p2}T/U^2. \quad (4.17)$$

Сравнивая скорости  $v_{жс}$  и  $v_2$  со скоростями в жидкости и газе, видим, что они действительно меньше.

Как показано Кутателадзе и Накоряковым (1984), подобное распределение скоростей звука в смеси жидкости и газа может говорить о некоторых особенностях системы с фазовым переходом (ФП). В частности, на величины скоростей звука в двухфазной среде существенное влияние оказывает характер процессов ФП и особенности теплообмена 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 Р-волн наблюдается в области F-слоя. Это обстоятельство подтверждает нашу модель (по крайней мере, ей не противоречит), согласно которой в переходном F-слое имеет место фазовый переход первого рода “конденсация-кипение”. По-видимому, есть основания рассматривать процессы в F-слое в контексте гидродинамических явлений с ФП в земной атмосфере. Можно допустить, что в двухфазной среде в слое между внутренним и внешним ядром могут образовываться термические геострофические ветры и происходить вязкие переносы вещества.

Для сравнения, рассмотрим точку зрения на эту проблему С.И. Брагинского, который, по мнению Паркинсона (1986, стр. 169) «впервые предложил процесс затвердевания жидкого железа на границе между внутренним и внешним ядром». По мнению Брагинского (1963), внешнее ядро состоит из железа с некоторой более легкой добавкой кремния. В этой смеси больше железа, чем в эвтектике, поэтому после затвердевания твердая фаза состоит из чистого железа; в жидкой фазе остается больше легкой компоненты, и поэтому её плотность меньше плотности окружающей жидкости. Таким образом, если затвердевание происходит на границе внутреннего ядра, оставшаяся в жидкой фазе более легкая составляющая поднимается через внешнее ядро, инициируя движение жидкости в радиальном направлении. Таким образом, происходит вымораживание легкой компоненты при кристаллизации, что является источником тепла и используется для энергетического обеспечения динамо. Брагинский, так же как и в нашей модели, использует гипотезу Джеффриса о падении скорости в F-слое и объясняет этот факт увеличением плотности в слое, связанным с изменением концентрации по линии ликвидуса. Эту точку зрения разделяют многие специалисты. По моему мнению, Брагинским предложен структурный фазовый переход, о возможности использования которого речь шла в Главе I этой книги. Повторим вывод, к которому мы пришли, обсуждая задачу кристаллизации: «Полученные Лангером решения задачи Стефана показывают, что только за счет изменения концентрации примесей достичь эффекта кристаллизации невозможно. Поэтому, общепринятый в физике Земли подход к проблеме кристаллизации внутреннего ядра из расплава внешнего, по всей видимости, неверен».

*Уравнение теплового (геострофического) ветра.* Как неоднократно отмечалось, в F-слое происходит ФП «испарение-конденсация». Как будет показано в главе VI, именно в этом слое реализуется механизм генерации геомагнитного поля. Именно в этом слое обнаружена сейсмическая анизотропия. По-видимому, именно в этом слое наблюдается западный перенос анизотропии, именно в этом слое (по модели) реализуется западный дрейф геомагнитного поля, как его не дипольной составляющей, так и фокусов векового хода. В нашей модели генерации геомагнитного поля используется возможная аналогия между явлениями, происходящими в F-слое, и явлениями в атмосфере, и океане Земли. В этой связи представляет несомненный интерес найти аналогию между геофизической гидродинамикой атмосферы и океана (Педлоски, 1984) и возможными явлениями, происходящими в этом слое. Основанием для такой аналогии являются ряд обстоятельств. Во-первых, это то, что линейный размер циркуляций в F-слое (например, таких как глобальные магнитные аномалии, или фокусы векового хода) значительно превышает толщину слоя (Кузнецов, 1995). Во-вторых, известно, что в атмосфере постоянно происходят процессы конденсации-испарения воды, приводящие, в конечном счете, к возникновению электрических зарядов, разделению их в гравитационном поле Земли и образованию двойного электрического слоя. Этот процесс в атмосфере приводит к возникновению ионосферного динамо ( $Sq$ -вариации). По-видимому, примерно так же происходит генерация магнитного поля за счет динамо в F-слое. Скорость звука и температура атмосферы в области ФП понижается, аналогично тому, как это имеет место в F-слое, в третьих, и т.д. Если наша посылка справедлива, то на процессы, происходящие в F-слое, определяющее влияние оказывает вращение Земли и характер градиента давлений (барического градиента). Эти условия определяют т.н. геострофическое приближение (Гилл, 1986):

$$1/r \nabla p / \nabla x + lv = 0; \quad -1/r \nabla p / \nabla y - lu = 0;$$

где  $v, u$  – компоненты скорости геострофического ветра,  $l$  – параметр Кориолиса:

$$l = 2W \sin j.$$

Геострофическое приближение весьма грубо описывает реальную ситуацию в атмосфере, тем не менее, основные моменты, связанные с образованием и направлениями ветров, совпадают. Например, на экваторе, где  $l \rightarrow 0$ , геострофическое приближение не

выполняется, поскольку здесь градиент давления  $\nabla p / \nabla n$  не может уравновеситься силой Кориолиса (Динамическая метеорология, 1976). В этой зоне условия равновесия могут достигаться только на круговых изобарах, когда сила барического градиента уравновешивается центробежной силой. Скорость переноса определяется формулой:

$$u = (r/r \times \nabla p / \nabla r)^{1/2}.$$

Из формулы следует, что в экваториальной зоне существуют только циклонические образования, т.к. производная  $\nabla p / \nabla r$  должна быть положительной величиной.

Проводя дальнейшую аналогию между процессами, происходящими в F-слое и на поверхности Земли, в атмосфере и океане, приходим к предположению о том, что, как в атмосфере и океане, в слое между внутренним и внешним ядром явления происходят в тонком слое, а не по всей его толщине. Причина здесь та же, что и в гидродинамике атмосферы и океана. Дело в том, что вертикальные ускорения в динамике практически всегда меньше величины  $g$ . Поэтому, несмотря на то, что в F слое могут возникать течения, они всегда происходят в тонком слое. Скорость звука в F слое, как мы отмечали, ниже, чем в G и E ядре. В этой связи можно принять, что обе границы можно рассматривать (условно, конечно) как стенки. Вязкий тонкий слой у «стенки», в котором происходит перенос вещества, называется экмановским слоем. Число Экмана  $E$  характеризует отношение силы трения к ускорению Кориолиса:  $E = \nu / 2WL^2$ . Если коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  порядка  $10^6$  см  $с^{-2}$  (Кузнецов, 1995), а характерный размер вихря в экмановском слое 100 км, то  $E = 10^{-4}$ . Конечно, эта оценка примерно на 10 порядков больше, чем экмановское число в океане (Педлоски, 1984), но, тем не менее, оно значительно меньше единицы и говорит о том, что для крупномасштабных движений силами трения можно пренебрегать.

Если:  $L/V > W^{-1}$ , где  $W$  - частота вращения Земли,  $L$  – линейный размер циркуляций, а  $V$  - скорость течения, то это условие эквивалентно:

$$e = V/2WL < 1,$$

где  $e$  - число Россби. Оценка числа Россби в F-слое, если положить  $L$  равным примерно 100-1000 км, а  $V$  равной скорости западного дрейфа ( $\approx 0.1-1$  °/год, или, для F-слоя, это  $\approx 0.01-0.1$  см/с) показывает, что это условие выполняется и процессы, здесь происходящие, можно рассматривать как гидродинамику в тонком слое. Определяющей в этом случае является сила Кориолиса, а вращение слоя в очень малой степени отличается от твердотельного.

Считается, что горизонтальный градиент давления в атмосфере и океане обязан неравномерности температуры тонкого слоя. Именно наличие градиента температуры является причиной постоянных, западных и восточных ветров в атмосфере и течений в океане. Как известно, смена направления ветров происходит синхронно со сменой времени года. В F слое, по всей видимости, так же существуют ветры: один из них имеет западное направление, другой – восточное. Один существует в слое, расположенном около внешнего ядра, другой – около внутреннего. Если допустить реальность такого предположения, то многие вопросы физики Земли находят простое и непротиворечивое объяснение. В частности, объясняется обнаруженное недавно с помощью splitting функций отсутствие дифференциального вращения внешнего ядра, с одной стороны, и явное наличие какого-то переноса в области границы внутреннего ядра, отмеченное при проведении экспериментов по travel-time. Можно упомянуть западный перенос фокусов векового хода, перемещающихся в F слое (см. Главу 6) и т.д. Наличие двух ветровых переносов, направленных в противоположные стороны, может оказаться основой в динамо-модели генерации геомагнитного поля.

Имеются ли основания для подобного утверждения? Для того чтобы утверждать, что гидродинамический перенос происходит в непосредственной близости от «стенки» – будь то внутреннее «твердое» ядро, или слабо вязкое (но жидкое) внешнее ядро, необходимо найти причину возникновения необходимых условий. Одно из таких условий мы отмечали, - это неравномерный нагрев внутреннего ядра и возникновение избыточного



тангенциального давления. Однако этого не достаточно, необходимо найти причины, по которой "струя" будет прижиматься к стенке. Согласно нашей модели, около внутреннего ядра вещество находится в состоянии «капель в пересыщенном паре», около внешнего ядра, - в состоянии «пузырей пара в кипящей жидкости». Ближе к «стенке» размеры «капель» и «пузырей» - будут больше. Воспользуемся хорошо известным подходом, развитым Чепменом и Энскогом в кинетической теории газов, когда они уподобляли газовые молекулы жестким упругим шарам, размером  $d$ . Вязкость такой среды  $h$ :  $h \approx 0.5rv/2\pi nd^2$ . Здесь  $v$  – тепловая скорость молекул,  $n$  – их концентрация. Вязкость среды тем меньше, чем больше размер частиц. Этот факт может объяснить прижим гидродинамического переноса к «стенке». Кроме этого, этот факт может объяснить сравнительно небольшую величину вязкости ( $n < 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$ ), полученную из условия ограничения толщины экмановского слоя (Кузнецов, 1995).

## Выводы

Обсуждая один из самых главных и принципиальных вопросов физики Земли, - её термодинамику, никогда нельзя быть уверенным в том, что все, или, по крайней мере, большинство из проблем решены и достигнута требуемая ясность. Подводя итоги четвертой главы, можно отметить ряд моментов, установленных с достаточной, на мой взгляд, «прочностью».

Во-первых, это то, что адиабата Пуассона в принципе неприменима для такой структуры, как Земля, а использование адиабаты Гюгионо автоматически приводит нас к модели горячей Земли.

Во-вторых, только горячая модель, где постулируется идея охлаждения Земли, может «обеспечить» наличие циклов, так уважаемых геологами.

В-третьих, положенная в основу модели идея фазового перехода на границе внутреннего ядра, может оказаться весьма плодотворной, так как она дает исследователю единый источник теплового потока, дрейфа материков, геомагнитного поля и т.п. В нашей модели, система стремится поддерживать постоянной температуру ФП. Этот факт, как будет показано в шестой главе, обеспечивает практически все свойства геомагнетизма, которые, собственно, имея термодинамическую причину, геомагнитным полем только «трассируются».

Ряд вопросов, обсуждаемых нами в этой главе, имеет явно дискуссионный характер. В первую очередь, и в основном, это относится к идее использования плазма-кристалла, как вещества внутреннего ядра. Оправдывающим автора обстоятельством является тот факт, что никакого другого, более подходящего состояния вещества в природе, по-видимому, нет, или оно физикам (или автору) ещё не известно. Свойства вещества внутреннего ядра столь экзотичны, что пришлось пойти на такой шаг. Железо категорически не подходит в качестве материала для внутреннего и внешнего ядра. Никакие добавки к железу не спасают этого положения, так как иначе приходится нарушать законы термодинамики.

## *Литература.*

Басов Н.Г., Захарченков Ю.А., Зорев Н.Н. и др. Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером. Итоги науки и техники. Сер. радиотехника Т. 26. М.: ВИНТИ 1982. 365с.

Брагинский С.И. О строении слоя F и причинах конвекции в ядре Земли. ДАН СССР. 1963. Т. 149. № 6. С. 1311-1314.

Бражкин В.В., Ляпин А.Г. Универсальный рост вязкости металлических расплавов в мегабарном диапазоне давлений: стеклообразное состояние внутреннего ядра Земли. УФН. 2000. Т. 170. № 5. С. 535-551.

Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир. 1986. 397 с.

Динамическая метеорология. Под ред. Д.Л.Лайхтмана. Л.: Гидрометеиздат 1976. 607 с.

Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высоко температурных гидродинамических явлений. М.: Наука. 1966. 686 с.

Климонтович Ю.Л. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем. УФН. 1996. Т. 166. № 11. С. 1231-1243.

Кузнецов В.В. Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности. Новосибирск: ИГиГ. 1985. 71 с.

Кузнецов В.В. Глобальные магнитные аномалии и фокусы векового хода как гидродинамические вихри Россби. ДАН. 1995. Т. 340. № 5. С. 685-687.

Кузнецов В.В. Земля как термодинамическая система. Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 7. С.987-1007.

Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газо-жидкостных системах. Новосибирск: Наука. 1984. 301 с.

Кюнц Г-У. Механические свойства металлических стекол. В сб. Металлические стекла. Вып. II (Под. ред. Г. Бека и Г. Гюнтеродта) М.: Мир. 1986. С. 199-255.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука. 1964. 567 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 733 с.

Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 379 с.

Мясников В.П., Фаддеев В.Е. Модели эволюции Земли и планет земной группы. М.: ВИНТИ. 1980. 232 с.

Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир. 1986. 527 с.

Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. М.: Мир. 1984. 811 с.

Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 345 с.

Boehler R., von Barga N., Chopelas A. Melting, thermal expansion, and phase transitions of iron at high pressures. J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N. B13. P. 21731-21736.

Boehler R. Temperatures in the Earth's core from melting-point measurements of iron at high static pressures. Nature. 1993. V. 363. P. 534-536.

Brown J.M., McQueen R.G. Phase transitions, Gruneisen parameter, and elasticity for shocked iron between 77 GPa and 400 Gpa. J. Geophys. Res. 1986. V. 91. N. B7. P. 7485-7497.

Duba Al. Earth's core not so hot. Nature. 1992. V. 359. P. 197-198.

Grover R. Experimental and theoretical constraints on the iron equation of state. J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N. B13. P. 21743-21748.

Mao H.K., Wu Y., Chen L.C. et al. Static compression of iron to 300 Gpa and Fe<sub>0.8</sub> Ni<sub>0.2</sub> alloy to 260 Gpa: implications for composition of the core. J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N. B13. P. 21737-21742.

Saxena S.K., Shen G., Lazor P. Temperatures in Earth's core based on melting and phase transformation experiments on iron. Science. 1994. V.264. P. 405-407.

Thomas H., Morfill G.E., Demmel V., et al., Plasma crystal: coulomb crystallization in dusty plasma. Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. N. 5. P. 652-655.

Van Horn H.M. Dense astrophysical plasmas. Science. 1991. V.252. P. 384-389.

Wigner E.R. On the interaction of electron in metals. Phys. Rev. 1934. V. 46. P. 1002-1100.

## Глава IX. СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

Традиционный подход к проблеме солнечно-земных связей, т.е. взаимосвязи геооболочек, ограничивается рассмотрением влияния Солнца на магнитосферу, ионосферу, атмосферу, океан и литосферу, вернее на её самую верхнюю оболочку, хотя иногда это влияние пытаются находить даже в сейсмичности Земли. На общем грандиозном фоне фундаментальных работ в области физики Солнца и солнечно-земных связей, физики атмосферы и океана, физики сейсмичности и вулканизма, эта проблема не получила должного внимания, соответствующего её важности. Нельзя отрицать колоссальной роли Солнца во многих процессах, происходящих на Земле, однако, в ряде ситуаций ведущую роль во взаимосвязи геооболочек играют эндогенные, внутри земные процессы и явления. Огромная роль в этих процессах отводится геомагнитному полю, которое, меняя свою интенсивность и даже полярность, «контролирует» многие явления, происходящие на Земле, «управляя» потоком высокоэнергичных частиц, поступающих на Землю в те моменты, когда поле практически исчезает. Ещё одним из наиболее ярких примеров, показывающих преимущественную роль Земли в процессах, происходящих в атмосфере, океане, ионосфере, - это комплекс явлений, связанных с сейсмичностью и вулканизмом.

В качестве «агентов», связывающих геооболочки, принято рассматривать модифицированные в гелиосфере космические лучи, как солнечные, так и галактические. Различные электромагнитные явления, в частности, ОНЧ и атмосферное электрическое поле, а так же упругие волны, которые могут рассеиваться и возбуждаться на границах оболочек Земли и излучаться в атмосферу, как акустические, - так же рассматриваются как «агенты». Нельзя забывать и о вулканизме, особенно о роли извержений супервулканов, которые являются одной из главных причин похолодания климата и оледенений. В последние годы обнаружилось, что практически все геофизические объекты: ландшафты и береговые линии, облака и магнитосферные возмущения, землетрясения, извержения вулканов и солнечные вспышки, а так же космические лучи, - фрактальны. С одной стороны, это означает, что всех их можно, в определенном смысле, представить как результат самоорганизующихся процессов, происходящих в Природе, а с другой, - все они находятся во взаимосвязях между собой и Солнцем, подчас не слишком явных и скрытых от пытливого взгляда наблюдателя.

### IX. 1. Фрактальные свойства Земли и связь геооболочек.

Модель горячей Земли, о которой идет речь в этой книге, базируется на теснейшей взаимосвязи геооболочек. По модели: внутренне ядро связано с внешним, посредством реализации процессов «конденсация-испарение», происходящих в F-слое; внешнее ядро – с мантией, посредством происходящих в D”-слое явлений «кристаллизация-плавление». Термодинамические явления и процессы, происходящие в F-слое, где, по модели, осуществляется генерация геомагнитного поля, «маркируются» магнитным полем и мы регистрируем их как джерки, фокусы векового хода, инверсии и т.п. Сейсмичность и вулканизм Земли, согласно нашей модели, являются своеобразным «инструментом», направленным на то, чтобы «исправить» её форму, искаженную во время циклов расширения и сжатия. Эти явления теснейшим образом связаны с движениями литосферы. Посредством этих явлений на Земле реализуется принцип минимизации гравитационной энергии, приводящий к тому, что Земля стремится «быть» более компактной, а её форма – в большей степени соответствовать скорости её вращения. Растекание литосферы, с одной стороны, и сейсмичность и вулканизм, с другой, являются «участниками» происходящих на Земле процессов самоорганизации. На Земле можно видеть теснейшую связь между структурой внутреннего ядра, мантии и высоты геоида и т.п.

В этом разделе мы остановимся на некоторых работах автора, имеющих отношение к процессам самоорганизации на Земле и взаимосвязи её оболочек, которые, по той или иной причине, не рассматривались нами подробнее. Тем не менее, упоминание об этих

работах дополняет общую картину взаимосвязи верхних геооболочек и ещё глубже раскрывает физику Земли и планет.

**Фликкер-шум в природных явлениях.** Практически все процессы и явления, происходящие в Природе, в том числе и на Земле, случайны и уподоблены шуму. Однако, это не хорошо известный нам т.н. «белый» шум, когда система каждый раз начинает заново и не «помнит» о своих предыдущих действиях. В Природе преобладает другой принцип, согласно которому, процессы случайны, но система помнит, что произошло с ней раньше. Этот алгоритм носит название «фликкер-шум». Временные и пространственные события, происходящие в системе, реализующей алгоритм фликкер-шума, фрактальны. Они сопряжены с самоорганизацией процесса, а сами фракталы-кластеры возникают в системе, как реакция на процессы переноса и перколяции, и как продукт деятельности механизмов, препятствующих переносу и перколяции. Эти процессы характеризуются линейной зависимостью между логарифмом энергии события и логарифмом частоты его появления, а так же высокой степенью пространственной и временной масштабной инвариантности процессов (scaling). В качестве примера природного фликкер-шума, обычно приводят известный закон повторяемости землетрясений и извержений вулканов. Похожий закон характеризует, например, зависимость полной энергии излучения вспышек на звездах, в том числе и на Солнце (рис. 9-1), аналогичные зависимости характерны для спектров галактических космических лучей и т.п. По-видимому, первыми, кто обратил внимание на этот закон, были египтяне, которые обнаружили, что интенсивность разливов Нила, - обратно пропорциональна их частоте. Всё это говорит об универсальности в Природе такого явления, как фликкер-шум.

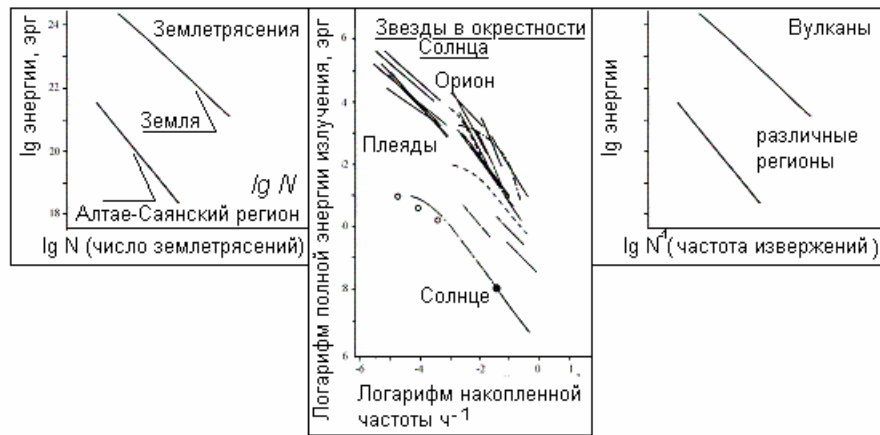


Рис. 9-1. Повторяемость землетрясений, энергетические спектры вспышек, частота извержений вулканов (Кузнецов, 1992).

**Баланс энтропии.** Определяющую роль энтропии и неэнтропии (отрицательной энтропии) в процессе самоорганизации планет Солнечной системы вскрывает Изаков (1997). Для планеты притоком и оттоком массы можно пренебречь, а в энергетическом балансе рассматривать только приток солнечной радиации  $\Phi_c$ , поглощенной планетой и отток инфракрасной радиации  $\Phi_n$ . Это справедливо для планет земной группы, где поток тепла из недр пренебрежимо мал по сравнению с радиационными потоками:

$$B = \Phi_c - \Phi_n = f_c(1 - A) \pi R^2 - 4 \pi R^2 f_n \tag{9.1}$$

Здесь  $f_c$  – поток солнечной радиации на единицу площади,  $A$  – альбеда планеты,  $R$  – её радиус,  $f_n = sT^4$  – поток инфракрасной радиации, испускаемый с единицы площади планеты,  $T$  – равновесная температура. Многолетние измерения потоков радиации с

помощью приборов, установленных на спутниках, показали, что энергетический баланс Земли в среднем за год близок к нулю, т.е. приток и отток энергии примерно равны. Из уравнения 9.1 видно, что при увеличении солнечного потока увеличивается и планетный поток, обеспечивая, таким образом, примерное постоянство климатических условий на планете.

Изаков задает вопрос, что же расходуется в планетарных процессах, в которых перерабатывается огромное количество энергии и вещества и отвечает на него, доказывая, что расходуется получаемая планетой негэнтропия.

Если считать, что спектры солнечной и планетарной радиации близки к спектрам радиации абсолютно черного тела, то приток негэнтропии на планету равен:

$$\Delta S = 4/3(\Phi_c/T_c - \Phi_n/T_n). \quad (9.2)$$

Температура Солнца  $T_c$  ( $T_c = 5780$  К) всегда больше чем температура тепловой радиации планеты  $T_n$  (для планет земной группы  $T_n = 211 - 441$  К), следовательно, на любой планете всегда есть отток энтропии  $\Delta S < 0$  и приток негэнтропии  $\Delta N = -\Delta S$ , которая расходуется во всех процессах, происходящих на планете. Физика этого явления не раскрывается, однако, как следует из нашей модели, под этим понятием можно иметь в виду, условно, конечно, теплоту фазового перехода  $U$ .

Представим себе, что изменилась величина  $T_c$ , хотя величина солнечной постоянной  $f_c$  осталась прежней. Согласно формулам 9.1 и 9.2, Земля будет получать тот же приток энергии, но меньший приток негэнтропии. При этом многие процессы на Земле могут пойти по другому сценарию. Например, фотоны, приходящие на Землю окажутся неспособными обеспечить фотосинтез и биосфера будет совсем другая, отличная от настоящей. Таким образом, негэнтропия, в этом случае, уже выражает качество притока энергии.

На Земле по данным спутниковых измерений:  $f_c = 1368$  Вт м<sup>-2</sup>,  $A = 0.29$ ,  $T_c = 5778$  К,  $T_n = 254$  К. Приток негэнтропии на Земле  $\Delta N = 6.2 \times 10^{14}$  Вт К<sup>-1</sup>; на Венере -  $\Delta N = 4.0 \times 10^{14}$  Вт К<sup>-1</sup>; на Марсе -  $\Delta N = 9.9 \times 10^{13}$  Вт К<sup>-1</sup>. Приток негэнтропии расходуется на поддержание теплового баланса планеты, на что идет примерно 70% негэнтропии, приходящей на Землю. Около 25% притока негэнтропии расходуется на испарение воды с поверхности океанов. Водяной пар, поднимаясь в атмосфере, конденсируется, создавая облака, переносимые ветром на сушу, и выпадающие осадки обеспечивают водой биосферу. В этом процессе принимает участие примерно  $5 \times 10^{14}$  т воды в год. (Как будет показано в следующем разделе, этот процесс приводит к возникновению атмосферного электричества и “контролю” его полярности). Из этих оценок следует, что на всю динамику атмосферы и океана, включая все потоки массы и тепла в атмосфере и океане, цунами, ураганы и тому подобные явления, расходуется не более 5% пришедшей на Землю негэнтропии. Кстати, на Венере, где вода отсутствует, на динамику атмосферы расходуется большая часть приходящей негэнтропии.

Такие процессы и явления на Земле, как парниковый эффект, гидрологический цикл воды, общая циркуляция атмосферы и океана, а также ряд других, - по сути, диссипативные структуры, поддерживаемые притоком негэнтропии и слагающие единую самоорганизующуюся систему, характеристикой которой является климат Земли.

*Фрактальность климата.* Проблема изменений климата продолжает волновать ученых, т.к. она не находит простого и логичного объяснения. Парниковый эффект, причем, принято считать, что решающую роль здесь всегда играла его антропогенная компонента, был до недавних пор основным фактором, на базе которого строили объяснения изменений климата. В последнее время специалисты пришли к общему мнению, что обнаружить антропогенный вклад на фоне мощных естественных колебаний климата, по-видимому, не удастся. Этот вывод показывает, что необходимо пересмотреть ряд прошлых концепций. К аналогичному выводу подталкивают и новые данные по климату. Об этом – ниже в этой главе.

Метеорологи выделяют ряд областей, в которых климат постоянно становится суше и холоднее. Таких областей примерно 1/3 от общего числа. В другой трети регионов Земли становится теплее и влажнее, а в последней трети изменений климата вообще не наблюдается. Размеры регионов с однородным изменением климатических условий имеют широкие пределы, что может говорить о скейлинговых свойствах процессов изменения. Потепление климата сказывается на нарушении циркуляции крупнейших теплых течений мира Гольфстрима и Курошио, а это, в свою очередь, приводит к похолоданию в умеренных широтах. Последнее обстоятельство можно истолковать как признаки процессов самоорганизации системы формирования климата, а сами регионы считать фрактальными структурами. (Как известно, наличие фракталов-кластеров приводит к ограничению влияния процессов переноса).

Одним из наиболее значимых и представительных временных рядов климатических вариаций является известный ряд средних месячных температур в Центральной Англии за 1659-1674 гг., опубликованный Гордоном Мэнли и продолженный затем, как в прошлое, до 1400 г (по годовым кольцам деревьев), так и до наших дней. Эта зависимость, после исключения сезонных колебаний и пятилетнем осреднении, представляет собой «белый шум». Если период осреднения данных увеличить до 30 лет (Монин, Шишков, 1998), то спектральная плотность ряда имеет вид «красного» – фликкер-шума ( $1/f$ ). Этот пример показывает ещё раз, что климат фрактален, более того, характерное время самоорганизации климатической структуры оказывается порядка 30 лет. Ниже будет показано, что в масштабе в нескольких сотен тысяч лет – климат «контролируется» геомагнитным полем и, вместе с тем, обладает ярко выраженными фрактальными свойствами. Здесь нет парадокса, т.к. и сами инверсии и экскурсы так же фрактальны.

*Явление Эль-Ниньо-1982.* При изучении уникального явления Эль Ниньо 1982-83 г., С.Ю. Хомутовым (1997) была исследована корреляция глобальных параметров Земли и параметров околоземного пространства. Событие, получившее название «Эль Ниньо» (ЭН), состоит в нарушении нормального цикла циркуляции атмосферы и гидросферы в тропической и субтропической областях южной части Тихого океана. Это явление считается отрицательной фазой Южного колебания, оно сопровождается широкомасштабными аномальными климатическими процессами. Естественно ожидать, что такие глобальные временные возмущения в системе «атмосфера – океан» могут найти отражение и в других геофизических процессах и полях: с одной стороны, как следствие причин, порождающих ЭН, с другой, - как результат его воздействия.

Хомутов сопоставил временные серии ряда параметров, представляющих состояние различных геоболочек. Качественный анализ показал наличие практически во всех данных синхронного во времени возмущения в период 1982-83 гг., совпадающего с наиболее сильным за последнее столетие событием ЭН. Значительно менее ярко выражены аномальные вариации в эпоху ЭН 1972-73 гг. и продолжительного ЭН, начало которого приходится на 1991 г. Месячные значения таких параметров, как: поток солнечного радиоизлучения на частоте 2800 МГц ( $F$ ), плотность плазмы солнечного ветра  $n$  в  $\text{см}^{-3}$  и оценка потока его энергии через магнитопаузу  $nV^3$  в  $10^6 (\text{км/с})^3 \text{см}^{-3}$ , где  $V$  – скорость плазмы, интенсивность космических лучей по данным мониторов Новосибирска и Клаймэкса,  $aa$ - и  $Dst$ -индексы геомагнитной активности, среднее по 13 станциям значение вертикальной составляющей магнитного поля Земли, индекс Южного колебания SOI, продолжительность суток  $dP$ , параметры сейсмической активности и количество землетрясений в районе желобов Тонга-Кермадек – оказались скоррелированными.

Полученные Хомутовым результаты позволяют предположить, что вероятной причиной наиболее геоэффективных Эль-Ниньо является приток солнечной энергии в магнитосферу и ионосферу с последующим переносом возмущений в систему «атмосфера-океан» и к внутренним оболочкам Земли.

*Влияние границы океан-материк на ОСО.* До недавних пор специалисты метеорологи полагали, что глобальное распределение общего содержания озона (ОСО), в частности, известные т.н. озоновые дыры, в значительной степени определялось наличием на Земле урбанического фактора. Иначе, считалось, что ОСО зависело от деятельности человека. Причем, у многих, кто не соглашался с таким подходом, всегда вызывало недоумение объяснение причины возникновения озоновых дыр в Антарктиде с помощью фреонов, связанных с антропогенной активностью. По-видимому, нельзя полностью исключать этот фактор в динамике ОСО, но, не думаю, что он по своему влиянию может сравниться с пространственными и временными флуктуациями, связанными с атмосферными переносами.

В последнее время появились сообщения о связи ОСО с орографическими особенностями планеты, в частности, с границей материк-океан (Казимировский, Матафонов, 1998). Использовались данные спутниковых измерений ОСО, в частности, с помощью бортового спектрометра TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). На картах, построенных с использованием данных TOMS достаточно четко видны контуры Африки, Аравийского полуострова, Красного моря, Индии; видны Гималаи, Кордильеры, Скалистые горы и т.п. Физический механизм континентальных и орографических эффектов в распределении ОСО пока неизвестен. Авторы полагают, что причина явления может быть как во влиянии восходящих воздушных потоков, так и распространении вверх внутренних гравитационных волн, возникающих при столкновении воздушных потоков с горными хребтами. Это ещё один пример связи между геоболочками: озоном и земной поверхностью. Здесь явно прослеживается масштабный фактор, т.к. при наблюдении ОСО в районе Сибири, в частности, Байкала, такого эффекта не наблюдается (Кашкин и др., 1997). Возможной причиной не сопоставимости орографических особенностей в случае исследования озона в Сибири является то, что в этом случае измерения ОСО велись на приборе HIRS ИК-диапазона, в то время как спектрометр TOMS работает в УФ диапазоне.

*Фрактальность и самоорганизация магнитосферы.* Как следует из предыдущего, в атмосфере Земли, контролируемой Солнцем, если нет дополнительных связей, например, с океаном через механизмы конденсации-испарения, - самоорганизующихся структур не возникает. Наши попытки найти «следы» самоорганизации в озоносфере, ионосфере и магнитосфере не привели к желаемым результатам. Тем не менее, Barraclough и De Santis (1997) обнаружили в вековых вариациях геомагнитного поля за период с 1647 по 1990 гг. фрактальную структуру, что может говорить о наличии процессов самоорганизации в магнитосфере. Процессы самоорганизации в магнитосфере в периоды спокойного Солнца были обнаружены группой М.И.Пудовкина (Урицкий, Пудовкин, 1998). Авторы показали, что низкочастотные флуктуации АЕ-индекса геомагнитной активности обладают спектром мощности вида фликкер-шума ( $1/f^b$ ). Была предложена гипотеза механизма генерации флуктуаций такого типа в токовом хвосте магнитосферы, основанная на представлениях о возможной роли самоорганизованной критичности.

Анализ вековых вариаций компонент геомагнитного поля, измеренных на трех канадских обсерваториях: Resolute Bay (находится в области полярного каспа, polar cap), другая, - Fort Churchill (в области овала полярных сияний), а третья, Ottawa (в субавроральной зоне), показал, что отношение мощности возмущений к их амплитуде (в log-log координатах) всегда показывало степень, равную  $2 (\pm 2\%)$ . Это обстоятельство говорит, скорее всего, о том, что фрактальности (которая характеризуется дробной степенью размерности) – не наблюдается. Полученный результат (Boteler, 1998) подтверждает наши выводы относительно того, что в земных оболочках, где нет фазовых переходов и активной взаимосвязи с океаном, нет и процессов самоорганизации. Если в системе, например, в магнитосфере, нет сильной зависимости процессов от Солнца, и есть

причины возникновения сильной положительной обратной связи между явлениями различной природы, то возникают процессы самоорганизации. Как правило, в такой системе можно выделить взаимодействующие друг с другом механизмы диффузии и протекания. Один из примеров самоорганизации был рассмотрен нами в главе VI, при обсуждении уникального явления возникновения долгоживущих вихрей в атмосферах Юпитера и Сатурна. На Земле, где атмосфера «контролируется» Солнцем, таких вихрей не образуется.

*Механизмы взаимосвязей геоболочек.* Обилие различного рода корреляционных связей, обнаруживаемых авторами при анализе данных геофизических параметров, находится в явном противоречии с недостатком физически прозрачных механизмов этих взаимосвязей. Как правило, явления, происходящие на Земле, в её недрах и окружающих её оболочках, многопараметрические. Сильные связи между различными параметрами практически никогда не наблюдаются, а если они есть, то это, как правило, связано с влиянием Солнца. Поведение таких оболочек Земли как магнитосфера, ионосфера, озоносфера, в значительной степени «контролируются» Солнцем и вращением Земли. Такой интересный параметр, как унитарная вариация (подробнее ниже, в следующем разделе), показывает влияние Солнца на атмосферное электричество, ионосферу и магнитосферу, находящиеся в спокойном состоянии. Если в этих оболочках Земли происходят сильные вариации и возмущения, то унитарной вариации не наблюдается. По-видимому, этот параметр может служить показателем «нормального» состояния геоболочек, возможно, проявление этой вариации показывает, что в системе не происходят процессы самоорганизации. Несмотря на то, что эта вариация достаточно хорошо изучена, однозначного механизма её проявления на Земле, так и не придумано.

IX. 2. Идеи самоорганизованной критичности в атмосфере и климате.

*Фрактальность облаков.* В качестве одного из примеров самоорганизации, рассмотрим физику образования облаков, т.е. капель воды в атмосфере, с точки зрения подходов, развиваемых в открытых самоорганизующихся системах. Правомочность такого подхода очевидна, т.к. образование капель, их дальнейший рост за счет коагуляции и уменьшение их размеров за счет процессов испарения, - это явления нестационарного фазового перехода первого рода. Как известно, такие переходы являются предметом изучения открытых самоорганизующихся систем, временной и пространственной «срез» которых, представляет собой фрактальную структуру. С другой стороны, известно и хорошо экспериментально изучено явление фрактальности облаков (Федер, 1991; Lovejoy, 1982), хотя физика этого явления так и не понята. Фрактальность облаков описывается формулой, в которой периметр  $P$  задается как корень квадратный из площади  $A$ , возведенный в степень  $D$ : ( $P \sim A^{D/2}$ ), где  $D$  интерпретируется как фрактальная размерность периметра. Делается вывод, что периметры облаков и областей дождя являются фракталами, т.к. они не имеют характеристического масштаба горизонтальной длины в диапазоне от единиц километров до 1000 км.

Воспользуемся стандартным подходом к проблеме устойчивости капель в облаке, а так же используем алгоритм самоорганизованной критичности, и покажем, что оба этих приема в сумме, возможно, дают правильное понимание фрактальности облаков.

Для вычисления скорости испарения  $a_g$  используется термодинамическая формула Кельвина-Гиббса, определяющая равновесное давление пара  $p$  над каплей критического размера, содержащей  $g^*$  молекул:

$$\ln(p/p_{\text{н}}) = 8\pi/3 (3\nu/4\pi)^{2/3} (S/kT) g_*^{-1/3}, \quad (9.3)$$

где  $p_{\text{н}}(T)$  - давление насыщенного пара при температуре  $T$ ,  $k$  - постоянная Больцмана,  $S$  - коэффициент поверхностного натяжения,  $\nu$  - объем молекулы жидкости, пересыщение пара  $S = (p/p_{\text{н}})$ , а  $p$  - давление пересыщенного пара.



Скорость испарения кластера  $a_g$  при малых  $g$ , быстро возрастает при уменьшении его размера:

$$a_g \sim g^{2/3} \exp(-U_g/kT), \quad (9.4)$$

где  $U_g$  - энергия связи молекулы в кластере. Скорость присоединения (конденсации, коагуляции) молекул пара к критическому зародышу:

$$b_g \sim g^{2/3}, \quad b_g = an(kT/2\pi m)^{1/2} \cdot 4\pi(3v/4\pi)^{2/3} g^{2/3}, \quad (9.5)$$

здесь  $a$  - коэффициент конденсации,  $n$  - плотность пара,  $m$  - масса молекулы,  $v$  - ее объем в жидкой фазе. Условие локального минимально-стабильного состояния системы:

$$a_g = b_g.$$

Это условие справедливо как в целом для системы из  $N$  капель, так и для одной из них. Оно показывает, что размер капли не меняется. Если для какой-либо капли оно не выполняется, капля может либо испариться ( $a > b$ ), либо коагулировать ( $a < b$ ). Давление пара в окрестности этой капли изменится, что приведет к нарушению термодинамического равновесия для соседних капель. Капли начинают либо коагулировать, если первая капля стала испаряться, либо - испаряться, если первая - коагулировала. Равновесие системы нарушается и все более отдаленные, от первой, капли вступают в этот процесс, который можно уподобить процессу падающих домино. Процесс развивается лавинообразно до тех пор, пока образовавшиеся кластеры из капель не станут препятствовать его распространению. На границе этих кластеров выполняется условие: ( $a = b$ ). Однако, система, в которой выполняется это условие, заметно отличается от системы в локально стабильном состоянии, в которой это условие выполнялось в целом. В первом случае принято считать, что такая система находится в состоянии самоорганизованной критичности, во втором - это уже фрактальная структура, обладающая свойствами пространственно-масштабной инвариантности (scaling). По характеру распределения размеров кластеров (фракталов) можно судить о величине фрактальной размерности структуры ( $D \sim t^{-a}$ ) и степени при частоте  $\omega$ , в формуле спектральной мощности:

$$S(\omega) = \int dt (tD(t) / [1 + (\omega t)^2]) \gg \omega^{-2+a}, \quad (9.6)$$

здесь  $t$  ("временной масштаб") - частота "встречаемости" фракталов определенных размеров, " $1/\omega$ " - динамический отклик системы на малые случайные возмущения (фликкер-шум).

Наша модель, в первом приближении, представляет собой ячеистый автомат (cellular automaton), описывающий взаимодействие некоторой целой переменной  $z$  с его ближайшими соседями. В двумерном случае, если  $z$  превышает критическое значение  $k$ , то  $z$  изменяется следующим образом (Bak et al., 1987):

$$\begin{aligned} z(x, y) &\rightarrow z(x, y) - 4, \\ z(x \pm 1, y) &\rightarrow z(x \pm 1, y) + 1, \\ z(x, y \pm 1) &\rightarrow z(x, y \pm 1) + 1. \end{aligned} \quad (9.7)$$

В системе нет других, кроме  $z$ , параметров, т.к. изменение  $k$  приводит к изменению  $z$ . Используется граничное условие  $z = 0$  на границе. Начальное состояние системы  $z \gg k$ . После этого она развивается до тех пор, пока все  $z$  не станут меньше  $k$ . Затем динамика развития исследуется посредством измерения отклика системы (количества и размера фракталов) на случайные локальные возмущения. Под переменной  $z$  можно, согласно (Bak et al., 1987), подразумевать любой динамический параметр системы. В рассматриваемом нами случае, это может быть, например, масса  $m$  или размер капли  $r$ , которые либо увеличиваются, при  $a < b$ , либо уменьшаются, при  $a > b$ .

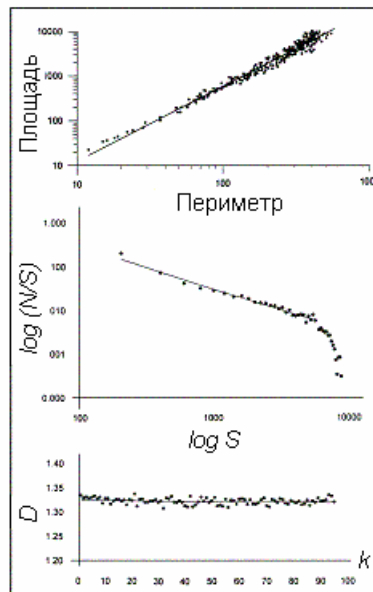


Рис. 9-2. Размерность синтезированного ряда кластеров-облаков.

Компьютерное моделирование проводилось Г.В.Нестеровой в ИГФ (Новосибирск) по схеме, предложенной Баком и др. (алгоритм 9.7). Случайным образом задавался двумерный массив целых чисел - матрицу из  $100 \times 100$  элементов. Выбиралось критическое число  $k$  ( $k = 10$ ), значения чисел в двумерном массиве были значительно больше, чем  $k$  (100 - 200). Процедура (9.7) повторялась до тех пор, пока все элементы матрицы не окажутся меньше или равными  $k$ . Мы считали, что получившийся массив находится в критическом состоянии. После этого, в выбираемую компьютером точку с координатами  $(x, y)$  и амплитудой  $z$ , добавляется “возмущение”, величина которого равна, например, 2 (или 3, 4, и т.д.). После этого вновь применяется процедура (9.7) до тех пор, пока все значения матрицы не окажутся меньше 10. Компьютер запоминает все точки матрицы, в которых менялось значение  $z$ , т.е. те точки, в которых изменения претерпели “воздействие” от вынуждающего “возмущения”. Сумма этих точек и представляет собой кластер. Вычисляется его площадь  $A$ , как сумма клеток, и периметр  $P$ , т.е. число точек, рядом с которыми имеются “пустые” клетки матрицы не претерпевшие изменений. После того, как процесс образования кластера закончится, компьютер “выбирает” другую точку (клетку), в которую вновь добавляется “возмущение” и процесс образования следующего кластера повторяется.

В результате многократного повторения этой процедуры выявляется ряд пар чисел  $A$  и  $P$ , что позволяет оценить  $E$  и  $D$ . Большая статистика экспериментов продемонстрировала устойчивое значение  $E = 1.54 \pm 0.006$  и, соответственно,  $D = 1.32$  (рис. 9-2). Исследование облаков показало (Федер, 1991; Lovejoy, 1982; Рис, Вальдфогель, 1988), что они фрактальны. Фрактальная размерность  $D$  периметра сечения облака величина, близкая  $D \approx 4/3$  для очень широкого класса облаков (дождевых, грозовых и пр.) различных размеров. Изменяя размер облаков в широком интервале (площадь изменялась на 6 десятичных порядков) площадь контура облака  $A$  связана с его периметром  $P$  соотношением:  $A = A_0 P^E$ . Где показатель  $E$  связан с фрактальной размерностью облака соотношением  $E = 2/D$ . Это приводит к выводу, что в атмосфере отсутствуют пространственные масштабы, а облака самоафинные фракталы. Величина  $E: E = \lg A / \lg P \approx 1.5$ , а фрактальная размерность  $D = 1.33$  (по другим данным:  $1.37 < D < 1.41$ ).

*Фрактальность климата.* Выясним, можно ли считать климат фрактальным, а структуру, образующую климат на Земле, - открытой самоорганизующейся структурой? Основания к положительному ответу на этот вопрос, по-видимому, есть. Дело в том, что в течение

последних 400 тыс. лет на Земле произошли четыре глобальных оледенения с периодичностью примерно в 100 тыс. лет (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 1999; Vimeux, et al., 2002). Последний ледниковый период сменился резким потеплением примерно 12 - 15 тыс. лет тому назад. Потепление привело к быстрому таянию льда и увеличению уровня океана. Достоверные данные по изменению температуры поверхности Земли получены при анализе кернов льда, полученных при бурении ледников Антарктиды, - в районе станции Восток, и ледников Гренландии. Результаты анализа приведены на рис. 9-3.

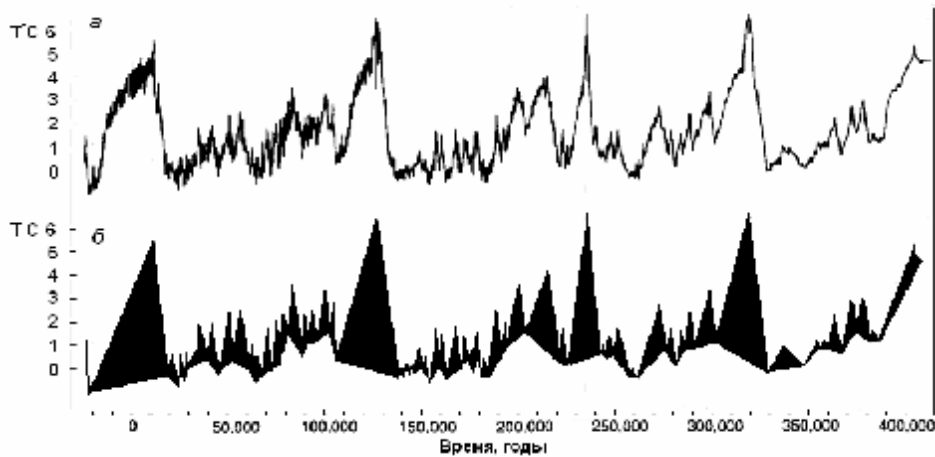


Рис. 9-3. Вариация температуры в течение 400 тыс. лет. Верхняя панель – по данным (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 1999; Vimeux, et al., 2002), нижняя – эта же кривая после преобразования.

Наблюдаемый на рис. 9-3 пилообразный характер вариации температуры может говорить о том, что самоорганизация климата имеет место. Приведем пример, где зависимость, полученная при наблюдении за высотой падения оползня в течение 20 тыс. лет наблюдений [Hergarten, Neugebauer, 1998], внешне очень похожа на график, приведенный на верхней панели рис. 9-3. В этой работе авторы утверждают, что для объяснения характера движения оползней с проскальзыванием можно эффективно использовать идею самоорганизованной критичности, впервые высказанную в работе [Bak et al, 1987].

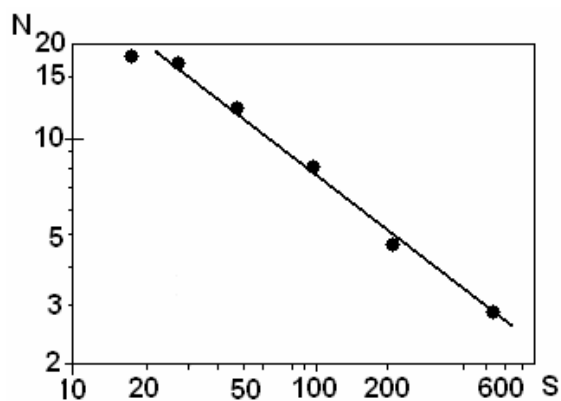


Рис. 9-4. График  $\lg N - \lg S$ , где  $S$  – «пик» повышения температуры (в отн. ед.),  $N$  – число пиков в интервале величин  $S$ . В течение 400 тыс. лет выделено 45 «пиков».

На нижней панели рис. 9-3 приведен график  $T(t)$ , преобразованный таким образом, чтобы пик температуры можно было бы выразить как площадь затемненного треугольника  $S$ . Подсчитав количество пиков данной площади  $N$ , построим график:  $\lg N - \lg S$ . Как и предполагалось, этот график можно аппроксимировать линией, наклон которой

к горизонту определяет фрактальную размерность климата (рис. 9-4). Наличие подобной зависимости, как принято считать, характеризует систему, способную к самоорганизации. Отсюда следует фундаментальный вывод о том, что климат мог быть фрактальным, по крайней мере, в течение последних 400 тыс. лет. Казалось бы, все просто и понятно, однако, анализ кернов льда и масса другой подобной информации показывает, что ситуация намного сложнее. Оказывается, что изменения климата явно связаны с вариациями стратосферной пыли, изменениями модуля геомагнитного поля, концентрацией изотопа  $Be^{10}$ , показывающего изменение уровня радиации на Земле и т.д.

### IX. 3. Связь вариаций климата с экскурсами геомагнитного поля.

Корреляция между вековыми изменениями климата и вариациями геомагнитного поля обсуждается много лет (Jacobs, 1994; Wollin et al., 1971; Wollin, et al., 1978; Chave, Denham, 1979; Doake, 1977; Doake, 1978; Bassinot et al., 2002; Мёрнер и др. 2001; Пудовкин, Распопов, 1992; Петрова, Распопов, 1998; Rampino, 1979; Worm, 1997; Thejll, et al., 2003; Guyodo, Valet, 1996; Robinson et al., 1995; Clement, 2004) и др. Во многих работах отмечалась взаимосвязь между температурой поверхности Земли и изменением величины её магнитного момента. Теоретической основой вековых температурных вариаций принято считать теорию Дж. Кролла и М. Миланковича (Rampino, 1979; Imbrie, Imbrie, 1980; Монин, Шишков, 2000; Bassinot, et al., 1994; Kent, Carlut, 2001), согласно которой климатические изменения на Земле являются откликом на вариации в её орбите. 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. Соответствие теории Миланковича экспериментальным данным в нашей модели представляет особое значение, т.к. из этой теории следует, что изменения климата на Земле должны происходить в её северном и южном полушариях - в противофазе, в то время как наблюдения показывают практически полное совпадение данных, полученных в Антарктиде и Гренландии. Этот факт иллюстрирует неправомочность применения теории Миланковича. Более того, Миланкович создавал свою теорию для прозрачной атмосферы, в то время, как следует из рис. 9-4, огромную роль в понижении температуры играла стратосферная пыль. Можно считать, что природа температурных вариаций, наблюдаемых на поверхности Земли, остается не совсем ясной. Не ясной остается и возможная взаимосвязь между температурными вариациями и вариациями геомагнитного поля.

Причиной связи климата с геомагнитным полем можно считать эффект прямого воздействия космических лучей на атмосферу и биосферу в моменты экскурсов и инверсий геомагнитного поля. Например, Харрисон (Harrison, 1968) полагал, что в моменты инверсий возможно значительное возрастание уровня радиации, которое может вызвать повышение скорости мутаций, в результате чего возникнет некоторого рода эволюционное нарушение последовательности, иначе, прерывистость хода эволюции. В дальнейшем, в своей совместной статье с Prospero (Harrison, Prospero; 1974) он полагает, что инверсии ГМП могут вызвать изменение климата Земли, косвенно приводя к исчезновению фауны. Эту идею разрабатывал Файрбридж (Fairbridge, 1977), изучая климатические изменения, произошедшие в период экскурса Gothenburg (~ 13.5 т. лет), когда произошло хорошо изученное резкое потепление климата. Ему возражал Хечт (Hecht, 1977), полагая, что единственная корреляция геомагнитного и климатических событий 13500 лет назад не в состоянии объяснить похожие климатические изменения, происходящие с некоторой регулярной частотой на протяжении всего Голоцена. Автор критики считает, что в статье Файрбриджа нет убедительных доказательств в пользу корреляции между геомагнетизмом и климатом, хотя это все и очень интересно. Главное затруднение в интерпретации данных, предоставленных Файрбриджем, состоит в том, что по ним невозможно обнаружить циклический характер записи климата Голоцена. Резким противником подобных гипотез выступил Ваддингтон (Waddington, 1967), который

полагал, что гипотеза, суть которой состоит в том, что радиация дополнительных энергетических частиц, получивших возможность свалиться на Землю во время инверсии геомагнитного поля и оказавшихся причиной популяционных изменений, является несостоятельной.

Монин и Шишков (2000) задачу климата разбивают на две части. Одна из них состоит в определении глобальных горизонтальных неоднородностей полей температуры, создаваемых разностью инсоляций в экваториальных и полярных зонах. Другая половина задачи состоит в определении вертикальных неоднородностей температурного поля, включая парниковый эффект, создаваемых на Земле нагревом её поверхности солнечным излучением. В настоящей работе рассматривается вопрос, имеющий отношение ко второй половине задачи, в частности, к проблеме вертикального переноса солнечного излучения, прямо связанного с образованием парникового и антипарникового (Монин, Шишков, 2000) эффектов.

Теория климатических изменений Миланковича построена в приближении прозрачной атмосферы. Прозрачная атмосфера, как будет видно из дальнейшего текста, существует на Земле в течение последних 12 тыс. лет, однако раньше она не всегда была такой. В последние годы, при анализе кернов антарктического льда и льда Гренландии, обнаружено, что в некоторые, более ранние периоды эволюции Земли, в её атмосфере присутствовало довольно большое количество пыли (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 2002). Пылевой слой экранировал солнечное тепло, что вело к охлаждению поверхности Земли. Эта идея дает основание предполагать, что климатические изменения определялись не только и не столько астрономическими причинами, как это следует из теории Миланковича, но и внутренними, - земными. В пользу такого предположения говорит и тот факт, что изменения климата коррелируют с вариациями геомагнитного поля. Хотя ряд авторов полагают, что эти вариации, связанные с изменением скорости вращения Земли, так же имеют астрономическую причину (Rampino, 1979). Однако, основным аргументом против теории Миланковича, подмеченный рядом авторов (Brook, et al., 1996; Steig, et al., 1998; Blunier et al., 1998; Dallenbach, et al., 2000), состоит, как мы отмечали, в том, что изменения климата в Гренландии и Антарктиде происходили практически одновременно.

Принято рассматривать корреляцию между изменениями климата и вековыми вариациями магнитного поля Земли, при которых происходит полная (инверсии), либо кратковременная перемена полярности (экскурсы) геомагнитного поля. При экскурсах, в отличие от инверсий, после смены полярности, геомагнитное поле вскоре возвращается в свое прежнее состояние. Периоды таких колебаний различны и меняются от события к событию от 100 лет до 10 тыс. лет. Так как большинство работ, посвященных этой теме, ограничивают рассмотрение климата в течение последних 400 тыс. лет, а последняя инверсия произошла на Земле примерно 800 тыс. лет назад, мы будем рассматривать корреляцию климата только с экскурсами. Среди наиболее известных и изученных, - можно назвать экскурсии (Petrova, Pospelova, 1990): Этруссия, Гетеборг, Моно Лайк, Лашамп, Каргаполово, Блейк, Ямайка, Бива (I, II, III), произошедших в интервале ~ 0 – 400 тыс. лет.

*Данные.* В течение последних 400 тыс. лет на Земле произошли четыре глобальных оледенения с периодичностью примерно в 100 тыс. лет (Petit et al., 1999; Vimeux, et al., 1999; Vimeux, et al., 2002). Последний ледниковый период сменился резким потеплением примерно 12 - 15 тыс. лет тому назад. Потепление привело к быстрому таянию льда и увеличению уровня океана. Возможно, именно это событие было отражено в истории как Библейский Великий Потоп. Как утверждал Файрбридж, потепление Земли совпадает по времени с экскурсом Гетеборг. Предыдущее резкое и сильное потепление, случившееся примерно 120 тыс. лет тому назад, так же совпадает по времени с другим экскурсом - Блейк. Два оставшихся из четырех названных резких потепления, произошедших в

течение последних 400 тыс. лет, так же можно приурочить экскурсам: Ямайка и Бива II. После резкого потепления, всегда неизменно наступало похолодание. Кроме выделенных нами 4-х интенсивных потеплений, можно отметить и другие, не такие резкие и сильные, но и они, как правило, коррелируют с экскурсами геомагнитного поля. К их числу можно отнести, например, такие события в геомагнетизме как Лашамп, Моно Лайк, и др. Кроме этого явно прослеживаются резкие колебания температуры поверхности Земли не связанные с особенностями геомагнетизма.

Анализ керна льда, полученного при бурении ледников Антарктиды, - в районе станции Восток, и ледников Гренландии, показал, что периоды потепления совпадают по времени с периодами, в течение которых происходит изменение концентрации пыли в керне. Авторы (Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002), обнаружили, что в течение «последних» 330 тыс. лет наблюдается резкое уменьшение максимальной концентрации примеси в виде пылевых частиц, соответственно, в периоды: 15, 120, 220 и 320 тыс. лет тому назад (рис. 9-4). Эти периоды совпадают по времени с периодами потепления и с экскурсами. По всей видимости, именно в эти периоды, когда происходили не совсем случайные совпадения, на Земле происходили глобальные климатические катастрофы.

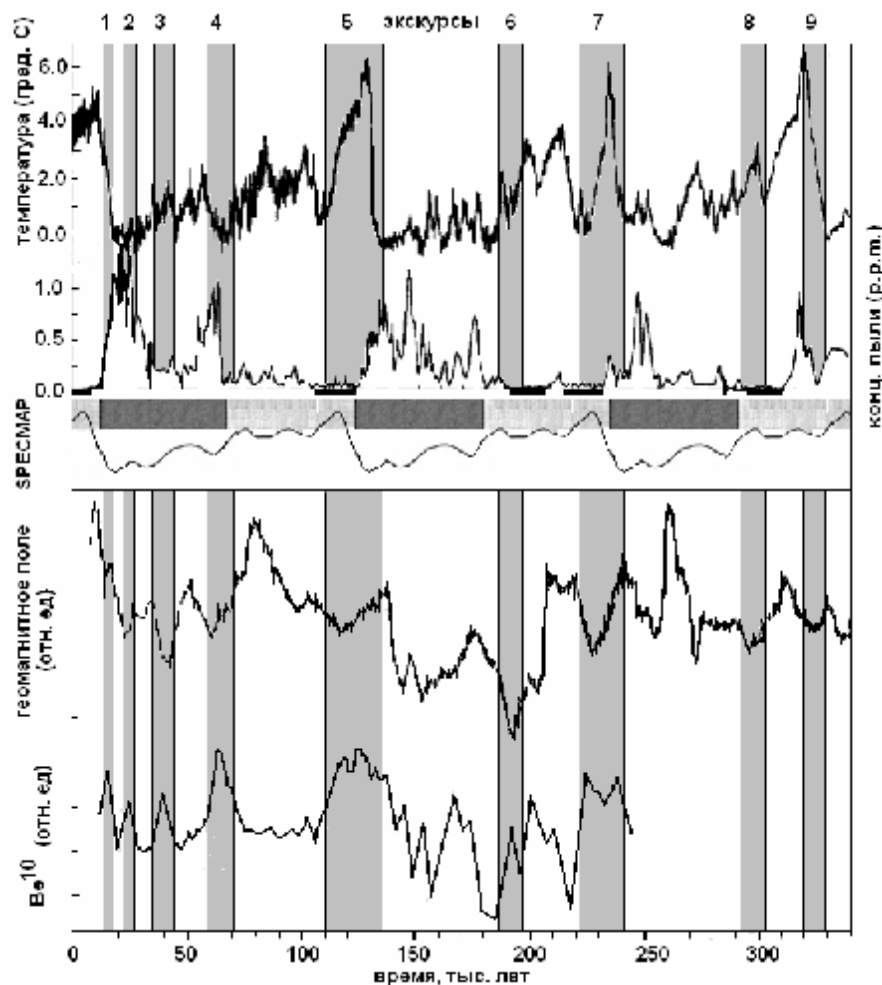


Рис. 9-5. Изменение температуры поверхности Земли (верхняя панель) и относительной концентрации пыли во льду (вторая панель). Третья панель - СПЕСМАР- океаническая изотопная кислородная кривая. Четвертая панель - интенсивность геомагнитного поля. Пятая панель – концентрация изотопа  $Be^{10}$  в осадках. Вертикальные полосы – понижение геомагнитного поля в периоды экскурсов (слева направо): Gothenburg (1); Mono Lake (2); Laschamp (3); Kargopolovo (Event Gaotai, 4); Blake (5); Biwa – I (6); Jamaica (7); Biwa – II (9). Понижение поля 300 тыс. лет (8) с экскурсом не идентифицировано.

Рисунок 9-5 и Таблица 9.1 демонстрируют корреляцию циклов потепления с экскурсами геомагнитного поля. Потепление и уменьшение величины оледенения совпадает по времени (немного отстает) с резким уменьшением концентрации пыли. Отметим, что во всех четырех рассматриваемых случаях концентрация пыли уменьшалась чуть раньше начала времени прохождения экскурса. После экскурса, пыль появлялась не сразу, а в течение примерно 15 тыс. лет. Периоды низкой концентрации пыли выделены на рисунке 9-5 темной полосой. Связь потепления с экскурсами подтверждается независимым изучением самого последнего экскурса, в котором авторы (Архипов и др. 2000) зафиксировали смену фазы похолодания на потепление климата во время экскурса «Этрессия» 2.8 тыс. лет назад. Можно привести и другие примеры отмечаемой нами связи экскурсов с глобальными потеплениями, повторим, что одним из первых, кто обсуждал связь потепления с экскурсом Gothenburg, был Файрбридж.

Результаты наблюдений (рис. 9-5), а так же других, упомянутых выше работ, приведены в Таблице 9.1. Колонки II, VI, VIII и IX выделены, они соответствуют периодам максимальных потеплений. В Таблице: время (тыс. лет) событий: 1 - экскурсы (GMF), 2 – период максимальной концентрации ( $^{10}\text{Be}$ ), 3 - период резкого уменьшения концентрации пыли (Dust. min). 4 – период увеличения максимальной температуры поверхности (начало потепления,  $\Delta T^\circ$ ), для 10 экскурсов, произошедших в течение последних 400 тыс. лет эволюции Земли. В последнем столбце Таблицы 9.1 – литература.

Таблица 9.1

N\Ex	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	[ ]	
1 GMF	2.8	<b>20</b>	25	43		<b>130</b>	200	<b>220</b>	<b>320</b>	360	1	
		12.3	22	45	70	115	185		298	380	2	
				38.6	65	132	200	232	325	360	3	
				25								4
				28	41	65						5
				30		60						6
						60	115					7
						60	114					8
				24	42	65	117	187		272	386	9
			13	30		65	110	180		295		10
				27	42	62	115	190		290	385	11
2 $^{10}\text{Be}$ max		<b>20</b>	25	40	70	<b>120</b>		<b>220</b>			12	
				30-42	60-75	85-	180-				13	
				40		110	192				14	
3 Dust min		<b>20</b>			60	<b>150</b>		<b>260</b>	<b>340</b>	400	15	
		12				130		250			16	
		17		40							17	
4 $\Delta T^\circ$ incr	2.8	<b>12</b>		40		<b>130</b>	200	<b>240</b>	<b>330</b>	400	18	
		12				140	220	280	330	390	19	
		15				130	215	250			20	
		15				130					21	
		20				140					22	
		20				140	190	230			23,	
		15				130					24	
		10			38						25	
		10			38						26	
		12			38	70	120					27

Эккурсы: Etrussia (I); Gothenburg (II); Mono Lake (III); Laschamp (IV); Kargopolovo (V), Blake (VI); Biwa – I (VII); Jamaica (VIII); Biwa – II (IX); Biwa – III (X).

Литература: 1 - (Petrova, Pospelova, 1990); 2 – (Jacobs, 1994); 3 – (Holt, Kirschvink, 1996); 4 – (Liddicoat, Coe, 1979); 5 – (Kent, et al., 2002); 6 - (Bohnel, Molina-Garza, 2002); 7 – (Wollin, et al., 1971; Tric, et al., 1991; Creer, et al., 1990); 8 - (Wollin, et al., 1978); 9 - (Worm, 1997); 10 - (Rampino, 1979); 11 - (Мёрнер и др., 2001); 12 - (Aldaham, Possnert, 2003); 13 - (Frank, et al., 1997); 14 - (Robinson, et al., 1995); 15 - (Petit, et al., 1999);

16 - (Zhang, et al., 2002); 17 - (Rothlisberger et al., 2002); 18 - (Архипов и др., 2000); 19 - (Petit, et al., 1999); 20 - (Vimeux, et al., 2002); 21 - (Zhang, et al., 2002); 22 - (Bard, 2002); 23 - (Cuffey, Vimeux, 2001; Vimeux, et al., 1999); 24 - (Imbrie, Imbrie, 1980); 25 - (Schulz, et al., 1998); 26 - (Rothlisberger et al., 2002); 27 - (Прокопенко и др., 2003).

Надо заметить, что далеко не все авторы придерживаются этой идеи. Например, в одной из работ авторы утверждают, что экскурсы геомагнитного поля являются причиной похолодания или, по крайней мере, связаны с похолоданием (Распопов и др., 2000; YANG Taibao, et al. 2004). Физической модели обсуждаемого явления авторы либо не приводят, либо она не верна. Например, в работе (Распопов и др. 2000) авторы утверждают, что интенсивность галактических космических лучей возрастает в периоды понижения интенсивности геомагнитного поля (по возрастанию концентрации изотопа  $^{10}\text{Be}$ ), что очевидно. Однако, это, по мнению авторов, приводит к похолоданию и развитию оледенения (?). Совершенно не ясна позиция авторов, когда, якобы выявленный ими этап оледенения, они соотносят с признанным всеми периодом потепления, произошедшим примерно 15 тыс. лет тому назад.

В рамках нашей модели горячей Земли можно попытаться найти объяснение явлению похолодания, например, потому, что в моменты прохождения экскурсов полярность геомагнитного поля меняется, Земля расширяется, что сопровождается увеличением интенсивности вулканической деятельности и возникновением т.н. «вулканической зимы» (Rampino, Stothers, 1985; Rampino, Ambrose, 2000). Температура поверхности Земли при этом понижается. Однако в такой модели не находится причины, которая может привести к резкому потеплению, наблюдаемому во всех рассматриваемых нами случаях. Растопить льды может только Солнце, но для этого необходимо ликвидировать, причем за очень малое время, экранирующее действие вулканического пылевого «одеяла». Поэтому, модель, в которой экранирующая солнечное излучение стратосферная пыль быстро разрушается космическими лучами, интенсивность которых резко возрастает в течение экскурса или инверсии, представляется более правдоподобной. В дальнейшем будем рассматривать именно эту модель.

Ещё раз обратимся к рисунку 9-5. Понижение температуры примерно на 10 градусов, после её «быстрого» подъема, происходит в течение  $\sim 100$  тыс. лет. Скорость «охлаждения»  $dT/dt = - 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ . Увеличение температуры на 10 градусов, совпадающее по времени с геомагнитными экскурсами, занимает период времени примерно в 10 тыс. лет:  $dT/dt = + 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ . Скорость современного потепления: 1 градус за 100 лет, для сравнения,  $dT/dt = + 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$ . На рис. 9-5 видно, что и похолодание, и следующее за ним потепление сопровождаются быстрыми изменениями (вариациями) температуры. В течение 10 тыс. лет - потепления сменяют резкие похолодания не менее 10 раз, при этом температура изменяется примерно на  $\pm$  один – два градуса за каждые 100 – 200 лет. Возможно, именно такой процесс происходит и в наше время и, следуя логике этих данных, на Земле вскоре должно начаться похолодание с примерно такой же скоростью, с которой происходит современное потепление. Очевидно, что такой прогноз не учитывает роль антропогенного влияния на климат Земли. Однако насколько это влияние сравнимо с естественными природными процессами, ещё далеко не ясно.

Обратим внимание на такую деталь. Рис. 9-5 и 9-6 (Petit et al., 1999; Vimeux et al., 2002) показывает, что температура ( $\delta^{18}\text{O}$ ) начинает возрастать немного раньше начала экскурса, а концентрация пыли продолжает уменьшаться, причем начало уменьшения концентрации пыли предшествует началу роста температуры до того, как она стала равной нулю. В том случае, если модуль геомагнитного поля является суммой поля дипольного источника и поля ГМА, причем полярность ГМА совпадает с полярностью дипольного источника, то начало экскурса (по палеомагнитным данным) произойдет позже, чем в первом случае.



Это случится в тот момент, когда поле отрицательной полярности станет равным полю аномалии.

Уравнение эволюции температуры поверхности Земли на фоне двух процессов, один из которых приводит к похолоданию – за счет увеличения альбедо Земли  $\alpha$  и уменьшения солнечного тепла, попадающего на Землю, и второй, приводящий к увеличению прозрачности атмосферы, увеличению потока тепла и нагрева земной поверхности можно записать следующим образом:

$$\partial T/\partial t = dT_0/dt + \partial/\partial h [D \partial T/\partial h - KT], \quad (9.8)$$

где  $dT_0/dt$  – вариация температуры Земли за счет изменения потока Солнечного излучения. Сюда могут входить как астрономические причины, так и вековые изменения светимости Солнца,  $h$  – высота атмосферы,  $D$  – коэффициент диффузии солнечного излучения ( $D \approx \lambda c$ ,  $\lambda$  – длина пробега фотона в «мутной» среде,  $c$  – скорость света),  $K$  – параметр дрейфа, который в нашем случае имеет смысл скорости переноса аэрозоля (пыли) в стратосфере Земли. Если рассматривать механизм убывания концентрации пыли только за счет гравитационного опускания пылинки на поверхность Земли, то параметр  $K$  будет соответствовать формуле Стокса для скорости падения капли:

$$K = v = (mg - \epsilon_0 qE)/6\pi\eta r, \quad (9.9)$$

где  $m$  – масса капли, а  $q = \epsilon_0 \zeta r$  – её заряд,  $\zeta$  – электрокинетический потенциал воды ( $\zeta \approx 0.25$  В). В облаке принято считать:  $mg \gg qE$ . В нашем случае, для оценки минимального размера капли, можно остановиться на условии:  $mg \geq qE$ .  $K = mg/6\pi\eta r$ , заменяя  $m \approx 4\rho r^3$ , получаем, что  $K = \rho r^2 g/4\eta$  ( $\eta$  – вязкость воздуха) зависит от квадрата размера капли. Легко показать, что если размер пылинки  $r < 0.1$  мкм, то пыль в стратосфере будет находиться тысячи лет. Фактически параметр дрейфа значительно сложнее. Сюда входит нерегулярный источник пыли, механизм переноса пыли по стратосфере, взаимодействие пыли с космическим излучением, водным аэрозолем и т.п.

Уравнение (9.8) по смыслу и форме, это уравнение Фоккера-Планка (ФП), т.е. уравнение, описывающее процесс самоорганизации системы или среды [Хакен, 2005]. В нашем случае (9.8) описывает функционирование климатической системы, включающей источник пыли, механизм доставки её в стратосферу и распространения в этом слое, а так же механизм, приводящий к очищению стратосферы от пыли как за счет гравитационных сил, так и разрушения пылинок жестким излучением и вымывания пыли из стратосферы водным аэрозолем.

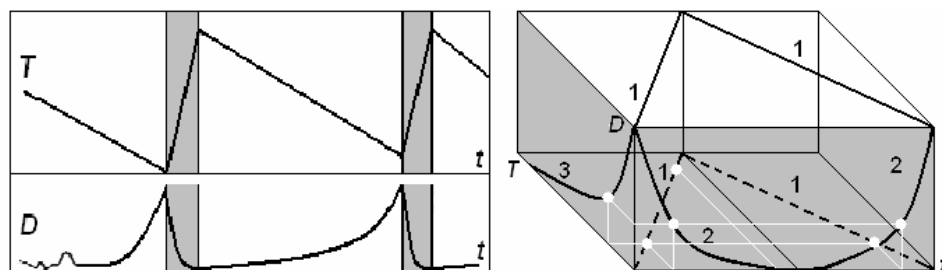


Рис. 9-6. Вариации температуры  $T$  и концентрации пыли  $D$  в течение времени  $t$  (слева). Пространственная модель, связывающая температуру  $T$ , с плотностью пыли в стратосфере  $D$  и временем эволюции климатической системы  $t$ . Белые точки соответствуют величинам  $T$  и  $D$  (справа).

Изобразим кривые  $T$  и  $D$  полученные при анализе ледяных кернов Антарктиды и Гренландии (на левом рисунке) в виде трехмерной модели (справа, рис. 9-6). Сравним  $\partial T/\partial t$  с формулой (9.9). Сравнение показывает, что увеличение  $T$  связано с «просветлением» атмосферы, описываемой параметром  $D \partial T/\partial h$ , а перенос пыли в атмосфере с параметром  $KT$ . Заметим, что эта формула дает только качественное описание сложных процессов, происходящих в атмосфере даже в том, упрощенном виде, когда рассматривается только заполнение стратосферы вулканической пылью и последующее очищение стратосферы.

*Экспурсы, пыль и геомагнитное поле.* Анализируя данные по пыли и поведению геомагнитного поля (рис. 9-5), можно отметить некоторое запаздывание начала экскурсов относительно уменьшения концентрации пыли и температуры поверхности. Это явление, возможно, связано с тем, что экскурсы и инверсии – глобальные процессы, причина которых состоит в изменении режима работы фазовых переходов на границе внутреннего ядра. Экскурсы и инверсии происходят не мгновенно. Их началу, предшествует плавное понижение интенсивности поля  $B$ . Уменьшение модуля геомагнитного поля  $B$  ведёт к возрастанию интенсивности попадающего в атмосферу Земли космического излучения. Частицы высоких энергий разрушают пылевой слой в стратосфере. Атмосфера становится прозрачней. Солнце начинает греть поверхность Земли более интенсивно, начинается этап потепления.

В образцах горной породы, используемых в палеомагнитных исследованиях, экскурс фиксируется по резкому изменению величины наклонения. Это происходит тогда, когда вектор поля уже меняет знак. Собственно этот момент и считается началом экскурса или инверсии. Естественно, этот момент отстает по времени от того этапа, в течение которого началось и происходило уменьшение поля. Как мы отмечали, понижение интенсивности поля может привести к увеличению интенсивности ГКЛ, что вызовет разрушение стратосферного аэрозоля, что, в конечном счете, приведет к повышению температуры поверхности. Нашу модель подтверждают данные работы (Valet, Meunadler, 1993), в которой авторами получена зависимость между уменьшением величины дипольного поля в течение инверсии  $B$  и длиной интервала смены полярности  $\Delta T$ . В первом приближении:  $\Delta T \sim B^2$ . Рассмотрим, как можно интерпретировать полученный результат в рамках нашей модели. Предположим, что инверсия происходит в зоне влияния аномалии и в момент смены полярности фиксируется поле аномалии  $B_A$ . По модели, чем больше величина  $B_A$ , тем длиннее  $\Delta T$ . Поле аномалии интегрируется таким образом, что  $\Delta T \sim \int B_A dt$ . После интегрирования получаем:  $\Delta T \sim B_A^2$ , что и требовалось доказать.

Авторы (Hartl, Tauxe, 1996) показали, что уменьшение модуля поля в момент инверсии Матуяма - Брюнес и предшествующего этой инверсии экскурса Хурамильо было различным для различных регионов. Пробы брались в районах расположения базальтов, излившихся на дно океанов вблизи Индонезии ( $0^\circ$ ,  $160^\circ$  E) и западного берега Африки ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$  W). В первом случае модуль поля уменьшался не более, чем в 10 раз от его нормальной величины, во втором, - понижение модуля было большим, не менее, чем в 30 раз. Эти данные подтверждаются другими аналогичными наблюдениями. Так, например, в (Oda et al., 2000) показано, что в момент этой инверсии в базальтах, излившихся в районе острова Борнео ( $7^\circ$  N,  $122^\circ$  E), модуль поля уменьшился примерно в 5 – 7 раз от его нормальной величины. Аналогичное по величине уменьшение было зафиксировано вблизи побережья Калифорнии (Heider et al., 2000). Значительное понижение модуля геомагнитного поля в периоды инверсии Матуяма-Брюнес и экскурса Хурамильо было зарегистрировано вблизи западного побережья Африки (Yamazaki, Oda, 2001), здесь оно было не менее, чем в стократным.

Приведенные факты по поведению модуля поля в моменты инверсий согласуются с данными в (Clement, 2004), где установлено, что чем короче период инверсии  $\sim \Delta T$ , тем

на большую величину понижается интенсивность геомагнитного поля  $\sim \Delta B$  ( $\Delta T \cdot \Delta B \approx const$ ). Полученная зависимость позволяет связать скорость смены полярности поля ( $\Delta T$ ) с продолжительностью периода, следующего за инверсией, - хрона  $T^*$ . Так как  $\Delta T \sim 1/\Delta B$ , а  $T^* \sim \Delta B^2$ , получаем:  $T^* \sim \Delta T^2$ . Чем быстрее происходит смена полярности дипольного поля, тем больше длительность следующего за инверсией хрона.

Рассмотрим, насколько обсуждаемые нами результаты согласуются с теорией дрейфа магнитных полюсов в моменты инверсий и экскурсов. Согласно этой теории, дрейф полюсов происходит по вполне определенным траекториям, на которых располагаются глобальные магнитные аномалии (Kuznetsov, 1999). В момент времени инверсии (экскурса), когда поле дипольного источника становится близким к нулю, собственное поле глобальных магнитных аномалий ещё сохраняет свое прежнее значение. Затем поле дипольного источника возрастает от нулевого значения со знаком, обратным предыдущему, что приводит к аннигиляции полей дипольного источника и аномалии. Так происходит смена полярности поля на выделенных трассах. В тех районах, где влияние аномалий не сказывается, например, в Африке, модуль поля во время инверсий и экскурсов снижается, практически, до нуля. Именно в этих регионах фиксируется и самое короткое время переполюсовки. Таким образом, палеомагнитные данные однозначно показывают, что в момент инверсии модуль геомагнитного поля в Африке уменьшается значительно больше (в 100 и более раз), по сравнению с другими регионами: Азией, Австралией, Америкой, где модуль поля уменьшается менее чем в 10 раз.

*Характер изменения температуры.* Температура поверхности Земли, как при потеплении, так и при охлаждении, - изменялась не плавно, а резкими «толчками», амплитуда которых редко превышала 2 – 3 градуса, а время броска температуры, «толчка» - составляло не более  $10^3$  лет. В (Rahmstorf, 2003) приведены точные значения дат резких изменений температуры в течение последнего оледенения ( $T$  по  $\delta^{18}O$ , в град.): с 10 тыс. лет до 11.6 тыс. лет – увеличение температуры; 13.07 тыс. лет – начало её понижения; 14.6 тыс. лет - резкий подъем на фоне плавного повышения; 23.39 тыс. лет – начало плавного повышения; 23.4 тыс. лет - 45.36 тыс. лет – колебания (повышения и понижения) температуры ( $\delta^{18}O$ ). В работе (Dallenbach et al., 2000), авторы выделяют четыре периода последнего оледенения (Last Glacial): 1) 11.63 - 12.5 тыс. лет – Younger Dryas; 2) 12.7 - 14.5 – Bolling-Allerod; 3) 16.7 - 20.3 – Last Glacial Maximum и 4) 26.0 - 46.0 – Cold & Warm periods. По-видимому, эти колебания температуры связаны не только с экскурсами. Возможно, как и принято считать, решающую роль в таких изменениях играет изменение концентрации метана и двуокиси углерода. В течение первого периода (Younger Dryas, 11.63 - 12.5 тыс. лет), на фоне общего потепления и увеличения концентрации метана, как в Гренландии, так и в Антарктиде, наблюдается резкое понижение уровня концентрации метана и, соответственно, похолодание (заметное в Гренландии и менее заметное, на Антарктиде). После похолодания температура восстанавливается и потепление продолжается. Так же как в (Blunier, et al., 1998), наблюдается опережение (примерно на 1 тыс. лет) изменения концентрации метана в Антарктиде по сравнению с Гренландией. В (Jouzel, et al., 2001) сравниваются данные по дейтерию ( $\delta D$ ), полученные на 5 станциях Антарктиды. Показано, что температура синхронно повышается в интервале 28 - 12 тыс. лет. При этом на всех станциях наблюдается резкое понижение с последующим восстановлением температуры в диапазоне 12 - 13 тыс. лет. После максимума при 11 - 12 тыс. лет начинается плавный спад температуры ( $\delta D$ ).

На фоне отмечаемого рядом авторов синхронизма колебаний климата в Гренландии и Антарктиде, при более тщательном анализе данных обнаружено, что изменения климата в Антарктиде опережают аналогичные изменения климата в Гренландии в период 47 - 23 тыс. лет тому назад примерно на 1-2.5 тыс. лет (Blunier, et al., 1998). В работе (Watanabe, et al, 2003) авторы сравнивают изменение температуры поверхности льда восточной Антарктиды с ходом температуры на поверхности Земли в течение последних 20 тыс. лет.

Температура оценивается по содержанию изотопов дейтерия и кислорода, в течение трех предыдущих ледниковых периодов (330, 250 и 120 тыс. лет тому назад). Показано, что характер похолодания наступившего после пика температуры примерно 15 тыс. лет назад отличается более мягким климатом, чем в течение трех предыдущих ледниковых периодов. Во всех трех предыдущих случаях похолодание, следующее после потепления, наступало более резкое, чем похолодание поверхности Антарктиды в настоящее время.

*Концентрация  $^{10}\text{Be}$ .* Обратим внимание на данные, полученные рядом авторов по изучению временного распределения концентрацией изотопа  $^{10}\text{Be}$  в осадочных породах. Рисунок 9-5 (Aldahan, Possnert, 2003, - с увеличением масштаба) демонстрирует связь между геомагнитными экскурсами и концентрацией изотопа  $^{10}\text{Be}$ . В работах (Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank et al., 1997) показано, что этот изотоп является индикатором интенсивности галактических космических лучей, достигнувших поверхности Земли и оставивших «следы» в осадках. Использование именно этого изотопа ( $^{10}\text{Be}$ ) связано с тем, что его концентрация в породах земной коры очень мала и появление этого изотопа полностью определяется интенсивностью космических лучей, т.к.  $^{10}\text{Be}$  получается при бомбардировке ГКЛ атомов атмосферного азота.

Таким образом, совпадение увеличения плотности космических лучей в периоды экскурсов может служить подтверждением нашей модели. Совпадение периодов прохождения экскурсов и резких потеплений однозначно говорит в пользу того, что происходит увеличение прозрачности атмосферы, т.к. льды может растопить только Солнце. Никаких внутренних источников тепла для этого не достаточно.

Способность галактических космических лучей (ГКЛ) «пробить» толщу атмосферы и достигнуть земной поверхности зависит от их энергии, величины геомагнитного поля Земли и широты «точки приема ГКЛ», т.к. вектор модуля поля изменяется в зависимости от географической (магнитной) широты места, в котором регистрируются «следы» ГКЛ. Например, для современного значения величины геомагнитного поля, в области экватора энергия частиц должна быть порядка (и более) 14 ГэВ, на широте  $40^\circ$  энергия частиц попадающих на Землю снижается до 4 ГэВ, а на широте  $60^\circ$  - 0.5 ГэВ и т. д. (эффект геомагнитного обрезания). Очевидно, что энергия и плотность потока ГКЛ, которые могут достигнуть поверхности Земли, может возрасти неоднократно в том случае, если на некотором пространстве земной поверхности величина геомагнитного поля окажется практически равной нулю. Принято считать, что в результате ядерной реакции протонов ГКЛ с атомами азота атмосферы образуется очень редкий в литосфере изотоп  $^{10}\text{Be}$ . Его наличие свидетельствует о присутствии ГКЛ, а его концентрация пропорциональна плотности потока.

Отношение изотопов  $[^{10}\text{Be}]/[^7\text{Be} + ^9\text{Be} + ^{10}\text{Be}] = 0.028$  (Aldahan, Possnert, 2003) показывает, что ГКЛ проникали сквозь атмосферу и попадали в почву. ГКЛ проходят толщу вещества атмосферы  $5 \text{ г/см}^2$  (Атмосфера, 1991) и после этого средняя концентрация частиц ГКЛ составляет  $0.2 \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, наличие повышенной концентрации  $^{10}\text{Be}$  может быть индикатором того, что в определенное время, в определенном пространстве Земли, геомагнитное поле имело существенно меньшую величину, чем обычно. Известно (см. рис. 9-4), что увеличение концентрации изотопа  $^{10}\text{Be}$  в осадочных породах совпадает по времени с прохождением экскурсов и инверсий (Raisbeck et al., 1985; Robinson, et al., 1995; Aldahan, Possnert, 2003; Frank et al., 1997).

*Модель.* Принято считать, что продолжающееся в наше время примерно в течение последних 100 лет потепление, связано с развитием парникового эффекта. Разовьем эту идею. Учтем высказанную в (Монин, Шишков, 2000) идею, согласно которой основная роль в возникновении парникового эффекта принадлежит природным, а не антропогенным примесям. Если этот тезис считать доказанным, то мы приходим к совсем не тривиальному предположению. Суть его заключается в следующем. Парниковый

эффект обязан выбросу в атмосферу Земли некоторого дополнительного количества природных газов, паров и микрочастиц (пылинок, аэрозолей). Со временем, при определенных условиях, например, при усилении вулканической деятельности Земли (Rampino, Stothers, 1985), количество пыли и, как следствие, рост облачности и экранирование солнечного излучения, попадающего на Землю, - будет увеличиваться. Предположим, что увеличение концентрации пыли в атмосфере (концентрации стратосферных аэрозолей) связано с изменением тектонической активности Земли, приводящей, в свою очередь, к увеличению количества действующих одновременно вулканов. В этом случае парниковый эффект может плавно перейти в антипарниковый, и на Земле, вместо потепления, начнется «вулканическая зима» - похолодание и рост ледников. Подтверждение правомерности такого предположения можно найти в обзоре (Монин, Шишков, 2000). Роль облачности в изменении климата Земли была обоснована значительно раньше (Монин, 1969).

В (Асатуров и др. 1986) приведены теоретические и экспериментальные оценки, показывающие, что стратосферные аэрозоли (СА), возникающие при вулканических извержениях, могут значительно менять альбедо Земли ( $a$ ):

$$\Delta a/t = -4(1 - w)a + 2wh(1 - a)^2, \quad (9.10)$$

где  $h = \int h(m) dm$  - средний коэффициент трансформации для диффузионного излучения,  $t$  - оптическая толщина слоя СА,  $w$  - вероятность выживания фотона,  $m = \cos q$ , где  $q$  - угол между излучением и поверхностью Земли. Из формулы видно, что наличие СА может, как увеличивать, так и уменьшать глобально осредненное альбедо Земли. При  $(1 - a)^2/2a > (1 - w)/wh$  - альбедо Земли возрастает. Например, при концентрации стратосферного аэрозоля  $N_{CA} = 10^4 \text{ см}^{-3}$  и объемной концентрации  $r = 160 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$  для солнечного излучения в интервале длин волн от 0.2 до 2 мкм, величина  $a = 100 \%$  (Rahmstorf, 2003). Размер пылинки  $a$  ( $a \sim V^{1/3}$ ,  $V = r / N_{CA} = 1.6 \times 10^{-2} \text{ мкм}^3$ ):  $a \approx 0.25 \text{ мкм}$ . Если концентрация пыли (СА) будет порядка (или больше)  $N_{CA} = 10^4 \text{ см}^{-3}$ , а размер пылинок не менее 0.25 мкм, то поверхность Земли при толщине слоя  $h \leq 1 \text{ км}$ , будет экранирована от солнечного тепла практически полностью.

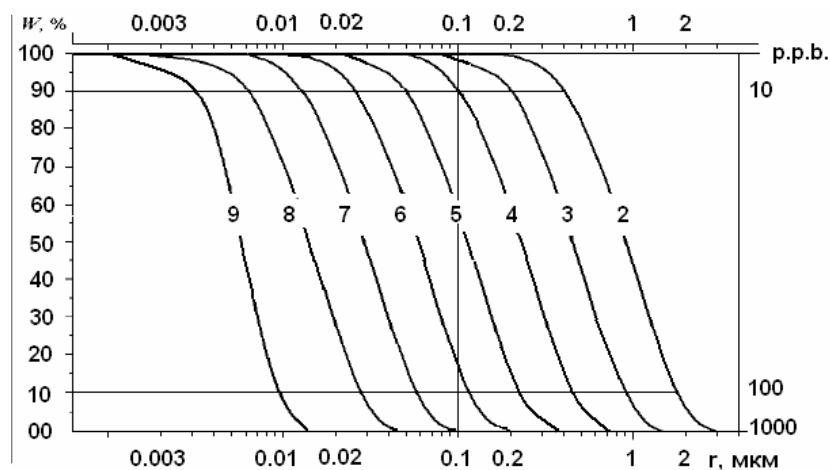


Рис. 9-7. Коэффициент прозрачности стратосферы  $W$  в зависимости от размера СА для слоев различной концентрации. Кривая 2 соответствует  $N = 100 \text{ см}^{-3}$  и т.д., по данным (Гончаренко, Кивва, 2002).

Как следует из рисунка 9-5, максимальная концентрация пыли во льдах Антарктиды и Гренландии  $N \approx 1 \text{ p.p.m.}$  ( $10^6$ ). Очевидно, что концентрация пыли в палеоатмосфере могла отличаться от этого значения. Учитывая плотность льда ( $1 \text{ г}/\text{см}^3$ ), 1

$\rho \cdot m \approx 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>. Примем размер пылинки  $r \approx 0.25$  мкм, тогда её объем  $\sim 10^{-14}$  см<sup>3</sup>, площадь поверхности  $S \approx 10^{-9}$  см<sup>2</sup> и масса  $\sim 10^{-14}$  г, а концентрация пылинок во льду  $n$  равна примерно  $10^8$  см<sup>-3</sup>. Предположим, что вся пыль, содержащаяся в столбе атмосферы толщиной  $h$ , была адсорбирована в слое льда толщиной  $l$ . Учитывая скорость наращивания льда  $v \approx 1$  см/год и принимая характерное время процесса наращивания пыли  $t \approx 1$  тыс. лет, получим величину  $l = 10$  м. Общее количество пылинок в слое льда площадью 1 см<sup>2</sup> и толщиной 10 м равно  $10^{11}$ . При толщине слоя аэрозоля, равной 1 - 3 км, концентрация пыли  $N_{CA}$  в слое составит не менее  $10^5$  см<sup>-3</sup>.

Экстраполируя результаты расчетов эффектов экранирования солнечного излучения слоем стратосферного аэрозоля (СЭ), приведенных в работе (Гончаренко, Кивва, 2002), получим, что слой СЭ с размером частиц 0.25 мкм и концентрацией  $N_{CA}$  будет полностью (на 100%) экранировать Землю от солнечного света (рис. 9-7). Воспользуемся полученной в этой работе связью между  $N_{CA}$  и радиусом пылинки на широкий спектр её размеров и покажем, что при нулевой прозрачности атмосферы, увеличение размера пылинки  $r$  в 2 раза эквивалентно понижению  $N_{CA}$  в 10 раз:  $r \sim N_{CA}^{-d}$ , где показатель  $d \approx 0.3$ ;  $r$  (мкм)  $\approx 15N_{CA}^{-0.3}$  (см<sup>-3</sup>).

*Как ГКЛ «очищают» стратосферу от пыли.* Как отмечалось, наша модель подразумевает воздействие потока ГКЛ на СА таким образом, что в результате этого воздействия величина  $N_{CA}$  уменьшается практически до нуля. Выясним, насколько правомерна такая постановка, для чего обратимся к полученному недавно экспериментальному результату (Vanhellemont, et al., 2002) по корреляции интенсивности нейтронов ГКЛ и концентрации СА. Авторы показали, что число нейтронов, регистрируемых в течение 1987 – 1991 гг. с месячным усреднением у поверхности Земли, уменьшается примерно на 30 % при увеличении концентрации СА (высота 26.5 км) - на два порядка. Полученный в (Vanhellemont, et al., 2002) результат показывает, что обсуждаемая нами модель связи концентрации атмосферных аэрозолей с ГКЛ имеет основание.

Известно (Spitzer, 1978), что протоны с высокой энергией выбивают атомы и молекулы из пылинок вплоть до их полного испарения. Например, для того, чтобы отделить от пылинки (аэрозоля) одну молекулу воды, необходима энергия всего 0.2 эВ. Предположим, что удельная теплота испарения вещества пылинки  $U = 10$  кДж/г. Так как массу пылинки мы определили  $m = 10^{-14}$  г, то необходимая энергия для испарения пылинки  $E = U \cdot m = 10^{-10}$  Дж, или  $\sim 10^9$  эВ. Эта энергия близка энергии ГКЛ, способных проникнуть в атмосферу Земли при современном геомагнитном поле. Проходя пылевой слой, протоны и мезоны ГКЛ отдают на разрушение частиц лишь малую долю своей энергии. При экскурсии или инверсии все частицы ГКЛ с энергией  $\approx 100$  МэВ будут проникать в атмосферу Земли, но плотности их потока явно недостаточно для разрушения пылевого слоя. Как мы отмечали, в столбе атмосферы сечением 1 см<sup>2</sup> и толщиной 1 км, при концентрации  $N_{CA} \approx 10^5$  см<sup>-3</sup>, находится  $10^{11}$  пылинок. Предположим, что количество пылинок за время воздействия  $t$  на них потока ГКЛ  $j$  не увеличивается, тогда для полного испарения всей пыли потребуется некоторое количество лет. Примем характерное время убывания концентрации пыли равным  $\sim 10$  тыс. лет, примем, что для испарения одной пылинки необходимо затратить  $10^9$  эВ, и, соответственно, для испарения  $10^{11}$  пылинок необходимо иметь энергию  $\sim 10^{20}$  эВ·см<sup>-2</sup>. Время процесса уменьшения концентрации пыли можно оценить из эксперимента, как равное  $t \approx 10^{11}$  с, тогда можно так же оценить минимальную плотность потока частиц, равную  $j \sim 10^9$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. В этой оценке не учитывается, что частица космических лучей, достигнув стратосферного слоя, должна обладать немалой энергией, порядка 100 МэВ. Причем на столкновения с пылинками энергия частицы будет потрачена далеко не вся, а лишь незначительная её часть. Мы не учитывали тот факт, что заряженные частицы космических лучей сталкиваются не только с пылинками, а также тратят значительную часть своей энергии на рассеяние,

возбуждение и ионизацию атомов и молекул атмосферы. Мы не учитывали также, что при лобовом столкновении иона с пылинкой ей передается лишь малая часть кинетической энергии, т. е. плотность потока, необходимого для испарения (диспергирования) пылинок, значительно больше, чем оцененная нами величина. Даже если учесть, что плотность потока ГКЛ при энергии частиц, равной 10 ГэВ, составляет  $\sim 0.1 - 1 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , и, что на стратосферных высотах она, примерно, на два порядка выше (Асатуров и др., 1986), - все равно, идея испарения СА только частицами космических лучей оказывается сомнительной.

Учтем эффекты, связанные с разрушением радиационных поясов (РП) при исчезновении геомагнитного поля. Частицы РП - это частицы высоких энергий, порядка 10 – 100 МэВ, которые образуются при распаде нейтронов альбеда космических лучей, т.е. нейтронов, возникающих при взаимодействии ГКЛ с атмосферой. При этом заряженные частицы попадают в магнитные ловушки РП. О плотности потока частиц РП можно судить по потоку, регистрируемому спутниками в районе Бразильской глобальной магнитной аномалии (ГМА), иногда её называют Южно-Атлантической ГМА. Принято считать, что в районе Бразильской ГМА внутренний РП опускается очень низко - на спутниковые высоты и, таким образом, в этом районе регистрируется поток частиц на 3 - 4 порядка выше, чем поток ГКЛ. Однако, как показывают оценки, этого увеличения плотности потока КЛ всё равно недостаточно для испарения в течение 10 тыс. лет слоя СА с концентрацией = 1 p.p.m.

Рассмотрим альтернативную модель воздействия ГКЛ на атмосферу в периоды экскурсов и инверсий геомагнитного поля, когда плотность проникающего в атмосферу потока ГКЛ значительно больше, чем обычно. При этом в стратосфере образуется большое количество ионов, которые являются ядрами конденсации паров воды. На ядрах конденсации образуются мелкие капли (частицы) водного аэрозоля. Образовавшиеся частицы коагулируют на находящихся пылинках, увеличивая их размер (аналог камеры Вильсона). Выросшие капли падают на Землю и доставляют к её поверхности исходную пылинку значительно быстрее, чем осела бы она сама в первоначальном виде. Скорость падения капель  $v$  пропорциональна квадрату их размера  $r$ , т.к. она оценивается по формуле Стокса.

Оценим время формирования капли, обозначим через  $t$  характерное время столкновения частицы с растущей каплей. Тогда  $t = (S n v)^{-1}$ , где  $S = \pi r^2$  - сечение “капли”,  $n = r/m$  - концентрация частиц в атмосфере на соответствующей высоте,  $r$  - плотность атмосферы на этой высоте,  $m$  - масса частицы,  $v$  - её скорость,  $r = (V_k)^{1/3}$  - радиус капли,  $V_k = V_c g$  - объем капли,  $V_c$  - объем частицы,  $g$  - число частиц в капле. Время роста капли:

$$t_R = \int dg / S n v, \quad (9.11)$$

и т.к.  $S = \pi (V_c g)^{2/3}$ , то  $t = g^{1/3} / (V_c^{2/3} n v)$ , или  $t_R \gg r / (V_c n v)$ . Время роста капли пропорционально её размеру и обратно пропорционально концентрации возникших на ядрах конденсации мелких частиц (микрокапель), их объему и их тепловой скорости дрейфа. С другой стороны, время падения капли – обратно пропорционально квадрату размера капли. Время нахождения в стратосфере капель малого размера определяется скоростью их падения, больших капель - скоростью их роста. Атмосфера очищается быстрее всего, когда эти времена близки по величине:  $t_R \leq t_C$ .

Оценим размер исходной пылинки, полагая, что время её пребывания в стратосфере известно, а оседает она на Землю со скоростью Стокса. Учтем два момента. Примем к сведению следующее. Стратосферный аэрозоль, образовавшийся при вулканических извержениях в течение современного летоисчисления (2 тыс. лет), представляет собой  $\text{SO}_4^{2-}$  (Zielinski et al., 1994). В то же время, можно предположить, что СА древних вулканов (старше 15 тыс. лет) – это нерастворимые в воде осадки, результат пленианских извержений. В первом случае, (из наблюдений) время оседания СА порядка года, а во

втором случае – это  $\approx 1$  тыс. лет. Т.о., различие во времени существования СА составляет 3 порядка. Время  $t_C$  оценим по Стоксовой скорости  $v$ , учитывая, что  $v \sim r^2$ . Положим, что СА, оседая на поверхность земли, проходят при этом путь  $L = 20-30$  км. Время падения  $t_C$  будет определяться  $t_C = L/v$ . Или, после подстановки значения вязкости воздуха  $t_C \approx 10^6/r^2$  ( $r$ , мкм;  $t$ , сек). В первом случае размер СА ( $\text{SO}_4^{2-}$ ):  $r \approx 0.2$  мкм, во втором,  $r$  должен быть примерно в 30 раз меньше:  $r \approx 10^{-2}$  мкм.

Положим, что концентрация СА в слое стратосферы толщиной 1 км  $\approx 100$  р.р.м. – это почти максимальное значение концентрации пыли. При этом объемная концентрация пылинок  $n$  размером 0.01 мкм может достигать  $10^9$  см $^{-3}$ , и она будет в 1000 раз ниже:  $n \approx 10^6$  см $^{-3}$  для пылинок размером 0.2 мкм. Эта оценка совпадает с полученной нами ранее взаимосвязи радиуса СА  $r$  с концентрацией  $N_{CA}$  при условии полного поглощения солнечного излучения на поверхности Земли:  $r$  (мкм)  $\approx 15N_{CA}^{-0.3}$  (см $^{-3}$ ).

Концентрация водных комплексов (микрокапель), состоящих из нескольких молекул воды, на высоте 30 км,  $\sim 10^{16}$  см $^{-3}$ . Для того, чтобы в среде успешно происходила конденсация паров воды, и образовывался водный аэрозоль, необходимо наличие ядер конденсации (ЯК), в качестве которых могут выступать ионы, возникшие при прохождении через атмосферу КЛ. Для образования СА размером 0.1 мкм из пылинок размером 0.01 мкм необходимо, примерно, 1000 микрокапель и, соответственно, 1000 ЯК. Следовательно, концентрация ЯК должна быть того же порядка  $\sim 10^{16}$  см $^{-3}$ .

Определим величину  $dQ/dt$  – скорость образования ионов. Учтем, что ГКЛ с энергией выше энергии обрезания вносят в нижнюю атмосферу заряд  $\approx 10^3$  кулон/с (ток атмосферного электричества). ГКЛ совместно с СКЛ и частицами радиационных поясов (в момент их разрушения при экскурсах и инверсиях геомагнитного поля), могут вносить в стратосферу заряд, примерно, на 5 - 6 порядков больший, чем ГКЛ в нижнюю атмосферу. В этом случае:  $dQ/dt = 10^9$  кулон/с. Оценим величину плотности зарядов (ЯК)  $N$ , используя равенство:  $dN/dt = \alpha N^2$ . Положим, что  $N^+ = N^-$ , тогда, зная коэффициент рекомбинации ионов  $\alpha$ , можно оценить скорость образования зарядов в атмосфере  $dN/dt$ . Подставив в формулу величину элементарного заряда  $e$ , получим скорость накопления зарядов:  $dQ/dt = eV \cdot dN/dt = eV \cdot \alpha N^2$ , где  $V$  – объем слоя СА ( $\sim 10^{22}$  см $^3$ ). Учитывая величину коэффициента рекомбинации  $\alpha \approx 10^{-6}$  (см $^3$  с $^{-1}$ ) и принятую нами скорость образования ионов  $dQ/dt = 10^9$  кулон/с, получаем:  $N_0 \approx 10^6$  см $^{-3}$ . Предполагая, что  $N_0$  накапливается со временем, оценим время накопления, необходимого для получения заданной величины  $N$ . Помножив  $N$  на величину единичного заряда  $e$ , получим необходимую плотность заряда в слое:  $n = 10^{-7}$  кулон см $^{-3}$ . Оценим полный заряд слоя СА в момент экскурса или инверсии:  $Q = 10^{15}$  кулон. Такой заряд может быть внесен потоком заряженных частиц за время  $t = Q/(dQ/dt) \approx 1$  год.

Характерное время снижения концентрации пыли  $\approx 1$  тыс. лет. Это означает, что в наших оценках, время  $t$  можно увеличить, по крайней мере, на три порядка. Скорость образования ионов  $dQ/dt$  может быть уменьшена так же на три порядка, что, очевидно, проще достижимо в моменты экскурсов и инверсий, когда магнитное поле перестает выполнять защитные функции от попадания в атмосферу космических лучей и удерживать в «ловушках» заряженные частицы радиационных поясов.

Из предложенной модели следует, что прохождение экскурса или инверсии может приводить Землю к потеплению. Оговоримся, что в качестве исходного состояния мы рассмотрели ситуацию, когда атмосфера сильно запылена. В настоящее время атмосфера прозрачна и наша модель не применима. Возникает вопрос, всегда ли экскурс или инверсия приводит к потеплению? Как мы отмечали выше, на этот счет имеются различные мнения. В моменты прохождения экскурсов полярность геомагнитного поля меняется, на Земле происходит увеличение интенсивности вулканической деятельности, сопровождающейся выбросом пирокластики, самая тонкая фракция которой может находиться годами взвешенной в атмосфере, в результате чего и возникает т.н. «вулканическая зима» (Rampino, Stothers, 1985; Rampino, Ambrose, 2000). Температура



поверхности Земли при этом понижается. Известно, что в условиях прозрачной атмосферы понижение температуры может произойти при повышении плотности потока космических лучей в моменты солнечных вспышек, когда возрастает поток СКЛ. Это приводит к дополнительной ионизации, образованию ЯК, атмосферных аэрозолей и, в конечном счете, к экранированию солнечного излучения – т.е. к похолоданию (Гончаренко, Кивва, 2002). Из вышесказанного следует вывод, что в зависимости от оптических свойств атмосферы, прохождение экскурса или инверсии может приводить к похолоданию (в ситуации с чистой атмосферой) либо к потеплению, когда на Земле холодно.

*Супервулканы - источник стратосферной пыли.* Принято считать, что пыль, вмороженная в лед, это осевший стратосферный аэрозоль (СА), образующихся в результате взрывных извержений вулканов, хотя существуют и другие точки зрения. На рис. 9-5, где приведено временное изменение концентрации пыли в слоях льда, чертой снизу выделены периоды времени, предшествующие началу появления пыли, что, по-видимому, связано с началом активного вулканизма. Выделенные интервалы составляют время порядка 10 тыс. лет. Отметим, что в течение последних, примерно, 10 тыс. лет, в стратосфере Земли пыли практически нет; тогда как, в течение предшествующих 60 тыс. лет, - концентрация пыли во льду достигала одного и более р.р.м.

Одно из самых сильных вулканических извержений, произошедших на Земле, это извержение вулкана Тоба (VEI = 8), которое произошло 74 тыс. лет тому назад (VEI - Volcanic Explosivity Index, индекс взрывного вулканизма, его максимальное значение равно 8). При этом в стратосферу было выброшено, по разным оценкам, от 500 до 5000 млн. тонн аэрозолей (см. рис. 9-8) (Zielinsky et al., 1994). Судя по рис 1, концентрация пыли, вмороженной в лед, достигала в этот период времени 1 р.р.м. После этого извержения наличие пыли в стратосфере отмечалось практически непрерывно в течение 60 тыс. лет, возрастая после очередного сильного извержения и уменьшаясь в промежутках между ними (см. рис.9-5).

Роль СА вулканического происхождения (вулканической пыли) в изменении климата, в частности – похолодании, - хорошо изучена; это т.н. «вулканическая зима» (Rampino M.R., et al., 1988). Величина понижения температуры поверхности Земли после сильных эксплозивных извержений современных вулканов оценена (рис. 2). Извержение вулкана Тамбора (Индонезия) самое сильное (VEI = 7) из произошедших за последние 200 – 300 лет. После этого извержения (1815) в течение 2-3 лет концентрация пыли во льду Гренландии достигала 94 р.р.б. (1 р.р.б. =  $10^{-9}$ ) (Rampino, 2002).

Оценим концентрацию вулканических аэрозолей в стратосфере, учитывая, что они занимают не весь объем атмосферы, а сосредоточены в слое толщиной, порядка, 1 км на высоте около 20 км. Для начала сделаем общую оценку концентрации пыли. Масса атмосферы, как известно,  $\approx 5 \cdot 10^{15}$  тонн, масса СА может достигать, как при извержении Тоба, значения  $5 \cdot 10^9$  тонн (Rampino M.R., et al., 1988; Zielinsky et al., 1994), объемная концентрация аэрозолей  $10^{-6} = 1$  р.р.м. Эта величина, по данным рис. 1, соответствует концентрации пыли в слое льда, образовавшегося в период времени извержения Тоба. Казалось бы, мы получили соответствие величин концентраций, однако, учитывая то, что аэрозоль находится в сравнительно тонком слое, объемная концентрация аэрозолей в этом слое должна быть значительно выше.

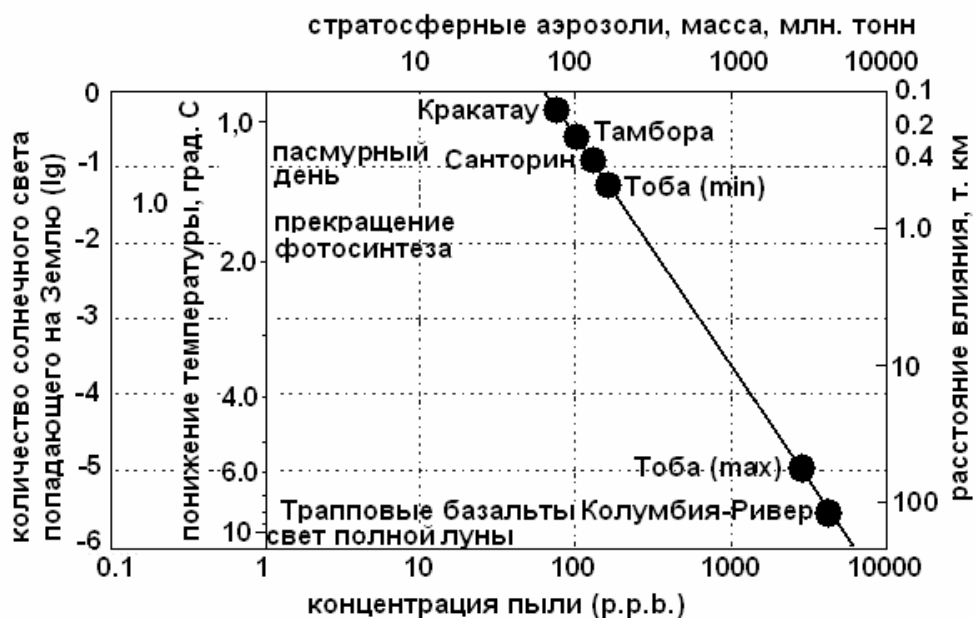


Рис. 9-8. Экранирование солнечного света SA эксплозивных вулканических извержений (Rampino, et al., 1988; Rampino, 2002). Верхняя шкала: масса аэрозоля, выброшенного в стратосферу, при извержении. Нижняя шкала – концентрация пыли Шкала слева: количество солнечного света попадающего на Землю и понижение температуры поверхности Земли в зависимости от массы аэрозоля. Справа – расстояние влияния извержения

Поверхностная плотность пыли, от которой зависит пропускание солнечного излучения к поверхности Земли, не зависит от того, расположены пылинки в тонком слое или по всему объему атмосферы. Если площадь поверхности Земли равна  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$ , то поверхностная плотность пыли в случае извержения вулкана Тоба составляет около  $10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ . Попытаемся оценить этот параметр по характеристикам льда. Отметим, что в ядрах льда пыль распределена неравномерно. Характерное время нарастания концентрации пыли от извержения Тоба (см. рис. 9-5) составляет 1 – 2 тыс. лет. Средняя скорость образования льда равна, примерно, 1,5 см в год (Juozel, 1993), и толщина льда, образовавшегося в период накопления пыли от извержения вулкана Тоба, достигает, примерно, 20 м, что соответствует поверхностной плотности пыли во льду  $\sim 10^{-3} \text{ г} / \text{см}^2$ .

Полагая, что пыль была сосредоточена в слое атмосферы толщиной 1 км, расположенным на высоте 20 км, и если масса пылинки равна  $10^{-14} \text{ г}$ , то концентрация пыли в этом слое достигала  $10^6 \text{ см}^{-3}$ . Поскольку плотность воздуха на такой высоте составляет, примерно,  $10^{-4} \text{ г} / \text{см}^3$ , то получим реальную концентрацию пыли в таком слое, равную 100 р.р.т. Таким образом, концентрация пылевого аэрозоля в слое атмосферы может на два порядка превышать концентрацию, регистрируемую во льду и осадках. Поскольку поверхностная плотность пыли составляет  $10^{-3} \text{ г} / \text{см}^2$ , то при плотности вещества в конденсированном состоянии, равной, примерно,  $1 \text{ г} / \text{см}^3$  толщина слоя этого вещества будет равна 10 мкм.

Информация об извержении супервулкана Тоба хорошо известна. Вероятно, эпизод резкого возрастания концентрации пыли во время его извержения – обоснован. Значительно меньше информации о других супервулканах, те сведения, которые удалось по ним собрать, - представлены на рис. 9-9. Очевидно, что эту работу следует продолжить, т.к. знание о супервулканах крайне необходимо, т.к. одно извержение супервулкана, например, такого как происходит сейчас на Ио – спутнике Юпитера, может оказаться очень полезным.

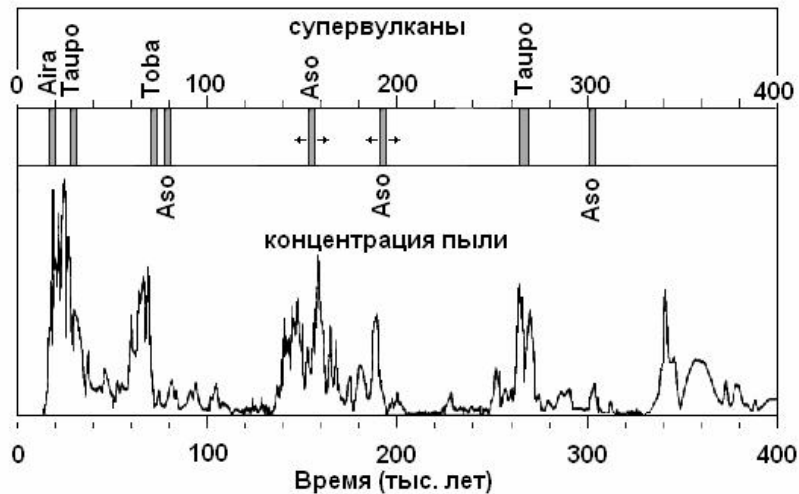


Рис. 9-9. Супервулканы и концентрация пыли.

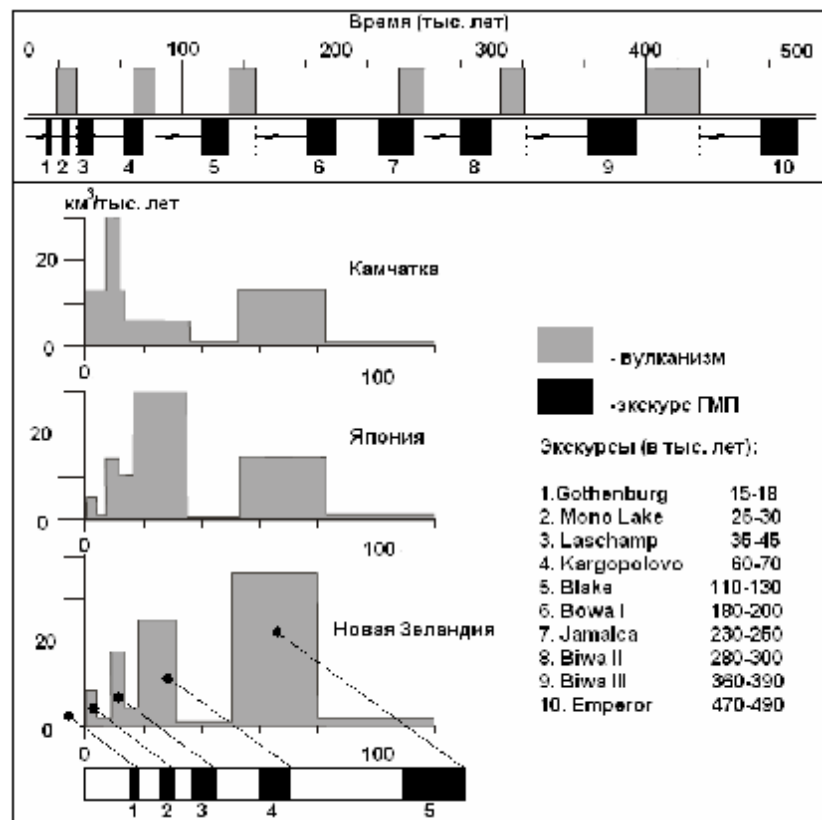


Рис. 9-10. ЭкскуРСЫ ГМП предшествуют кратковременным периодам усиления вулканизма.

На верхней панели рис. 9-10 приведена последовательность циклов вулканизма и ГМП. Рис. 9-10 показывает, что экскурсы предшествуют циклам вулканизма примерно на 20 – 30 тыс. лет. Геоманетное поле, как это следует из модели горячей Земли, инерционностью не обладает. Все явления геоманетизма происходят (по модели) на границе внутреннего ядра. Именно здесь возникает избыточное давление, которое передается на границу ядро-мантия и, релаксируя в литосфере, вызывает её упруго-пластическое течение.

Оценим характерное время вязкоупругой релаксации вещества мантии на воздействие геодинамического импульса вызванного кратковременным циклом

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

На рис. 9-10 (нижняя панель) показана вариация активного вулканизма за последние 100 тыс. лет - для трех регионов (Селиверстов, 2004). На этом же рисунке приведен список экскурсов и показано, что замеченная выше особенность, подтверждается ещё в большей степени, чем на верхней панели этого рисунка. Можно отметить такую особенность: чем продолжительнее экскурс, тем больше время задержки и интенсивнее вулканизм.

Сказанное выше позволяет считать взаимосвязь: экскурс ГМП – вулканизм – стратосферная пыль – похолодание вполне обоснованной. Представляется, что этот результат должен быть использован в дальнейшем, при построении теории климата.

Подведем итоги этого раздела:

1. Как известно, в настоящее время на Земле не существует значительных источников пыли: нет сильных и частых извержений вулканов, не происходит интенсивного испарения океана и образования солевых частиц, а стратосфера практически прозрачна. Поэтому наблюдатель не имеет возможности исследовать экспериментально разрушение пылевого слоя быстрыми протонами и ионами. Сильные извержения вулканов и другие источники пыли, приводящие к похолоданию, производили пылевые завесы солнечного излучения задолго до того как были освоены методы оптического мониторинга атмосферы и поэтому мы не можем сравнить скорость убывания пыли в атмосфере и роль в этом процессе частиц солнечного ветра. Конечно, имеется некоторая вероятность того, что мы обнаружили случайное совпадение экскурсов с периодами уменьшения концентрации пыли. Однако, так как это не единственное совпадение, а совпадения достаточно часты, как это следует из Таблицы 1, то можно предполагать реальную возможность влияния частиц ГКЛ, проникающих в атмосферу Земли в момент отсутствия геомагнитного поля, на изменения климата. Выясним, как влияет величина модуля геомагнитного поля на количество частиц солнечного ветра и ГКЛ, попадающих на Землю. На Земле в настоящее время, наблюдается достаточно спокойное геомагнитное поле, - нет ни экскурсов, ни инверсий. Однако в магнитном поле Земли имеются глобальные магнитные аномалии, в зоне влияния которых модуль геомагнитного поля заметно отличается от поля диполя, что вызывает заметное локальное изменение концентрации частиц солнечного ветра, попадающих на Землю.

2. В качестве аргумента в поддержку нашей модели сошлемся на полученный недавно экспериментальный результат (Vanhellemont, et al., 2002) по корреляции интенсивности нейтронов галактических космических лучей и концентрации стратосферных аэрозолей. Авторы показали, что уменьшение числа нейтронов, регистрируемых в течение 1987 – 1991 гг. с месячным усреднением у поверхности Земли, примерно на 30 %, соответствует увеличению концентрации аэрозолей (высота 26.5 км) - на два порядка. Галактические космические лучи представляют собой протоны, либо мезоны, с энергией, большей, чем 10 ГэВ. Эти частицы полностью поглощаются атмосферой, и поверхности Земли достигают только электрически нейтральные нейтроны, которые регистрируются нейтронными мониторами. Полученный в (Vanhellemont, et al., 2002) результат, так же как в предыдущем случае, подтверждает обсуждаемую здесь модель связи концентрации атмосферных аэрозолей с ГКЛ.

3. Астрономическая теория климата Миланковича давно признана и, за редким исключением, не подвергается сомнению. Наша модель, в отличие от общепринятого

подхода, в качестве основного аргумента предлагает учитывать роль внутренних эндогенных процессов, которые, с одной стороны, приводят к накоплению пыли в стратосфере, с другой, - к разрушению пылинок протонами солнечного ветра и ГКЛ в периоды, когда на Земле практически отсутствует магнитное поле. Реальность астрономической гипотезы климата подвергалась сомнению ещё 70 лет тому назад, когда метеоролог В.А. Костицын (Kostitzin, 1935) полагал, что в результате прецессии может происходить лишь небольшое смещение равноденствий. Известно, насколько слаба климатическая роль эллиптичности земной орбиты. Максимальный, возможный эффект прецессии свелся бы, как считал Костицын, к увеличению продолжительности зимы или лета на несколько дней (самое большее, - на неделю). До оледенения континента отсюда так далеко, что приходится удивляться распространенности этой гипотезы.

Изменения уровня содержания метана обнаруженные в толще льда, извлеченного вблизи станции Восток на Антарктиде (Brook, et al., 1996), сравниваются с аналогичным керном льда, извлеченным в Гренландии. Эти данные, а так же данные по изотопу  $^{18}\text{O}$  и дейтерию идентичны для образцов льда из Антарктиды и Гренландии. Это ставит под сомнение теорию Миланковича согласно которой, потепления Северного и Южного полушарий должны быть в противофазе.

Следует учесть ещё одно, немаловажное обстоятельство. Миланкович разработал теорию для чистой атмосферы. Возможно, будь на Земле атмосфера всегда такой же чистой как в наше время, его теория была бы применима.

4. Как отмечалось выше, в период 47-23 тыс. лет тому назад изменения климата в Антарктиде опережают аналогичные изменения климата в Гренландии примерно на 1-2.5 тыс. лет (Blunier et al., 1998). Насколько известно, объяснения этого эффекта нет. Оценим его с точки зрения нашей модели дрейфа магнитных полюсов в момент инверсии (см. Главу VI). Естественно предположить, что полюса в момент экскурса дрейфуют по поверхности Земли по тем же трассам, что и в момент инверсии. Как отмечалось, заметную роль в этом процессе играют глобальные магнитные аномалии (ГМА), наличие и местоположение которых определяет трассы дрейфа полюсов. Глобальные магнитные аномалии, согласно нашей модели, представляют собой магнитогидродинамические генераторы, квазинезависимые от основного дипольного генератора геомагнитного поля. В период инверсий и экскурсов дипольный источник изменяет свою полярность, при этом магнитное поле ГМА ещё в течение некоторого времени сохраняет прежнее значение. В тот момент, когда поле дипольного источника равно нулю, поле на Земле целиком обязано полю ГМА. В принципе, в этот момент поле может иметь недипольный, а например, - квадрупольный характер. В момент времени, когда поле дипольного источника обратной полярности становится локально равным полю аномалии, оно «аннигилирует», и в течение некоторого времени, в конкретной точке пространства может оказаться так, что поле отсутствует. Так как во времени величина дипольного поля обратного знака возрастает, - локальная точка нулевого поля перемещается по поверхности Земли со скоростью порядка 40 км/год. Расстояние между Гренландией и Антарктидой равно примерно половине длины экватора. Поделив это расстояние на скорость дрейфа, получаем искомую величину задержки климатических изменений меньше 1 тыс. лет.

5. Выше мы обсуждали роль экскурсов геомагнитного поля и связанные с их появлением эпизоды уменьшения модуля геомагнитного поля и возможность проникновения к поверхности Земли частиц солнечного ветра и ГКЛ, в изменениях климата Земли. Взаимодействие этих частиц с пылевым аэрозолем, экранирующим солнечное излучение и приводящим к похолоданию поверхности Земли, может привести к разрушению стратосферного аэрозоля и уменьшению антипарникового эффекта. Заметим, что эта идея не нова, она высказывалась, например, в (Пудовкин, Распопов, 1992). Рисунок 9-5 показывает, что изменение климата, причем, как похолодания, так и потепления, происходят на Земле и при отсутствии пыли. В частности, эта ситуация свойственна современному периоду, продолжающемуся уже 12 тыс. лет.

Общепринято считать, что изменение климата обязано вариации концентрации метана и  $\text{CO}_2$ . Очевидно, что относительно небольшая концентрация этих веществ, приведет к усилению парникового эффекта и потеплению. Однако, когда концентрация их достигнет порогового уровня, парниковый эффект перейдет в антипарниковый, и начнется похолодание. Основным источником метана в атмосфере является Природа (Наг, 1998), причем наибольшее количество метана, способное очень быстро попасть в атмосферу, сосредоточено в газогидратах (Sloan, Jr, 1998; Адушкин и др., 2003). В этих работах рассматривается возможность выделения метана из газогидратов, например, при понижении уровня океана и уменьшении при этом давления, поддерживающего газогидраты в метастабильном состоянии. Другой причиной может быть повышение температуры воды в океане и т.п.

Обратимся к роли антропогенного фактора в увеличении концентрации метана и, соответственно, его роли в изменении климата. Этот вопрос не имеет однозначного толкования, например, в (Kalnay, Cai, 2003) сравнивается влияние парникового эффекта и изменений климата за счет урбанизации и влияния сельскохозяйственной деятельности. Разделить эти причины довольно трудно, т.к. каждая из них приводит к повышению средней дневной температуры поверхности Земли. В работе сравниваются тренды температуры, измеренной в течение последних 50 лет в США, в районах больших городов и в сельскохозяйственных районах. Показано, что антропогенный фактор оказывает влияние только в районах мегаполисов, в то время как он практически не сказывается в сельскохозяйственных районах.

И, наконец, 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” (Chen, et al., 2002) предназначенных для изучения баланса поглощаемой и излучаемой Землей энергии, показано, что за период 1985-2000 гг. тепловое излучение Земли возросло более чем на  $5 \text{ Вт/м}^2$ , в то время как количество отраженной энергии солнечной радиации упало на  $2 \text{ Вт/м}^2$ . (Поток солнечной энергии, падающий на Землю составляет  $1360 \text{ Вт/м}^2$ ). Эти данные показывают, что Земля скорее охлаждается, чем нагревается. Авторы полагают, что причина дисбаланса потоков тепла состоит в усилении циркуляции в тропической атмосфере, и приходят к выводу о том, что с полной уверенностью обозначить механизм климатических перемен ещё невозможно.

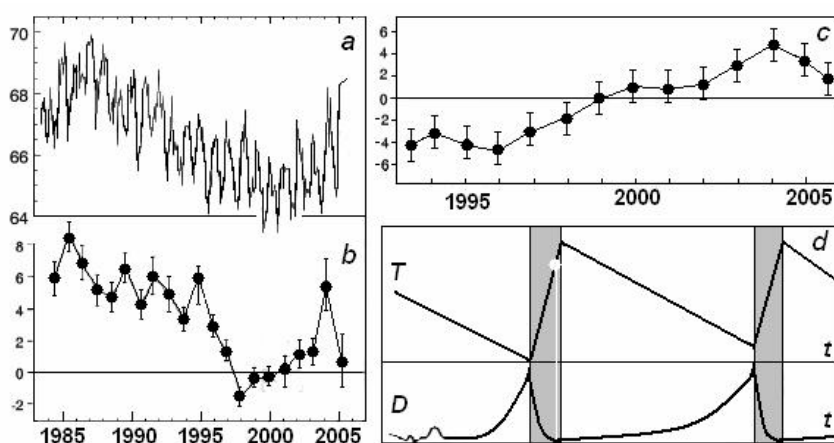


Рис. 9.11. Вариации концентрации стратосферного аэрозоля % (a), альbedo Земли (b) (Palle, et al., 2006), аномалии теплосодержания океана (c) и температуры  $T$  и концентрации пыли  $D$  (d).

Этот вывод был подкреплён исследованиями, проведенными в течение последних пяти лет (рис. 9-11-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 (2006) рассматривает наличие отрицательного тренда коротковолнового отраженного солнечного излучения 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 (рис. 9-5). Оказывается, что такая ситуация происходила и ранее. Конечно, точно определить величину альbedo Земли примерно 100 тыс. лет тому назад невозможно. Однако если допустить, что альbedo 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 «альbedo». Связь альbedo с концентрацией стратосферного аэрозоля подтверждает рис. 9-11-а и 9-11-б, а связь температуры и концентрации пыли - рис. 9-11-d. 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.

В частности, на рис. 9-11-d видно, что концентрация пыли  $D$  уже достигла минимума и стала увеличиваться (альbedo возрастает), а температура  $T$  продолжала расти. Не происходит ли подобная ситуация в настоящее время? Если это так, то **Земля стоит на пороге начала резкого похолодания.**

#### IX. 4. Роль инверсий и экскурсов геомагнитного поля в эволюции человека.

Одним из первых, кто высказал предположение, что жизнь на Земле могла бы быть совершенно иной, если бы отсутствовало геомагнитное поле, т.е. отсутствовало его экранирующее от радиации космоса влияние, был Р. Уффен (Uffen, 1963). С этим мнением был согласен известный магнитолог Паркинсон, который считал, что жизнь на Земле могла бы зародиться лишь после того, как возникло геомагнитное поле, экранирующее Землю от смертоносных космических лучей.

Покажем, что вековые вариации геомагнитного поля - инверсии и экскурсы «контролируют» не только этапы резкого потепления климата, но и этапы биологической эволюции Земли, в частности, эволюции человека. Как отмечалось выше, в моменты инверсий и экскурсов радиационный фон Земли значительно возрастает, что приводит, с одной стороны, к резкому потеплению и таянию ледников и, с другой, - к генетическим мутациям животного и растительного мира. Так, например, в момент инверсии Гаусс-Матуяма, произошедшей примерно 2.3 млн. лет тому назад, произошла сильная генетическая мутация человекоподобной обезьяны (австралопитека), которая привела к возникновению нового вида (гомо эректус), который, в свою очередь, подвергшись нескольким импульсным радиационным воздействиям, превратился, в конечном счете, в современного человека.

*Эволюция человека.* Известно довольно большое количество схем эволюции человека, причем, каждая из таких схем, несколько отличаясь в деталях от других, аналогичных, имеет некую общность. Она состоит в том, что все схемы, в той или иной степени, представляют собой генетическое, эволюционное «дерево». Такой подход к проблеме

эволюции берет начало с работ Ч. Дарвина. Согласно общепринятым представлениям, один вид, эволюционируя, развивается и замещает собой другой, - родительский. Именно поэтому на большинстве схем их авторы проводят соединительные межвидовые линии, как правило, сопровождаемые вопросами. Возникновение вопросов вызвано тем, что антропологи не находят устойчивых данных, подтверждающих конкретные связи предков человека – гоминид, с человеком современным.

Единого мнения по поводу временной схемы развития гоминид и человека, а также взаимосвязи видов, не существует (Wood 2002). Антропологи и генетики согласны лишь в том, что и те, и другие произошли в Африке. Антропологи (Wood, 2002) аргументируют этот вывод тем, что возраст неафриканских находок ископаемых останков гоминид не превышает 2 млн. лет. Тогда как в Африке найдены останки, имеющие возраст около 6 - 7 млн. лет (Brunet, et al., 2002). Генетические исследования эволюционной истории человечества так же указывают на Африку (Jorde, et al., 1998; Satta, Takahata, 2004; Cann, et al., 1987; Horai, et al., 1995; Foley, 1998; Huelsenbeck, Imennov, 2002), как на место зарождения современного человека.

Генетическими исследованиями событий эволюционной истории человека выявлены следующие точки на временной шкале. Известно, что люди и человекообразные обезьяны имели общих предков, но не горилла и не орангутанг, оказались нашими ближайшими родственниками, - а шимпанзе. Расхождение филогенетических ветвей человека и шимпанзе произошло около 5 млн. лет назад (Табл. 9.2), по разным данным: (Takahata, Satta, 1997) = 4.5; (Gagneux, et al., 1999) = 4.7; (Takahata, et al., 1995) = 4.6; (Horai, et al., 1995) = 4.9; (Chou, et al., 2002) = 5.3; (Glazko, Nei, 2003) = 6.3. Дата ~ 5 млн. лет назад соответствует инверсии геомагнитного поля и является пограничной точкой эпох Миоцена и Плиоцена.

Известно, что для реконструкции истории человечества используется метод “молекулярных часов”. Наиболее информативными в настоящее время объектами исследований являются митохондриальная ДНК и У-хромосома. Первая (мтДНК) передается только по материнской линии, в то время как У-хромосома, - только по мужской. Мутации, которые в них появляются, маркируют потомство. Анализируя древние мутации в современных людях, можно понять, как шла эволюция человека. Так как скорость накопления мутаций – величина постоянная, то можно установить, когда жил последний общий предок данных видов. В настоящее время генетики оценивают датировку этих мутаций, анализируя ДНК современных людей, так как биополимерные молекулы, выделенные из останков старше 100 тыс. лет (Chou, et. al., 2002), теряют исходные свойства, и требуют специальных операций при работе с ними.

Методом “молекулярных часов” была получена дата отделения линии гориллы (в млн. лет): (Takahata et al., 1995) = 7.2; (Glazko, Nei, 2003) = 7.0. Эта дата совпадает с нижней границей Мессенианского этапа миоценового периода и времени инверсии на палеомагнитной шкале.

Граница этапов эпохи Плиоцена (возраст 2,6 млн. лет) является датой мутаций, обнаруженных у всех современных людей. Эти мутации предшествуют времени возникновения принципиально нового вида *Homo erectus* (Wood, 2002). Этот вид отличается от всех ранее живущих гоминид резким возрастанием объема головного мозга и считается предком современного человека (Hawks, et al., 2000). Мутация, в результате которой был инактивирован ген, кодирующий наработку сахарозы на поверхности клетки, имеет возраст ~ 2,8 млн. лет (Chou, et al., 2002). Примерно этот же возраст (~ 2,4 млн. лет) имеет мутация гена миозина, в результате которой произошло значительное уменьшение объема и силы мощных жевательных мускулов, характерных для человекообразных обезьян и, по словам авторов (Stedman, et al., 2004), были ликвидированы анатомические ограничения роста объема черепной коробки, и, как следствие, увеличения объема головного мозга.



К событиям этого времени ( $2,60 \pm 0,94$  млн. лет) отнесем недавно обнаруженное разделение африканских слонов на два вида (Roca, et al., 2001). Заметим, что предшествующее этому разделение слонов на азиатских и африканских, - по времени совпадает с расхождением генетических линий человека и шимпанзе ( $\sim 5$  млн. лет) (Roca, et al., 2001).

Сравнение мтДНК современных людей и мтДНК, выделенной из останков неандертальцев, до недавнего времени считавшихся нашими предками (Rozzi, Castro, 2004), показало, что их линии являются параллельными, а не последовательными (Serre, et al., 2004). Разъединение между линиями человека и неандертальца произошло около 500 тыс. лет назад (Takahata et al., 2001), что также находит отражение в палеомагнитной шкале.

Таблица 9.2. Этапы эволюции человека, палеонтологическая и палеомагнитная шкалы.

0.015 – раса европейцев и североафриканцев	£	- 0.015	Gothenburg
0.046 – раса жителей северной Азии	¥	- 0.045	Laschamp
0.1 - общий предок современного человека (по Y-хромосоме)	¥	- 0.11 - 0.13	Blake
0.23 - общий предок современного человека (по мт ДНК)	¥	- 0.23 - 0.25	Jamaica
0.5 – разветвление генетических линий современного человека и Неандертальца	¥	- 0.47 - 0.55	Emperor Big Lost
2.1-2.2 - возникновение Homo erectus	¥/F	- 2.110 - 2.270	Reunion
2.4 -2.8 – мутации, обеспечившие возникновение Homo erectus	F	- 2.6	Matuyama-Gauss boundary
$2.6 \pm 0,94$ – разделение Африканских слонов на две группы	F		
5 (4.5; 4.7; 4.9; 4.93; 5.2) – расхождение человека и шимпанзе	F/€	- 5.0	Gilbert boundary
5 – разделение слонов на Африканских и Азиатских			
6-7 – останки гоминид	€	- 6.0 -	инверсия
7.2 – отделение линии гориллы	€	- 7.3 -	инверсия

£ - Holocene; ¥ - Pleistocene; F - Pliocene; € - Miocene

Возраст общего предка современных людей и место его возникновения оценивался различными авторами (Cann, et al., 1987; Vigilant, et al., 1991; Horai, et al., 1995; Takahata, et al., 2001). По последним оценкам, средний возраст самой древней обнаруженной мтДНК составляет 230 тыс. лет, и 100 тыс. лет - для Y-хромосомы, причем, оба имеют африканские корни (Cavalli-Sforza, Feldman, 2003). Однако это совсем не означает, что в эти периоды существовало по одной женщине, или по одному мужчине, или не было линий-современников мтДНК и Y-хромосомы. Считается, что к нашему времени сохранились потомки только этих линий. Дата возникновения этих мтДНК и Y-хромосомы соответствует событиям, отраженным на палеомагнитной шкале, а именно моментам экскурсов геомагнитного поля.

Филогенетическая схема, составленная антропологами исходя из найденных останков, дает представление о временных периодах существования разных видов гоминид. По этой схеме можно видеть, что этап от 5 до 2 млн. лет соответствует гоминидам с маленьким объема головного мозга (Takahata, et al., 2001), не менявшимся в течение этого периода. Обнаружено, что увеличение размеров мозга у представителей семейства (Wood, 2002) произошло в эпоху Плейстоцена. Последние находки новых видов гоминидов заставляют авторов (Wood, 2002) отойти от названия представленной схемы «деревом», согласно которой представленные виды связывались в последовательные цепочки «предок-потомок». Целесообразность нового подхода подтверждается антропологическими характеристиками последних находок останков гоминид, схожих с представителями более позднего времени (Brunet, et al., 2002). Антропологи (Wood, 2002) склонны представлять эволюцию гоминид сродни разрастанию куста, когда в течение данного периода появляется сразу несколько видов гоминид, причем причина такого разрастания не называется.

На рис. 9-12 показано расхождение между расами в генетических расстояниях. Видно, например, что африканская раса не изменялась на дистанции 0.220, в то время как европейцы и североафриканцы подверглись трем бифуркациям. Последняя бифуркация соответствует дистанции 0.015. Генетические расстояния определяются по частоте рекомбинаций между генетическими маркерами. Это количественная характеристика сравниваемых объектов (популяций, видов и т.п.), определяющая среднее число замен нуклеотидов в каждом локусе, которые произошли за время раздельной эволюции двух групп организмов; в настоящее время наиболее широко применяется метод расчета генетических расстояний по Нью (*Nei genetic distance*). Известно, что генетическое расстояние коррелирует с датами бифуркаций. Ниже, на схеме, приведены периоды экскурсов эпохи Брунес. По-видимому, совпадения дат и расстояний не случайны. По нашей модели, именно наличие экскурсов и явлений повышения радиационного фона, с ними связанных, может служить причиной разделения человечества на расы (см. Табл. 2).

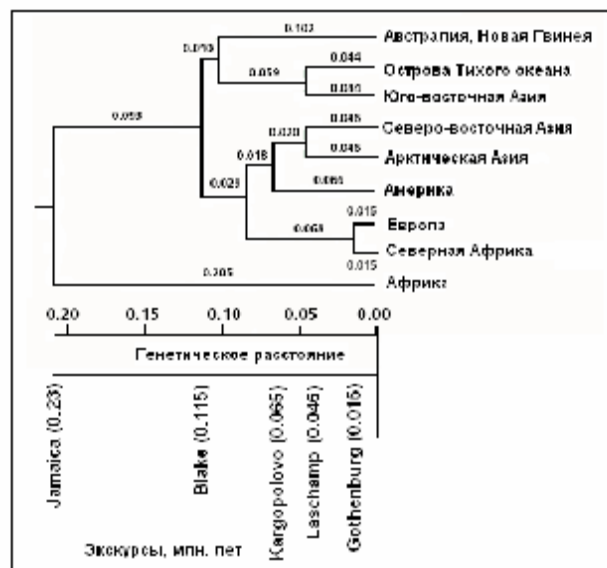


Рис. 9-12. Схема возникновения человеческих рас в терминах генетических расстояний (Cavalli-Sforza, Feldman, 2003) и экскурсы геомагнитного поля (млн. лет).

*Почему Африка?* Один из принципиальных вопросов из области проблем эволюции человека заключается в том, почему местом рождения современного человека является Африка? Почему все попытки найти следы возникновения (но не миграции) гомо сапиенс на других континентах оканчивались безрезультатно? Почему первобытные люди стали расселяться из Африки? Почему именно в Африке находят следы генетических мутаций многих других биологических видов? Ответом на эти вопросы было бы доказательство того, что именно в Африке радиационный фон в период инверсий и экскурсов был наибольшим, значительно превышающим фон на других континентах. Прямых палеоданных по радиационному фону в периоды инверсий, насколько известно, нет. Нам остается обратиться к опубликованным данным по поведению геомагнитного поля в периоды одних и тех же инверсий и экскурсов, записанных в осадках или вулканических извержениях, произошедших в различных регионах Земли, и выяснить действительно ли магнитное поле в Африке уменьшалось в большей степени, чем в других регионах. Обратимся к данным.

Авторы (Hartl, Таухе, 1996) показали, что уменьшение модуля поля в момент инверсии Брунес-Матуяма и предшествующего инверсии экскурса Хурамильо, было различным для различных регионов. Пробы брались в районах расположения базальтов,

излившихся на дно океанов вблизи Индонезии ( $0^\circ$ ,  $160^\circ$  E) и западного берега Африки ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ W). В первом случае уменьшение модуля поля не превышало  $1/10$  от его нормальной величины, во втором, - понижение модуля было менее  $1/30$  от нормального значения. Эти данные подтверждаются другими аналогичными наблюдениями. Так, например, в (Oda, et al., 2000) показано, что в момент этой инверсии в базальтах, излившихся в районе острова Барнео ( $7^\circ$  N,  $122^\circ$  E), модуль поля уменьшился примерно в  $5-7$  раз от его нормальной величины. Аналогичное по величине уменьшение было зафиксировано вблизи побережья Калифорнии (Heider, et al., 2000). Значительное понижение модуля было зарегистрировано вблизи западного побережья Африки (Yamazaki, Oda, 2001). Авторы зарегистрировали уменьшение модуля геомагнитного поля в периоды инверсии Брюнес-Матуяма и экскурса Хурамильо, не менее чем в сто раз.

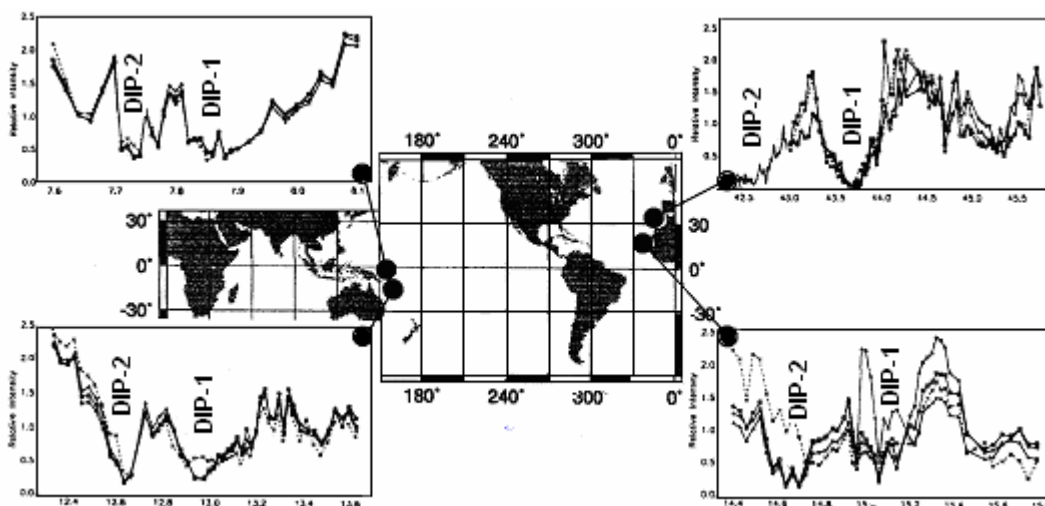


Рис. 9-13. Уменьшение интенсивности геомагнитного поля в период инверсии Брюнес-Матуяма (DIP-2) и предшествующего инверсии экскурса Хурамильо (DIP-1) (Hartl, Tauxe, 1996). Черными точками и линиями показаны места взятия проб.

Приведенные данные по поведению модуля поля в моменты инверсий можно считать подтверждением теории дрейфа магнитных полюсов в моменты инверсий и экскурсов (Глава 6). Согласно этой теории дрейф полюсов происходит по вполне определенным траекториям, на которых располагаются глобальные магнитные аномалии (Kuznetsov, 1999). В момент времени инверсии (экскурса), когда поле дипольного источника становится близким к нулю, собственное поле глобальных магнитных аномалий ещё сохраняет свое прежнее значение. Поле дипольного источника возрастает от нулевого значения со знаком, обратным предыдущему. Это приводит к аннигиляции поля дипольного источника и поля аномалии. По этой схеме происходит смена полярности поля на выделенных трассах. В тех же районах, где влияние аномалий не сказывается, например, в Африке, модуль поля во время инверсий и экскурсов становится практически равным нулю. Палеомагнитные данные однозначно показывают, что в момент инверсии - модуль геомагнитного поля в Африке уменьшается значительно больше (в 100 и более раз), по сравнению с другими регионами (Азией, Австралией, Америкой), где модуль поля уменьшается не более чем в 10 раз.

*Рост уровня радиации при уменьшении модуля геомагнитного поля.* Оценим характер зависимости радиационной дозы  $D$  от величины модуля геомагнитного поля  $B$ . Очевидно, что в момент инверсии (экскурса), когда модуль поля значительно уменьшается, величина корпускулярного потока, попадающего на Землю, возрастает, иначе, увеличивается уровень радиации Земли. В целях упрощения оценок, будем полагать, что приходящая на

Землю радиация (в зивертах) биологическими объектами, обитающими на Земле, полностью поглощается, при этом поглощенная доза (в греях) точно равна уровню радиации (в зивертах). Такое допущение, в частности, означает, что радиационный фон ГКЛ (равный на поверхности Земли  $\sim 0.5 \cdot 10^{-3}$  Зв) эквивалентен дозе ( $\sim 0.5 \cdot 10^{-3}$  Гр, т.к.  $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} = 10^4 \text{ эрг/г}$ ).

При построении зависимости: «радиационная доза – модуль геомагнитного поля» учтем величины общепринятых значений дозы. Будем считать, приближенно, что при уменьшении модуля геомагнитного поля в 100 раз, радиационная доза возрастает, по крайней мере, не менее чем в 100 раз. В действительности, увеличение дозы, без учета ослабляющего действия атмосферы, может быть даже больше. Докажем это утверждение. Энергия частиц, отклоняемых геомагнитным полем  $E$  примерно пропорциональна величине геомагнитного поля  $B$ :  $E \sim B$ . (Речь идет о величине горизонтальной компоненты поля, т.к. степень отклонения частиц определяется значением Н-компоненты). На заряженную частицу, попадающую в магнитное поле, как известно, действует сила Лоренца  $F = Z evB$ , равная центробежной силе  $mv^2/R$ , иначе:  $mv = Z evR$ . Переходя к более удобным единицам, получаем:  $E = 300 ZBR$ , где:  $E$  – энергия частицы в МэВ,  $Z$  – заряд частицы,  $B$  – индукция магнитного поля в Тл,  $R$  – радиус кривизны траектории частицы в м,  $e$  – заряд электрона,  $v$  – скорость частицы,  $m$  – её масса.

Принято считать поток ГКЛ величиной фрактальной. Это означает, что число частиц потока ГКЛ  $N$ , обладающих энергией  $E$ :  $N_{(E)} \sim E^{-d}$ , где  $1 < d < 2$ ,  $d$  – фрактальная размерность. Учет этого обстоятельства позволяет ориентировочно оценить, как будет возрастать радиационная доза, при уменьшении модуля геомагнитного поля. Например, если модуль поля уменьшится в период инверсии в 100 раз, то доза может увеличиться даже больше чем в 100 раз, в пределе, в 10 000 раз. Докажем справедливость этой оценки. Как было показано, чем меньше величина магнитной индукции, тем частицы меньшей энергии способны преодолевать защитную магнитную оболочку Земли:  $E \sim B$ . Это соответствует тому, что плотность потока КЛ, попадающего на Землю, возрастает. Доза ионизирующего излучения на поверхности Земли  $D$  определяется плотностью потока частиц  $P$ , коэффициентом передачи энергии  $L$  и временем действия ионизирующего излучения  $t$ :  $D = PLt$ . Очевидно, что если параметры  $Lt$  – не меняются, то плотность потока  $P \sim N_{(E)}$ , следовательно, и  $D \sim N_{(E)}$ . Учитывая принятое нами ранее  $N_{(E)} \sim E^{-d}$ , где  $1 < d < 2$ , то и доза  $D \sim B^{-d}$ . Т.о. мы получили зависимость, показывающую, что *уменьшение величины геомагнитного поля приводит к росту дозы ионизирующего излучения*. Речь идет пока только об эффекте уменьшения отклонения заряженных частиц при уменьшении величины магнитной индукции Земли. Если учесть, что при этом будут разрушаться радиационные пояса, то поток заряженных частиц на Землю возрастет ещё больше, что приведет к ещё большему возрастанию дозы ионизирующего излучения. С другой стороны, в наших оценках пока не учитывается защитная роль атмосферы. Как отмечалось, быстрые частицы, даже частицы ГКЛ, не достигают поверхности Земли, но образующиеся медленные нейтроны и ионизирующее излучение, возникающее при рассеянии ГКЛ на атомах атмосферы, являются причиной увеличения дозы.

Фрактальная размерность  $d$ , согласно нашей модели, может меняться от 1 до 2. При этом радиационная доза  $D$ , в зависимости от величины  $B$ , может меняться от  $D \sim B$  (линия 1 – 3 на рис. 9-14) до  $D \sim B^{-2}$  (линия 2 – 4). На этом рисунке, на шкале  $\lg D$  (в зивертах/год) отмечены три характерных значения дозы: *фон*  $\approx 2 - 3$  мЗв; *доза риска*  $\approx 60$  мЗв; *доза летального исхода*  $\approx 6 - 8$  зиверт/год.

Обратимся к опубликованным данным и выясним, изменяется ли доза при вариации геомагнитного поля. В одной из первых работ на эту тему (Harrison 1968) утверждается, что такая зависимость действительно существует, причем фрактальная размерность  $d \approx 1$  (точки 5 на рис. 9-14). Этот результат можно подкрепить данными, полученными на спутниках при изучении радиации в районе Бразильской (Южно-Атлантической - SAA) магнитной аномалии. Как известно, в эпицентре SAA вертикальная

компонента геомагнитного поля меньше её нормального значения примерно в 3 раза. Радиационный фон (доза) в районе SAA примерно в 7 раз больше, чем в её окрестности (Heirtzler, 2002). Отсюда следует, что доза ионизирующего облучения:  $D \sim H^{-1.7}$ , где  $H$  - горизонтальная компонента геомагнитного поля. Если учесть только эффект отклонения космических лучей геомагнитным полем, то можно считать:  $B \approx H$ , тогда,  $d \approx 1.7$ , соответствуют точке б. Такая замена логична, т.к. именно горизонтальная компонента обеспечивает поворот заряженных частиц, направляющихся к Земле.

Приведем ещё один пример, в котором авторы (Gosse, Phillios, 2001) ссылаются на зафиксированное десятикратное увеличение относительной интенсивности геомагнитного поля после ее понижения, обусловленной инверсией.

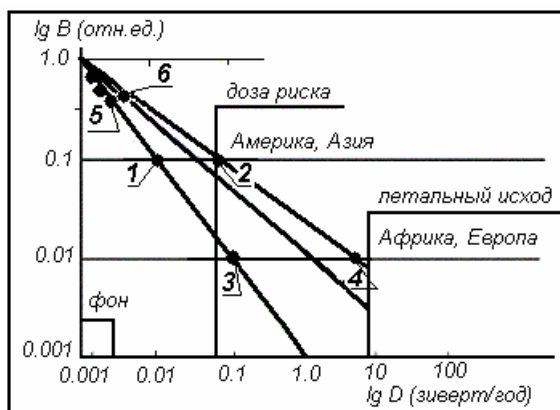


Рис. 9-14. Увеличение радиационной дозы на Земле ( $D$ ) при уменьшении модуля поля ( $B$ ).

Сравним величину дозы, приходящейся на два различных региона, в одном из которых модуль геомагнитного поля в период инверсии уменьшился в 10 раз (Америка, Азия), с другим (Африка, Европа), в котором поле уменьшилось в 100 раз. Предположим, что величина фрактальной размерности  $d \approx 1.4$ . Надо сказать, что такое значение величины  $d$  характерно для природных процессов, имеющих фрактальный характер (средняя линия). Будем рассматривать область значений, при которых радиационная доза больше дозы риска. При этом оказывается, что в Америке и Азии доза риска (начало генетических мутаций) вообще не будет достигнута, в то время как в Африке доза может быть  $\sim 1$  зв/год. Известно, что при дозе, большей, чем 200 мЗв/год, преобладает массовая гибель клеток. Приведенные оценки показывают, что радиационная доза может сильно отличаться для различных регионов мира при едином, общем для Земли, явлении инверсии или экскурса.

#### IX. 5. Электрические явления в атмосфере и унитарная вариация.

*Общие замечания.* В.И.Герасименко (1976) приводит высказывание знаменитого английского физика Томсона (Лорда Кельвина) о том, что в будущем предсказание погоды будет осуществляться посредством электрометра. Это будущее еще не наступило, но предвидению классика (как будет следовать из нашей модели взаимосвязи атмосферы и электричества) нельзя не удивляться. В середине века проблема атмосферного электричества была очень популярна среди физиков, именно тогда вышли в свет хорошо известные книги по атмосферному электричеству: Я.И.Френкеля (1949) и П.Н.Тверского (1949). Казалось, что проблема атмосферного электричества вот-вот будет решена, однако, надежды так и не оправдались. Ни в России, ни за рубежом, не нашлось автора, который сумел бы убедить коллег в том, что его модель наиболее адекватна явлению атмосферного электричества. В последнее время интерес к этой проблеме значительно уменьшился, книг и статей по атмосферному электричеству встречается всё меньше и меньше, и в связи с

этим следует напомнить некоторые идеи и наиболее достоверные экспериментальные факты, имеющие отношение к атмосферному электричеству. Заметим, что ослабление интереса к атмосферному электричеству происходит на фоне настоящего бума, связанного с такими «электрическими» явлениями как спрайты. Спрайты – недавно обнаруженное физиками явление светящихся “электрических разрядов”, возникающих между верхней частью грозового облака и ионосферой.

*Данные: Электрические параметры.* Известно, что Земля заряжена отрицательно относительно окружающего её пространства. Принято считать, что положительный заряд сосредоточен в т.н. электросфере, часто отождествляемой с ионосферой. Напряженность электрического поля у поверхности Земли практически постоянна вдоль её поверхности, весьма незначительно меняется во времени и составляет (при выполнении условий “хорошей погоды”: т.е. при отсутствии грозовой и интенсивной кучевой облачности, осадков, метели, поземки и других атмосферных явлений):  $E \approx 120 - 150$  В/м над океаном и  $75 - 125$  В/м над материками. По сравнению с окружающим Землю воздухом, вещество Земли можно считать хорошим проводником. Это допущение позволяет рассчитать величину электрического заряда Земли:  $Q = \epsilon_0 R^2 E$ , где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $R$  – земной радиус, а величина заряда оказывается равной:  $Q \approx 6 \times 10^5$  кулон. Величина электрического поля  $E = j/S$  достаточно быстро уменьшается с высотой (см. рис. 9-15), что связано с возрастанием проводимости атмосферы  $S$ , в то время как ток проводимости ( $j$  – плотность тока:  $j \approx 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>) от высоты практически не зависит. Интегрируя  $j$  по поверхности Земли, можно подсчитать полный “ток утечки” Земли:  $I \approx 10^3$  А. Полное сопротивление атмосферы  $R \approx 230$  Ом. Используя известную формулу  $Q = It$ , можно оценить  $t$  – “время разрядки” конденсатора “Земля-ионосфера”, оно оказывается равным 10 минутам (!). Каков же должен быть источник атмосферного электрического поля, чтобы поддерживать поле практически постоянным? Ответ на этот вопрос, несмотря на многочисленные попытки, до сих пор так и не получен.

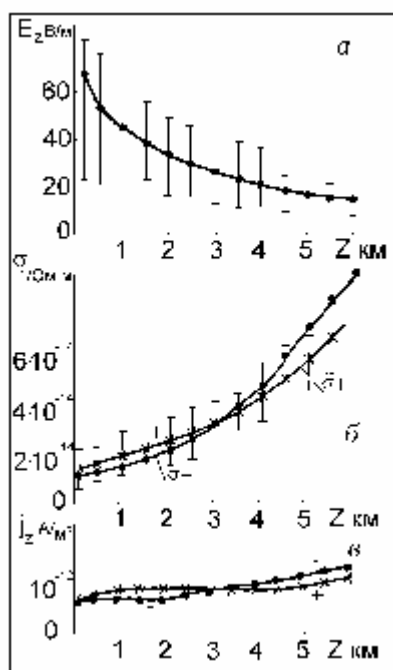


Рис. 9-15. Изменение поля  $E$ , проводимости атмосферы  $\sigma$  и плотности тока  $j$  с высотой  $z$ . (Рокитянский, 1981).

Проблема сохранения Земли электрического заряда считалась 100 лет тому назад одной из основных проблем геофизики (Швейдлер, 1936). За прошедшие годы приоритеты

физики Земли значительно изменились, но уровень решения этой проблемы остался таким же, близким к нулевому, такому же, как и в прошлом веке.

Потенциал между поверхностью Земли и ионосферой (электросферой) –  $V$  определяется выражением:

$$V = \int_0^z E(z) dz, \quad (9.12)$$

где  $E(z)$  – высотный профиль напряженности атмосферного электрического поля, полученный с помощью радиозондовых, аэростатных и ракетных измерений. Величина  $V$  составляет примерно 300 кВ, практически синхронно меняется на очень больших расстояниях и испытывает суточную и унитарную вариации.

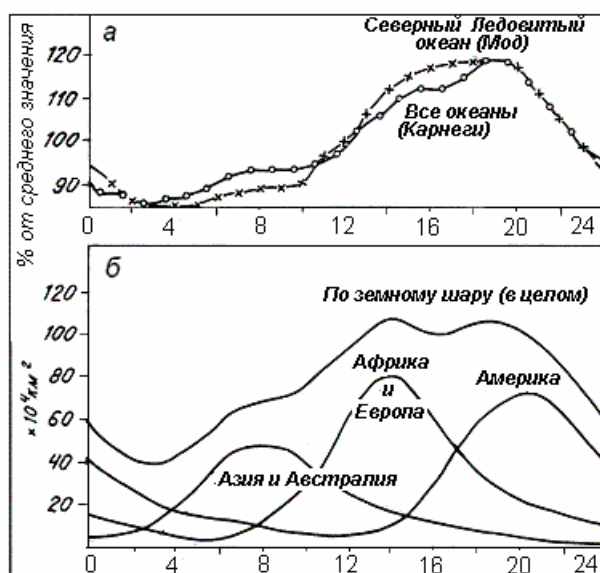


Рис. 9-16. Унитарная вариация  $E$  – *а*; общепринятое распределение гроз по поверхности Земли – *б*.

*Унитарная вариация.* Наиболее интересным свойством атмосферного электричества является её т.н. унитарная вариация. Явление унитарной (УТ) вариации заключается в том, что величина  $E$  на всей Земле одновременно возрастает на 20% в тот момент, когда в Лондоне (УТ-мировое время) 19 часов (см. рис. 9-16-а). Общепринятое объяснение этого явления состоит в том, что именно в это время на Земле происходит максимальное количество гроз, представляется малоубедительным. Тем более что количество гроз максимально летом, а величина  $E$  летом – уменьшается (см. рис. 9-16-б). Грозы, как известно, чаще происходят ближе к экватору, в то время как наибольшие значения  $E$  наблюдаются на широтах авроральной зоны; к полюсам и к экватору величина  $E$  убывает (Апсен и др., 1988). Известна реакция гроз на солнечную активность, в частности, на вспышки. Частота гроз увеличивается на 20-70% на третьи-четвертые сутки после вспышки. Однако солнечные вспышки оказывают влияние и на атмосферное электричество. Значительное понижение величины  $E$ , наблюдавшиеся в условиях хорошей погоды, как правило, совпадает с начальной стадией Форбуш понижения интенсивности космических лучей, непосредственно следующего за солнечной вспышкой (Marcz, 1997). Принято считать, что величина  $E$ , через несколько дней после Форбуш понижения, - возрастает и восстанавливается. Таким образом, реакция гроз на вспышки проявляется с большим запаздыванием, чем реакция самого электрического поля. Аналогичные результаты наблюдений за поведением атмосферного электричества в момент разряда молнии приведены в известном популярном учебнике (Фейнман и др., 1966). Там

говорится, что каждый удар молнии переносит примерно 20-30 кулон. Как быстро туча может восстановить потерю своего заряда? Измерения электрического поля, проведенные вдали от тучи, показали, что при разряде молнии наблюдается внезапный спад величины  $E$ , которая восстанавливается в течение примерно 5 секунд. Следовательно, в грозовой “машине” течет ток разделения зарядов порядка 4-6 ампер. (В такой ситуации модель генерации  $E$  за счет разрядов молний представляется сомнительной).

*Вариации  $E$ .* Во временной зависимости  $E$  обнаружена 27-дневная вариация, связанная, по мнению авторов (ссылки в Апсен и др., 1988), со скоростью вращения Солнца и прохождением группы пятен через центральный солнечный меридиан. Там же отмечается, что по данным среднеширотной обсерватории, расположенной в Японии, корреляция  $E$  с потоком солнечного радиоизлучения не обнаружена. Другой результат был получен нашей группой (Кузнецов и др., 1991), когда была зафиксирована корреляция между  $E$  и показаниями риометра (радиоприемника, настроенного на фиксированную частоту 32 МГц), направленного на Солнце. Примерно за год наблюдений нами было зарегистрировано 19 таких событий. К сожалению, эта работа не получила дальнейшего развития и результаты наблюдений так и не были подтверждены. Если признать этот результат, то он предполагает два возможных механизма: либо есть связь между  $E$  и прозрачностью ионосферы, либо связь между  $E$  и радиоизлучением Солнца, что противоречит результатам японской группы. Кроме этого, нами была выделена реакция атмосферного электричества на солнечные вспышки. На следующие сутки после вспышки, величина  $E$  возросла примерно на 20%, а затем в последующие 6-7 суток уменьшалась (относительно “нормы”) более чем на 25%.

Более детальные исследования корреляции между поведением  $E$  и магнитосферными возмущениями, проведенные на Камчатке, показали, что  $E$  синхронно понижается во время Форбуш понижений ГКЛ. Этот результат является подтверждением результатов изучения Форбуш понижения величины  $E$  (Marcz, 1997). Он так же служит подтверждением того, что ГКЛ играют решающую роль в формировании атмосферного электричества.

*$E$  в океане.* Обратим внимание на наблюдения за поведением атмосферного электричества в океане. Во-первых, в отличие от среднеширотных станций, зафиксировать четкую унитарную вариацию практически не удастся, т.к. “мешает” т.н. обменный слой высотой 2-3 км. Как известно, этот слой не оказывает такого сильного влияния на УТ-вариацию  $E$  в океане (Гончаренко и др., 1992). Во-вторых, авторы обнаружили зависимость напряженности электрического поля атмосферы от глубины океана: Величина  $E$  уменьшалась с глубиной. Кроме этого, в этой работе было обнаружено еще одно явление, связанное с атмосферным электричеством. Величина  $E$  уменьшалась на закате и увеличивалась на восходе. Авторы объясняют его образованием объемного заряда в процессе испарения воды с морской поверхности.

*УТ-вариация в мезосфере.* Задорожным и Тютиным (Zadorozhny, Tyutin, 1997) проведен анализ измерений электрического поля на мезосферных высотах (50-70 км), выполненных с помощью ракет в течение почти 20 лет. По мнению авторов, электрическое поле на этих высотах ( $\approx 1$  В/м) испытывает УТ-вариацию, аналогичную той, которая обнаружена у приземного  $E$ . Этот результат согласуется с обнаруженной нами УТ-вариацией в ионосфере.

*УТ-вариация в ионосфере и магнитосфере.* Отметим особенности обнаруженной нами корреляции УТ-вариации атмосферного электричества с ионосферой и магнитосферой. Нам удалось выделить в F-слое ионосферы унитарную вариацию, аналогичную УТ-вариации поля  $E$ . Для этого использовались данные 26-ти ионосферных станций



вертикального зондирования ионосферы, расположенных в средней широте северного полушария. После отбора суточных вариаций на мировой сети станций, выяснилось, что при сравнительно простой обработке этих данных, критическая частота F-слоя ионосферы ( $foF_2$ ) при изменении мирового (универсального –UT) времени ведет себя аналогично величине атмосферного электрического поля  $E$ .

Методы получения унитарной вариации описаны в (Кузнецов и др., 1988; Kuznetsov et al., 1990; Плоткин и др., 1992; Kuznetsov et al., 1993-a; 1993-b; Kuznetsov et al., 1995-a; 1995-b). Первый метод основан на наблюдаемом малом отличии ежесуточных зависимостей  $foF_2$  на станциях с приблизительно одинаковой широтой. Входные данные исследуемой величины обычно представлены в зависимости от местного времени (LT) того часового пояса, где находится станция наблюдения. Станции расположены крайне неравномерно: в одних часовых поясах имеется несколько таких станций, в других, - их нет совсем. Поэтому, прежде всего, необходимо сопоставить каждому часовому поясу типичную для него зависимость исследуемой величины от LT. В тех часовых поясах, где было несколько станций, применялось обычное усреднение суточных зависимостей по станциям. Если в каком-либо часовом поясе станций наблюдения не оказывалось, использовалась линейная интерполяция зависимостей от LT, полученных в ближайших соседних часовых поясах. Справедливость подобной операции обусловлена небольшой величиной наблюдаемого долготного эффекта. Последний этап заключается в усреднении найденных зависимостей по часовым поясам для каждого момента мирового времени UT. Вследствие долготных вариаций и UT-изменений суточного хода, вычисляемая на данной широте величина, не будет постоянной. Она имеет простой смысл: это мгновенное среднее значение частоты  $foF_2$  на данной широте. Описанный метод был использован впервые для получения унитарной вариации вертикального атмосферного электрического поля вблизи поверхности Земли (Парамонов, 1950), чем и объясняется использование нами термина, - унитарная вариация  $foF_2$ .

Однако не всегда можно подобрать обсерватории на фиксированной широте с долготным распределением, позволяющим применить линейную интерполяцию суточного хода по долготе. Был предложен другой метод (Плоткин и др., 1992; Kuznetsov et al., 1993) получения унитарной вариации с более слабыми требованиями к долготному распределению станций. При малом количестве станций будем исходить из представления суточных зависимостей в виде суммы двух вариаций, одна из которых контролируется местным временем LT, а вторая, - мировым UT. Применяя для спокойных регулярных вариаций  $foF_2$  спектральное представление данных в виде рядов Фурье, легко разделить методом наименьших квадратов наблюдаемые на станциях спектральные составляющие на части, контролируемые местным и мировым временем. Одновременное использование описанных методов повышает надежность определения унитарной вариации  $foF_2$ .

Приведем результаты обработки ионосферных и геомагнитных данных по схеме, применявшейся для выделения унитарной вариации атмосферного электрического поля на континентах. Нами использовались данные мировой сети станций вертикального зондирования ионосферы в диапазоне широт  $40^\circ$ - $50^\circ$  N за сентябрь 1964 г. Оказалось, что суточные пространственно-временные изменения критической частоты  $foF_2$ -слоя среднеширотной ионосферы содержат поле унитарной вариации. Унитарная вариация характеризуется в географической системе координат синхронным изменением  $foF_2$  по мировому времени в течение суток на всех долготах круга заданной широты. Основное наше внимание было направлено на изучение интегральных характеристик суточной унитарной вариации  $foF_2$ . В качестве такой характеристики рассматривалось мгновенное средне долготное значение этой величины. Результаты расчетов показали наличие устойчивой вариации, зависящей от мирового времени с максимумом в 19 UT, и сходство унитарных вариаций ионосферного параметра  $foF_2$  и атмосферного электрического поля  $E_z$ , по данным большинства месяцев 1964 года. Расчеты были

выполнены и по данным 1963 и 1965 годов. Они показали близкие результаты. Полученная в средних широтах амплитуда унитарной вариации foF<sub>2</sub> имеет величину 0,5 МГц. Она невелика и ее удается выделить лишь при общем спокойном состоянии ионосферы. Это обстоятельство позволяет предложить использовать данную величину как некоторую количественную характеристику глобального поведения ионосферы.

По методикам, пригодным для определения унитарных вариаций различных геофизических параметров, испытывающих суточные колебания, были обработаны данные среднеширотных станций (20°-60° N) мировой геомагнитной сети. Использовались усредненные обычным образом по спокойным дням вариации X-компоненты геомагнитного поля для нескольких месяцев 1964 года. Нами установлено, что существует унитарная вариация суточного изменения северной компоненты геомагнитного поля с величиной вариации в единицы нТл. К сожалению, в сравнении с ионосферной ситуацией, точность используемых в мировой геомагнитной сети станций наблюдения не столь велика, чтобы можно было достаточно надежно выделять обсуждаемую вариацию указанной амплитуды, но полученные результаты указывают на ее существование.

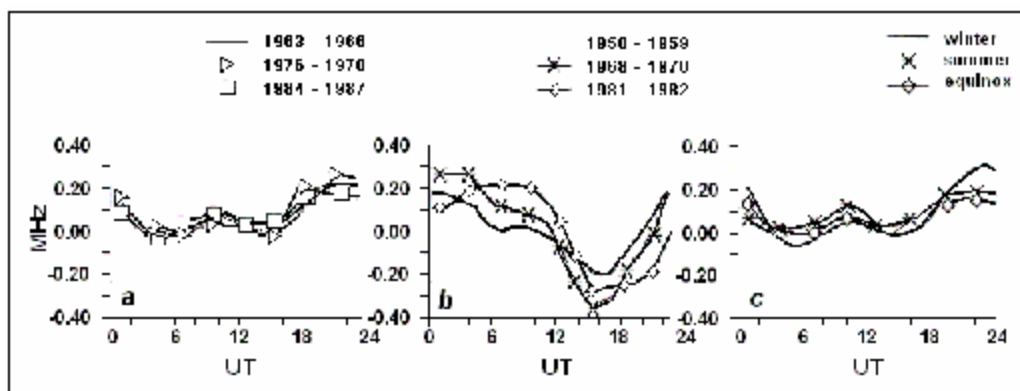


Рис. 9-17. Унитарная вариация foF<sub>2</sub>, усредненная за годы минимумов (а), максимумов (б) для трех циклов солнечной активности и в зависимости от сезона (с) (Кузнецов и др., 1998; Kuznetsov et al., 1998).

В работах (Кузнецов и др. 1998; Kuznetsov et al., 1998) исследовалась УТ-вариация частоты foF<sub>2</sub>, в зависимости от солнечной активности. Установлено, что вид унитарной вариации foF<sub>2</sub> в годы минимумов и максимумов солнечной активности существенно отличается. В годы минимумов она имеет вид, похожий на унитарную вариацию атмосферного электрического поля с максимумом в 19 UT. Сезонные изменения унитарной вариации foF<sub>2</sub> в годы минимума практически отсутствуют. В годы максимума солнечной активности вид унитарной вариации foF<sub>2</sub> существенно изменяется (рис. 9-17-б). Можно предположить, что в спокойных условиях в годы минимума солнечной активности электрическое поле способно проникать из нижних слоев атмосферы на высоты F<sub>2</sub>-слоя ионосферы. Возможна так же и другая причина, состоящая, например, в том, что УТ-вариация в магнитосфере, ионосфере, мезосфере и атмосфере вызывается одним явлением. Как будет показано ниже, это могут быть космические лучи, пронизывающие все эти оболочки.

*Молнии и спайты.* Обсуждая проблему атмосферного электричества и связи его с разрядами молний, нельзя не остановиться на недавно обнаруженном явлении электрических разрядов, аналогичных разрядам молний, но направленных не между облаками, и не с облаков на Землю, а вверх, по направлению к ионосфере (электросфере).

Эти разряды получили название спрайтов (sprite, в переводе, - эльф). Первая информация о спрайтах относится к 1993 г. С тех пор наблюдается нарастающая лавина результатов их наблюдений. Например, летом 1996 г. 50 специалистов по атмосферному электричеству из США, Японии и Новой Зеландии провели наблюдения на метеостанциях, расположенных в Скалистых горах (США), и зарегистрировали 1127 случаев появления высотных молний. Кроме спрайтов, обнаруженных на высотах между 50 и 90 км и обладающих длительностью 0.001 с, похожие явления возникали на больших высотах и, более короткие, чем спрайты. Кроме этого, на существенно меньших высотах обнаружены светящиеся разряды, получившие название Blue Jets (синие струи). Синие струи, в отличие от спрайтов, исходят прямо из верхней части облака. Эти наблюдения были продолжены в 1997 и 1998 гг. с помощью специально изготовленного прибора, содержащего 10 фотоумножителей, направленных в различные участки неба. Были обнаружены очень короткие спрайты, длительностью не более 30 мкс, следующие через 150 мкс после разряда обычной молнии. Специалисты считают, что возникновение спрайта обязано возбуждению среды мощными радиоволнами, сопровождающими разряд молнии. Не исключено влияние частиц высокой энергии космического излучения на возникновение высотных молний. Рассмотрим основные характеристики спрайтов и синих струй немного подробнее.

*Как выглядят спрайты и синие струи.* Спрайт, это оптическое явление в мезосфере, развивающееся над грозовым облаком и обычно достигающее высоты 90 км. Иногда влияние спрайта ощущается значительно выше 90 км, в E области ионосферы. Спрайты преимущественно красные, наиболее яркая часть – «голова», выше – тонкие светящиеся линии – «волосы». Под «головой» спрайта выделяют темную полосу – «воротник». Ниже воротника – «усы», которые простираются до 40-50 км. Усы меняют цвет от красного (вверху), до – голубого (внизу). Спрайты бывают одиночные, однако, чаще бывают двойные и тройные. В поперечнике они достигают 40 км. Время жизни спрайтов порядка нескольких миллисекунд (Rairden, Mende, 1995), хотя наблюдаются и более короткоживущие разряды. Оптическая энергия спрайта составляет несколько килоджоулей, для серии спрайтов она, соответственно, больше (Sentman, Wescott, 1993; Sentman et al., 1995).

Синяя струя движется вверх со скоростью примерно 100 км/с, как хорошо сфокусированный пучок синего цвета, от вершины грозового облака до высоты порядка 50 км. Принято считать синие струи аналогом стримера, в виде ряда плазменных волокон, возникающих при электрическом пробое газового промежутка (Pasko et al., 1996; Sukhorukov et al., 1996). Материнское облако несёт, как правило, на своей верхней кромке (6) – положительный, а на нижней, - отрицательный заряды. В верхней части (голове) синей струи (4) знак заряда положительный. Считается, что в струе происходит сепарирование зарядов таким образом, чтобы образовалось электрическое поле обратного знака атмосферному электрическому полю. Суммарный заряд синей струи составляет 300-400 кулон, размер по высоте – порядка 20 км, толщина струи порядка одного км, время существования струи около одной секунды.

*Спрайты как часть атмосферного электрического контура.* Сотрудники лаборатории Стенфордского Университета США считают, что спрайты могут изменять параметры электрического контура верхней атмосферы (Pasko et al., 1998). Согласно их модели, спрайт, движущийся вверх, как бы расположен между двумя «обкладками конденсатора»  $h_i$  и  $h_b$ , которые движутся вместе со спрайтом. Атмосферная проводимость  $s(h_i)$  увеличивается монотонно с высотой. Время процесса оценивается по формуле:  $t = e_0/s(h_i)$ , где  $e_0$  – электрическая постоянная. Спрайт возникает примерно через 2-3 мсек после основного разряда. В зависимости от силы тока основного разряда, изменяющегося от 25 кА до 150 кА, меняется вклад спрайта в общую картину магнитного поля разряда молнии.

*Оптические характеристики спрайтов и струй.* Зарегистрированное свечение спрайта соответствует спектру возбуждения молекулярного азота  $N_2$  1P в диапазоне длин волн: 650-700 нм и 750, 770 нм. Выявлены все разрешенные переходы молекулярного азота, а также спектры  $N_2^+$ . Аналогичная ситуация наблюдалась и при исследовании оптических характеристик синих струй. Здесь, так же как и в случае со спрайтами, основное излучение с длиной волны 391 нм соответствует возбуждению линий 1N и 2P молекулярного азота и иона азота  $N_2^+$  (Hampton et al., 1996; Mende et al., 1995; Yukhimuk et al., 1998). Таким образом, различия в цвете между спрайтами и струями состоит в различии энергии электронов, участвующих в возбуждении свечения этих явлений.

*Спрайты и источники низкочастотных радиоволн.* Спрайты связаны с источниками радиоволн, сопутствующих разряду молнии. Эти выводы базируются на серии экспериментов, проводимых различными группами физиков в различное время года, в различных районах США. Наблюдения за электромагнитным излучением, сопровождавшим спрайты, велось с помощью вертикально установленной антенны в виде токовой петли общей площадью 1.7 кв. м. Регистрировалась магнитная компонента колебаний в частотном диапазоне 24 кГц с помощью радиоприемника. Одновременно с борта самолета регистрировались спрайты и интенсивности световых вспышек молний (в кА). (Inan et al., 1995; Inan et al., 1996; Pasko et al., 1998). Физика генерации и распространения естественных электромагнитных импульсов (единицы Гц – десятки кГц), в резонаторе Земля-ионосфера, применительно к проблеме выяснения роли электромагнитного излучения в физике спрайтов, изучалась в статье (Nickolaenko, Naayakawa, 1998). Авторы показали, что на расстояниях “источник-приемник” в 1, 5, 10, 15 и 20 тыс. км, спектры сигналов заметно различаются в частотном диапазоне, большем 40 Гц. На частотах т.н. Шумановского резонанса (4-20 Гц), эти различия не столь значительны. Изучалось изменение величины и формы импульса вертикального электрического поля на тех же расстояниях. Эти данные использовались при интерпретации явления спрайтов и струй.

*Обзор моделей атмосферного электричества.* Практически все модели атмосферного электричества, начиная от Френкеля, связывают его с облаками и, в частности, с грозами и разрядами молний. Рассмотрим некоторые из них, наиболее, на наш взгляд, приемлемые:

*Модель Френкеля.* Френкель полагал, что крупные капли воды обладают отрицательным зарядом ( $-q$ ), а мелкие – положительным ( $+q$ ). Электрическое поле  $E$  образуется за счет разделения зарядов в облаке. Поле  $E$ , когда известны: величина ускорения силы тяжести ( $g$ ), масса ( $m$ ) и подвижность ( $u$ ) капель, будет равно:

$$E = [(u_1 m_1 - u_2 m_2) / (u_1 q_1 + u_2 q_2)] g. \quad (9.13)$$

Подвижность капель  $u = 1/6\pi\eta r$ , определяется вязкостью среды  $\eta$  и размером капли  $r$ . Френкель заменяет:  $u_1 \sim 1/r_1$ ;  $u_2 \sim 1/r_2$ , и получает:

$$E = (4\pi r g / 3) \times (r_1^2 - r_2^2) / (q_1/r_1 + q_2/r_2) = 4\pi r g r^2 / 3j, \quad (9.14)$$

что для воды, при  $r = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $g = 1000$  Гал,  $j = 0.1$  эВ,  $r = 10$  мкм,  $E = 3000$  В/м.

Суть идеи Френкеля состоит в том, что разделение зарядов происходит благодаря конденсации, хотя он рассматривал и другие способы электризации. Он полагал, что при распылении малых частиц воды происходит разрушение двойного электрического слоя (ДЭС), возникающего в водяной капле. Размеры отделяющихся частиц, соизмеримых с эффективной толщиной ДЭС, приобретают положительный заряд, остальная масса – отрицательный.

*Модель испарения* Идея генерации электрических зарядов при испарении, оживленно обсуждалась во второй половине прошлого столетия Томсоном, Пельтье и др. Тогда же

было установлено экспериментально, что струя пара несет значительный положительный заряд (Герасименко, 1976).

*Модель Никандрова.* Электрические процессы, обусловленные фазовым переходом “вода-пар”, рассмотрены в книге Никандрова (1981). Автором делается попытка найти объяснение образованию электрических полей в облаке. Взаимодействие молекул воды с собственным паром во многом обязаны их электрическим свойствам. Полная энергия взаимодействия двух молекул водяного пара равна:

$$W = B/L^{12} - \Gamma/L^6, \quad (9.15)$$

где  $B/L^{12}$  – энергия отталкивания;  $\Gamma/L^6$  – энергия притяжения;  $L$  – расстояние между центрами молекул. В состоянии равновесия энергия взаимодействия принимает минимальное значение, равное  $W_0 = kT_{кр}$  ( $T_{кр}$  – критическая температура). Энергия притяжения, в свою очередь, суммируется (по мере убывания эффекта) из:

- потенциальной энергии ориентационного взаимодействия:

$$W = 2/3 \cdot m^2/kT L^6 \quad (m - \text{дипольный момент молекулы}), \quad (9.16)$$

- поляризационной энергии:

$$W = 2am^2/L^6 \quad (a - \text{коэффициент поляризации}), \quad (9.17)$$

- энергии, обусловленной дисперсионным эффектом:

$$W = 3/4 \cdot hna/L^6, \quad (9.18)$$

$hn$  – квант энергии,  $n$  – частота колебаний внешних электронов.

Для  $N$ -молекул энергия притяжения определяется их числом:

$$W = Nr/2L^6. \quad (9.19)$$

Таким образом, видно, что взаимодействие молекул определяется их электрическими свойствами. Эти свойства особо проявляются при фазовых переходах, когда возникают некомпенсированные электрические поля.

В подтверждение идеи Френкеля, считавшего, что большая капля заряжена отрицательно, а маленькая – положительно, приведем пример из книги Никандрова. Конденсация паров воды происходит достаточно быстро при четырехкратном пересыщении для отрицательных ионов и шестикратном, – для положительных ионов. Отсюда следует, что капли, выросшие до больших размеров, могут сохранять отрицательный заряд, в то время как капли меньших размеров – положительный. Единичный заряд капли составляет примерно  $10^{-14}$  кулон. Размер капли варьируется от малого (7-8 Å), к среднему (100 Å) и большому (> 550 Å).

*Электризация капель.* Приведем результат эксперимента, проведенного в аэрозольной камере Института экспериментальной метеорологии. Авторами сообщения (Гирс, Шварц, 1976) было показано, что в камере, при образовании адиабатического тумана, накапливался некоторый положительный объемный заряд. Анализ знака зарядов, образующихся в камере капель, показал, что они имели отрицательный заряд. Авторы пришли к выводу, что рост капель на отрицательных зародышах эффективнее, чем – на положительных.

*Вращение плазмосферы.* Авторы модели базируются на идее Ландау и Лифшица относительно того, что вокруг вращающегося намагниченного шара существует не только магнитное дипольное поле, но и квадрупольное электрическое. Развивая эту идею, Беспалов и Чугунов (1994) обсуждают модель возникновения атмосферного электричества в результате трения плазмосферы, вращающейся со скоростью, меньшей, чем скорость суточного вращения Земли  $w_0$ , о “магнитосферную периферию”. Разность потенциалов, приложенная к атмосферному промежутку,  $U = w_0 M/cr_0$ , где  $M$  – магнитный момент Земли,  $r_0$  – её радиус,  $c$  – скорость света. Данная модель, по мнению авторов, дает правильный знак заряда планеты и величину плотности атмосферного тока.

*Электрическая машина Рише.* Рише (1997) обращает внимание на роль космического излучения в формировании “электрической машины Земли” (ЭМЗ). Автор предполагает, что атмосферное электрическое поле распределено вдоль высоты атмосферы весьма неравномерно: около Земли  $E$  принимает самое большое значение, затем довольно резко спадает, и затем, в районе т.н. электросферы,  $E$  вновь сравнительно велико (?). В принципе, в атмосфере может находиться область, где  $E \approx 0$ . По мнению Рише, эта “поверхность” делит ЭМЗ на две части, одна из них, это, собственно, атмосферное электрическое поле (АЭП), другая часть – внешнее электрическое поле (ВЭП), имеющее другую причину возникновения. В области  $E = 0$  космический ток компенсируется рассеивающимися с поверхности зарядами. В электрической машине Рише происходит перераспределение электрических зарядов между АЭП и ВЭП, так, что суммарный заряд Земли остается постоянным. При этом “поверхность  $E = 0$ ” меняет свою высоту, а “зарядный” (от космических лучей) и “разрядный” (от Земли вверх) токи компенсируют друг друга. Автор полагает, что учет космического тока позволяет естественным образом, без привлечения сторонних идей и предположений, расширить представления о глобальной токовой цепи, электрическом поле Земли и работе ЭМЗ, а также понять причину сохранения квазистационарных зарядов атмосферы и Земли.

*Грозовая модель атмосферного электричества.* Модель, развиваемая Хайсом и Рабле (Hays, Roble, 1979; Roble, Hays, 1979), основана на электрическом взаимодействии между верхней и нижней атмосферой. Главным источником электрического тока является грозовое облако, вверху которого скапливается положительный заряд, а внизу – отрицательный. Грозы распределены по поверхности Земли неравномерно, однако, именно их пространственное размещение обеспечивает возможность унитарной вариации атмосферного электричества. Электрический потенциал на поверхности Земли равен нулю и также равен нулю вдоль её орографической поверхности. Авторы делают расчеты величины  $E$ , учитывая орографию, так и без её учета. Электрическая проводимость экспоненциально возрастает с высотой до тех пор, пока на атмосферные электрические эффекты не начнет оказывать влияние магнитосфера и космические лучи, обладающие, как известно, широтной зависимостью. Авторы рассчитали электростатическую модель в зависимости от распределения грозовых источников тока. Результаты расчетов показывают, что величина  $E$  максимальна в окрестности источников, а потенциал может достигать ионосферных высот. Согласно расчетам в ионосфере величина  $E$  может достигать 0.25-0.5 мВ/м. Заметную роль в этой модели играют эффекты, связанные с ионизацией атмосферы космическими лучами. По мнению авторов, в этой модели находят объяснение явления, связанные с т.н. Форбуш эффектом космических лучей.

Сделаем дополнительное замечание. Анализируя ситуацию и учитывая хорошо известные факты, можно показать, что грозовая модель атмосферного электричества Hays и Roble находится в противоречии с достоверными данными. Действительно, известно, что грозовая деятельность имеет 11-летний цикл, совпадающий по фазе с циклом солнечной активности. Известно так же, что интенсивность потока ГКЛ так же изменяется с 11-летней периодичностью, но в противофазе с Солнцем. Более того, известно, что долговременное, в течение последних 50 лет наблюдений, изменение величины  $E$  так же уменьшается, как и интенсивность потока ГКЛ, в то время как температура Земли, как известно, - возрастает. Эти факты находят непротиворечивое объяснение в нашей модели.

*Наша модель. Особенности  $E$ .* Прежде чем излагать нашу модель, которая, в принципе, за небольшими, но важными деталями, не отличается от модели Френкеля, уточним, что же известно об атмосферном электричестве, что является, бесспорно, полезным в предыдущих моделях, и в чем могут быть их ошибки. Первая удивительная особенность атмосферного электричества состоит в том, что многолетние наблюдения показывают ее высокую стабильность и неизменность знака: Земля всегда отрицательна. Может ли

измениться знак  $E$ ? Этот вопрос практически не обсуждается в моделях. Хотя постановка такого вопроса вполне правомерна: если источник  $E$  – гроза, а грозовые облака приобретают заряды разного знака и пробой молнии происходит не только на Землю (и ионосферу), но и между облаками, то почему знак заряда в целом по Земле никогда не меняется? Напряженность  $E$  практически, на сравнительно небольшом интервале времени – постоянна. Каков механизм, поддерживающий поле  $E$  – неизменным? В обсуждаемых нами моделях об этом ничего не говорится. Вторая, не менее удивительная особенность атмосферного электричества, это его унитарная вариация. Заметим, далеко не каждое из еще не нашедших объяснения природных явлений, нашло отражение в фейнмановских лекциях по физике, - учебнике, признанном во всем мире. А это – нашло. Более того, этому загадочному явлению посвящено несколько страниц 5-го тома. Тем не менее, объяснение его тем, что частота гроз и их пространственное распределение именно таково, что они обеспечивают день ото дня изменение  $E$  во всем мире синхронно, мягко говоря, не внушает доверия. Как показано, например, в (Marsh, Svensmark, 2003) существует корреляция между облачностью и космическими лучами, причем максимальное количество облаков в период наблюдений (1983-1994) находится в Тихом океане. Более того, как отмечалось выше, годовая вариация количества гроз и величины  $E$ , - антикоррелируют. Это так же ставит под сомнение принятую модель. Можно еще добавить, что разряд молнии приводит к уменьшению величины  $E$  и т.п.

*Электрические заряды в атмосфере.* Атмосферное электрическое поле можно определить в любой его точке, зная его потенциал  $V$ , величина которого обусловлена суммой всех электрических зарядов на Земле и в атмосфере. Каждая точка пространства обладает вполне определенным потенциалом. Соединение всех точек, обладающих одним значением потенциала, приводит к построению т.н. уровня, 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:

$$E = \partial V / \partial n = 4\pi\sigma, \quad (9.20)$$

где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда Земли в данной точке. Выражение (1) 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:  $\sigma^* \approx 7 \cdot 10^5$  элементарных зарядов/см<sup>2</sup> и общий заряд Земли:  $Q = \varepsilon_0 R_E^2 E = 5.7 \cdot 10^5$  кулон,  $R_E$  – радиус Земли  $\varepsilon_0$  – 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<sup>2</sup>, 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:  $C \approx 4\pi\varepsilon_0\varepsilon S/d$ , подставляя площадь поверхности Земли  $S$  и величину электрической постоянной  $\varepsilon_0$ , 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 и разряды молний оказывают влияние на АЭП, но они не являются основными его источниками. Согласно модели, образование (за счет ионизации атмосферы ГКЛ) и разделение зарядов (за счет различия в скоростях падения заряженных аэрозолей) происходит 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.

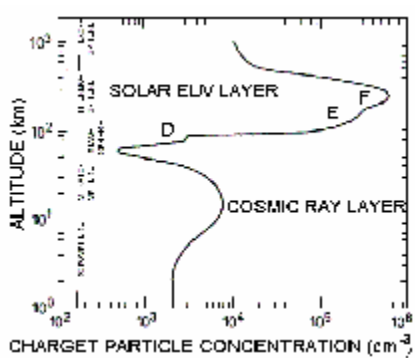


Рис. 9-18. Вертикальный профиль плотности ионизированных частиц в атмосфере (Marsh, Svensmark, 2000).

Распределение плотности электрических зарядов по высоте атмосферы представлено на рис. 9-18 (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  $N = 2 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ , для чего воспользуемся равенством:  $dN/dt = \alpha N^2$ . Положим, что  $N^+ = N^-$ , тогда, зная коэффициент рекомбинации ионов  $\alpha$ , 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 ( $\sim 5 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$ ). Отсюда величина:  $dQ/dt = \alpha \cdot 4 \cdot 10^{18}$  кулон/с. Таким образом, если бы скорость рекомбинации  $\alpha$  была бы:  $\alpha \geq 2.5 \cdot 10^{-16} (\text{м}^3 \text{ с}^{-1})$ , проблема создания плотности зарядов в атмосфере за счет ионизации её ГКЛ – решалась бы элементарно.

Обратимся к справочным данным по величине коэффициента объемной рекомбинации  $\alpha$ . Величина  $\alpha$  изменяется в пределах:  $10^{-16} - 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . Требуемое для нашей модели ограничение величины  $\alpha$  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  $\alpha \approx 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ , в то время как коэффициент рекомбинации между ионами намного меньше  $\alpha \approx 10^{-16} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$  (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 транспортировку электрического заряда к Земле, 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  $\alpha$  – коэффициент объемной рекомбинации,  $\beta$  – 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. 9-19, на котором можно видеть устойчивую корреляцию между потоком ГКЛ -  $N$  и током  $j$  ( $dQ/dt$ ).

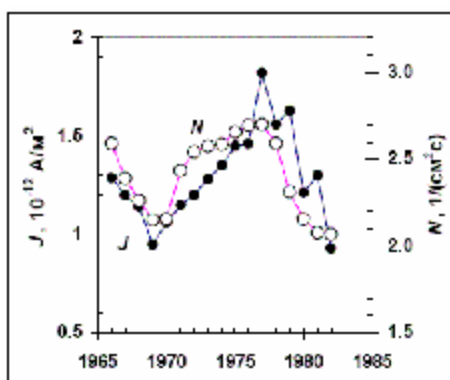


Рис. 9-19. Зависимости величины плотности атмосферного тока  $j$  (темные кружки) (Roble, 1985) и потока космических лучей  $N$  на средних широтах на высоте  $h \approx 22$  км; светлые кружки (Stozhkov, 2003; Ермаков, Стожков, 2004).

Обратим внимание на то, что уменьшение плотности потока ГКЛ и тока проводимости  $j$  соответствуют периодам максимальной активности Солнца (69-70 и 80-82 гг.), а их синхронное увеличение - минимальной (76-77 гг.). Таким образом, рис. 9-19 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.

*Образование водных аэрозолей. Размер частиц.* В спокойной атмосфере всегда существуют аэрозольные частицы размером от нескольких сотен ангстрем до нескольких микрон. В глобальном масштабе выделяют три типа распределения частиц по размерам в тропосфере: «фоновый», «океанический» и «континентальный». Идеализированные кривые, демонстрирующие существенные черты этих распределений, изображены на рис. 9-20 (Ивлев, Довгалюк, 1999). Фоновый тип распределения аэрозоля по размерам предполагается репрезентативным для средней и верхней тропосферы. Кривые рисунка соответствуют ситуации существования и отсутствия непрерывной генерации мелкодисперсной фракции. Фоновая концентрация (кривые 1, 5) типична для очень чистого воздуха и предполагается равной  $700 \text{ см}^{-3}$ . Самый нижний слой воздуха над океанами, высотой 2 км, содержит морские частицы. Океанический тип распределения частиц по размерам (кривые 2, 4) отличается от фонового в интервале радиусов от 0.5 до

20 мкм, в котором концентрация частиц океанического типа увеличивается по сравнению с фоновой концентрацией - за счет частиц, возникающих из морских брызг. Общая концентрация частиц морского происхождения не велика:  $< 10^3 \text{ см}^{-3}$ . В нижней тропосфере над сушей предполагается репрезентативным третий тип распределения частиц по размерам – континентальный (кривая 3). Счетная концентрация частиц в этом случае возрастает до  $10^4 \text{ см}^{-3}$ . Распределение частиц с  $r < 0.1 \text{ мкм}$  считается неопределенным. Как следует из рис. 9-20, максимальная концентрация аэрозолей соответствует размеру:  $r \geq 0.1 \text{ мкм}$ . (В дальнейшем нас будут интересовать частицы именно такого размера). Распределение частиц по размеру, представленное на рис. 3, касается не только водных аэрозолей. Разделение электрических зарядов происходит на водных каплях и тяжелых ионах, поэтому необходимо выяснить, имеются ли в атмосфере подходящие условия, необходимые для конденсации и коагуляции капель радиусом  $r \geq 0.1 \text{ мкм}$ .

Приведем данные по концентрации в атмосфере и подвижности легких и тяжелых ионов (Тверской, 1949), полученные при изменении влажности воздуха. Распределение ионов по концентрациям, подвижностям и скоростям (при влажности воздуха 2 – 3 мм Нг) приведено в Таблице 1:

Таблица 1.

Легкие ионы	$n = 200 \text{ см}^{-3}$	$u = 1.1 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$	$v \approx 10^{-2} \text{ м/с}$ , для $E = 100 \text{ В/м}$
Средние ионы	$n = 700 \text{ см}^{-3}$	$u = 0.05 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$	$v \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$
Тяжелые ионы	$n = 1600 \text{ см}^{-3}$	$u = 0.008 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1} \text{ В}^{-1}$	$v \approx 8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$

При увеличении влажности воздуха от 2-3 мм Нг до 12-13 мм Нг, концентрации легких и средних ионов практически не изменяется, в то время как концентрация тяжелых – возрастает почти в 5 раз. Обратим внимание на то, что скорость дрейфа тяжелых ионов в поле  $E$  может быть соизмерима и даже меньше (как будет показано ниже) их стоксовой скорости падения в поле силы тяжести.

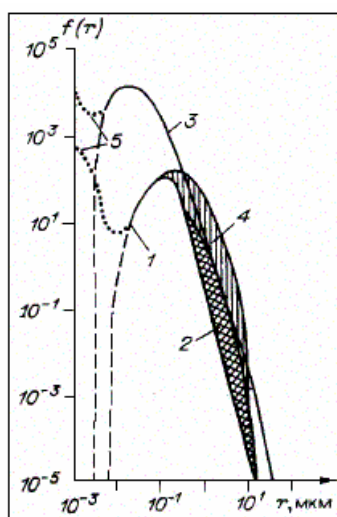


Рис.9-20. Распределение атмосферных аэрозолей по размерам (Ивлев, Довгалюк, 1999).

Заряженные водные аэрозоли и тяжелые ионы падают на поверхность Земли и передают ей свой заряд. Аэрозоли во время падения на Землю - испаряются. Критический размер, при котором они начинают испаряться, был оценен в (Harrison, 2001), где показано, что наиболее оптимальный размер водного аэрозоля составляет 0.13 мкм (рис. 9-21). Меньшие частицы – испаряются, частицы крупнее критического размера – растут.

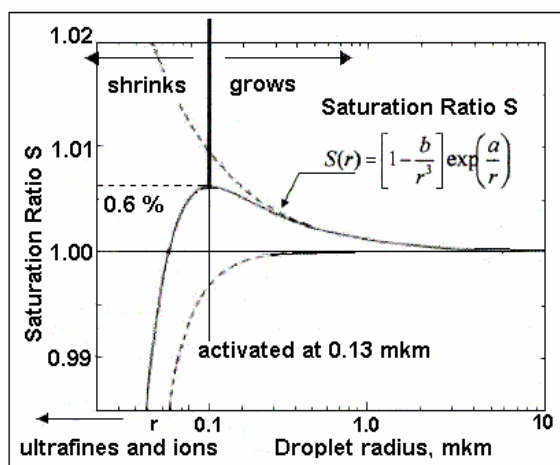


Рис. 9-21. Зависимость размера водного аэрозоля от степени насыщения (Harrison, 2001). Капли размером,  $r < 0.13$  мкм будут испаряться, большим – расти.

Как показано на рис. 4, величина пересыщения в оптимальном случае  $S_c \approx 1.006$  (0.6%). Зависимость критического пересыщения паров воды от температуры  $S_c(T)$  приведенная на рис. 9-22, получена Артюхиным А.С. (2001). Расчеты проводились как по классической теории (1), так и по квантово-статистической (2). В последнем случае, результаты расчетов близки с экспериментальными точками, определенными при сверхзвуковом течении воздуха, в камере Вильсона, и в диффузионной камере. Автор считал пересыщение критическим, при котором отношение числовой плотности димеров к числовой плотности мономеров в системе составляет 3% (критерий Кало). Автором показано, что при температуре  $T = 250$  К,  $S_c = 1.5$  и оно плавно убывает по мере роста температуры:  $T = 275$  К,  $S_c = 1.0$ ;  $T = 290$  К,  $S_c = 0.5$  и т.д., отсюда для  $S_c = 1.06$ ,  $T = 265$  К.

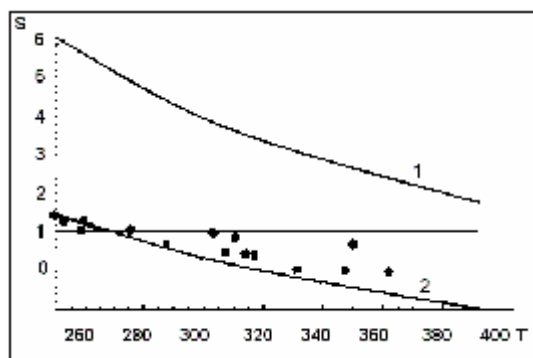


Рис. 9-22. Зависимость критического пересыщения паров воды от температуры  $S_c(T)$  (Артюхин, 2001).

Полагая среднюю по Земле температуру  $T_E = 15$  °С, а температуру  $T_c = -10$  °С, используя эмпирическую формулу для убывания температуры тропосферы с высотой  $H$ :  $T_c = T_E - 6.5 H$  (км), получим, что степень пересыщения  $S_c = 1.06$  будет достигнута на высоте  $\approx 4$  км. Полученный результат показывает, что область формирования водных аэрозолей с характерным размером  $r \geq 0.1$  мкм совпадает с областью максимальной концентрации ионов, образующихся при торможении ГКЛ.

*Разделение зарядов в поле силы тяжести.* Величину атмосферного электрического поля  $E_Z$ , можно оценить по формуле, полученной Френкелем при учете эффекта разделения зарядов на водных каплях, радиусом  $r$  (Френкель, 1949):

$$E_Z = (4\pi r g / 3\epsilon_0) \times (r_1^2 - r_2^2) / (q_1/r_1 + q_2/r_2) = 4\pi r g r^2 / 3\epsilon_0 \zeta \quad (9.21)$$

Здесь:  $r$  - плотность воды,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $r_1$  и  $r_2$  - радиусы больших и малых капель,  $q_1$  и  $q_2$  – их заряды, соответственно,  $\zeta$  - электрокинетический потенциал воды. Френкель выражает величину  $E_Z$  внутри облака через его водность  $M$ :

$$E_Z = \epsilon_0 M g \zeta / 6\pi \eta \sigma_e \quad (9.22)$$

где:  $M$  – водность облака (в грозовом облаке считается величина  $M \approx 1$  г/м<sup>3</sup>),  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\zeta$  – электрокинетический потенциал воды ( $\zeta \approx 0.25$  В),  $\eta$  – вязкость воздуха ( $\eta \approx 10^{-5}$  Па с),  $\sigma_e$  – электропроводность ( $\sigma_e \approx 10^{-14}$  Ом<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup>);  $E_Z \approx 10^4$  В/м.

Следуя логике рассуждений Френкеля, для оценки величины  $E$ , возникающей при разделении зарядов в насыщенной влагой атмосфере «хорошей погоды», будем использовать формулу (9.22). Известно, что в такой атмосфере концентрация молекул «сухого» пара воды  $\approx 12$  г/м<sup>3</sup>. Водность атмосферы (в виде водного аэрозоля)  $M$  для  $E_Z = 100$  В/м должна быть в сто раз меньше, чем в кучевом облаке, т.е.  $M = 0.01$  г/м<sup>3</sup>. Как показано в предыдущем разделе, для того чтобы в атмосфере образовался мелкий аэрозоль, необходимо выполнение определенных рТ условий. Важно, чтобы температура и давление водяного пара были бы близкими к давлению насыщенного пара при заданной температуре. Это означает, что пересыщение должно быть чуть больше единицы. Второе условие образования мелких капель состоит в том, что для их образования необходимы ядра конденсации. Согласно нашей модели, это могут быть электрические заряды.

Оценим размер капелек воды в этом случае. Очевидно, что это должны быть очень мелкие, не видимые глазом капли, размером, меньше 0.5 мкм. Если капли будут видимые и их будет много, то это уже не атмосфера «хорошей погоды», а грозовое облако или туман. Условие падения капель на Землю, при выполнении которого они могут принять участие в разделении зарядов, можно получить из формулы Стокса для скорости падения капли:

$$v = (mg - \epsilon_0 qE) / 6\pi \eta r, \quad (9.23)$$

где  $m$  – масса капли, а  $q = \epsilon_0 \zeta r$  - её заряд. В облаке принято считать:  $mg \gg qE$ . В нашем случае, для оценки минимального размера капли, можно остановиться на условии:  $mg \geq qE$ . Отсюда получаем минимальный радиус капли из условия:  $(4\pi/3) r^2 g \rho \geq \epsilon_0 \zeta E$ , или  $r \geq 0.1$  мкм. Наша оценка соответствует очевидному условию «невидимости» капли:  $r < 0.5$  мкм, или:  $0.5$  мкм  $> r \geq 0.1$  мкм. Масса капли такого размера  $m \approx 10^{-14}$  г.

Используя формулу (9.22), мы получили, что поле  $E_Z = 100$  В/м возникает при водности атмосферы  $M = 10^{-2}$  г/м<sup>3</sup>. При этом в кубическом метре воздуха может находиться до  $n \approx 10^{12}$  заряженных капель.

Оценим концентрацию электрических зарядов, принимающих участие в атмосферном токе «утечки». Однако прежде отметим, что в атмосферном токе участие принимают лишь легкие ионы. Ни средние, ни, тем более, тяжелые ионы, в силу своей малой подвижности, участие в формировании атмосферного тока утечки не принимают. (Это важный момент модели). Плотность атмосферного тока «хорошей погоды»  $j = 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>, подвижность легких ионов, носителей тока (по справочным данным):  $u = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с·В, отсюда скорость переноса для  $E_Z = 100$  В/м.  $v_e = uE \approx 10^{-2}$  м/с. Мы можем оценить плотность переносчиков зарядов:  $n_e = 10^9$  м<sup>-3</sup>. Как известно, величина  $E_Z \sim 1/h$ , а проводимость:  $\sigma \sim h$ ,  $h$  – высота. Известно так же, что плотность тока  $j$  от  $h$  практически не зависит. Эти данные позволяют получить примерное распределение плотности электрических зарядов  $n_e$ , участвующих в формировании тока утечки:  $n_e \sim 1/E^2$  или:  $n_e \sim h^2$ . Плотность зарядов тока утечки возрастает с высотой квадратично.

Представим себе атмосферную электрическую цепь как глобальный контур, состоящий из внутреннего генератора и нагрузки. В нашей модели, генератором АЭП является атмосфера «хорошей погоды», в которой происходит образование и разделение

зарядов в поле силы тяжести. Образование аэрозоля на отрицательном заряде требует значительно меньшего пересыщения и капля образуется значительно быстрее, чем на положительном заряде. Источником зарядов являются ГКЛ, которые, попадая в атмосферу, тормозятся, генерируя при этом каскад вторичных заряженных частиц  $dN/dt$ . Принципиальным моментом модели является величина скорости падения капли, в сравнении её со скоростью дрейфа в АЭП. Оценим величину стоксовой скорости капли радиусом 0.1 мкм, для чего воспользуемся формулой (4):  $v \approx mg/6\pi\eta r = 10^{-4}$  м/с. Сравним полученную оценку с известными экспериментальными данными. Принято считать, что средняя скорость оседания стратосферного аэрозоля радиусом 0.1 мкм примерно 40 м за сутки, или  $\approx 5 \cdot 10^{-4}$  м/с, что близко к стоксовой скорости.

Скорость «падения» аэрозольных слоев, измеренная с помощью лидара на полигоне Томского института оптики атмосферы СО РАН, составляет около 5 км/сутки  $\approx 5 \cdot 10^{-2}$  м/с (Маричев и др. 2004). Размер аэрозоля, по оценкам авторов, порядка 1 мкм. Так как стоксова скорость  $v \sim r^2$ , то для капель такого размера, эта скорость, оцененная по формуле (4):  $v \approx 10^{-2}$  м/с, что примерно соответствует измерениям в Томске. Эти оценки показывают применимость формулы (9.23).

*Полярность E. Роль процессов конденсации и испарения.* Рассматриваемая нами модель АЭП, как и модель Френкеля, определяет полярность заряда Земли тем, что капли, несущие отрицательный заряд, оказываются тяжелее капель, несущих заряд положительный. Мы вправе задать вопрос: всегда ли было так, и может ли заряд Земли знак изменить? Как следует из всего ранее сказанного, модель АЭП базируется на процессах конденсации и коагуляции капель. Процессы испарения практически не рассматривались, а ведь они в физике атмосферы играют не меньшую роль, чем процессы конденсации. Рассмотрим оба этих процесса чуть подробнее, и с общих позиций. Выясним, в частности, роль фазовых переходов в объяснении физической картины электрических процессов, иначе, попытаемся разобраться в физике, связанной с конкуренцией между процессами конденсации и испарения в атмосфере.

Скорость конденсации  $K$  ( $\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}$ ), согласно формуле Френкеля (1975), упрощенной и модифицированной:

$$K \sim \exp(-3/\ln^2 S_C + \ln S_C), \quad (9.24)$$

здесь  $S_C$  - пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина  $S_C$  определяется, кроме ряда других параметров температурой пара  $T$ :

$$\ln S_C \sim \alpha/kTg^{1/3},$$

его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной поверхностного натяжения жидкости  $\alpha$  и т.п. Скорость конденсации  $K$  можно выразить через температуру пара:

$$\begin{aligned} K &\sim \exp(-2T + 1/T), \text{ а, с учетом того, что } S_C > 1, \\ K &\sim \exp(-T) \end{aligned} \quad (9.25)$$

Скорость конденсации  $K$  показывает количество элементарных процессов слияния частиц, которое происходит в единицу времени в единичном объеме. Величина  $K$  определяет скорость образования и роста капель.

В режиме испарения (кипения) в системе разрушаются капли и, им на смену, образуются «пузыри» пара, скорость образования которых  $J$  ( $\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}$ ):

$$J \sim \exp(-W/kT), \quad (9.26)$$

где  $W$  - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Качественная зависимость  $K$  и  $J$  от температуры  $T$  изображена на рис. 9-23. При температуре  $T''$ , когда выполняется ( $K \approx J$ ), казалось бы, система должна достичь термодинамического равновесия. На самом деле всё обстоит совсем не так: такая ситуация ближе к критическому, крайне неустойчивому состоянию.

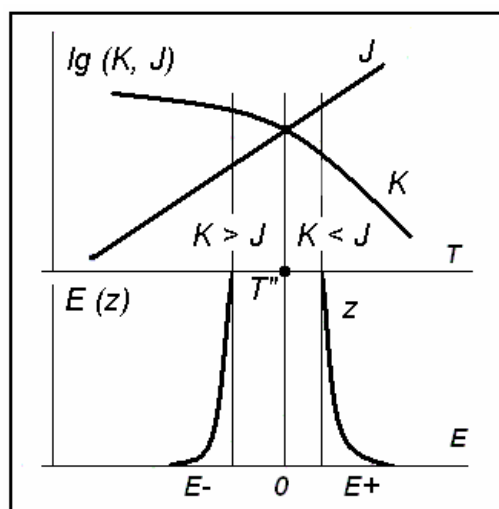


Рис. 9-23. Изменение  $\lg$  скоростей конденсации ( $K$ ) и испарения ( $J$ ) в зависимости от температуры  $T$  – вверху. Внизу – полярность электрического поля  $E$ , как функция отношения  $J$  и  $K$ :  $E +$ , когда  $J > K$ , и  $E -$ , когда  $J < K$ .

Для процессов, происходящих в атмосфере, температура поверхности океана  $T'' \approx 26.5^\circ \text{C}$  считается критической, при которой возникает неустойчивость, результатом развития которой является, в частности, возникновение тайфунов. Считается, что именно при этой температуре процессы испарения начинают превалировать над конденсацией. Как известно, средняя температура Земли, усредненная по земному шару и времени года:  $T \approx 15^\circ \text{C}$ , что ниже  $T''$ . Таким образом, на Земле, в её атмосфере, согласно нашей феноменологической модели, процессы конденсации имеют преимущество перед испарением. Средняя температура Земли величина очень стабильная. Как правило, речь идет о возможных вариациях её от года к году не более единиц процентов. Возможно, постоянство  $T$  является одной из причин того, что и величина  $E$  поддерживается постоянной. Вторая причина стабильности  $E$  - это стабильность потока ГКЛ.

Как мы отмечали выше, разделение электрических зарядов в атмосфере обязано тому, что капли заряжаются, в зависимости от их размеров: маленькие – приобретают положительный заряд и «всплывают», большие заряжаются отрицательно и «падают» на Землю. При постоянных параметрах: температуре, давлении и влажности атмосферы, это очень стабильный во времени процесс. Электрические заряды приносят в атмосферу ГКЛ, плотность потока которых так же очень стабильный во времени процесс. Взаимодействие этих двух стабильных процессов поддерживает уровень  $E_z$  - стабильным. Тем не менее, зададимся вопросом, может ли, в принципе, возникнуть такая ситуация, при которой Земля может оказаться заряженной положительно, а ионосфера – отрицательно?

В современной атмосфере скорость конденсации воды выше скорости испарения. Представим обратную ситуацию: скорость испарения воды превалирует над скоростью её конденсации. В нашей постановке задачи, это означает, что в непосредственной близости над поверхностью испарения скапливается положительный заряд. В это время в более высоких, и более холодных слоях атмосферы водяные пары конденсируются, и при этом образуются капли, обладающие отрицательным зарядом, Капли выносятся потоком пара в верхние слои атмосферы. При этом восходящий поток с каплями, несущими отрицательный заряд, преодолевает земное притяжение, т.е. градиент давления в потоке оказывается больше силы тяжести. Полярность атмосферного электрического поля при этом изменится - на обратную. Эта ситуация отражена в правой части рис. 9-23. На практике эта ситуация возникает при образовании тайфунов, когда на большие высоты

восходящими потоками выносятся огромное количество водяных капель, заряженных отрицательно.

*Поле  $E_z$  и температура поверхности Земли.* Температура поверхности Земли в течение 100 последних лет возрастает. В этой связи, величина АЭП, согласно нашей модели, должна - уменьшаться. Действительно, как было недавно показано по наблюдениям в Шотландии и Шетланде, ежегодное снижение АЭП с 1920 до 1980, когда измерения прекратились (Harrison, 2002; Märcz, Harrison, 2003), было зарегистрировано. Автор пытается связать уменьшение величины АЭП с якобы наблюдаемым уменьшением интенсивности ГКЛ, подчеркивая, тем не менее, существование отрицательной корреляции с глобальной температурой, как и следует из нашей модели (рис. 9-24).

Уместно вспомнить слова знаменитого английского физика Томсона о том, что в будущем предсказание погоды будет осуществляться посредством электрометра. Если наши рассуждения о связи  $E$  с температурой, давлением и влажностью атмосферы Земли верны, то Томсон был очень близок к истине.

Рассмотрим подробнее, в контексте нашей модели, почему и каким образом, АЭП понижается с ростом температуры поверхности Земли. Согласно нашей модели величина  $E_z$  пропорциональна массе водного конденсата облака, размеру частиц - капель воды, которые участвуют в разделении зарядов. Причем, чем больше размер частиц и их больше, тем эффективнее происходит разделение зарядов. Очевидна так же и высказанная выше идея относительно того, что чем скорость конденсации больше скорости испарения, тем больше размер частиц, капель, аэрозолей, т.е. тех частиц, которые переносят отрицательный заряд Земле. Сейчас нашей задачей будет оценить, почему АЭП уменьшается именно настолько, как это следует из данных наблюдений, приведенных на рис. 9-24. Из этого рисунка следует, что, начиная с 1920 г. До настоящего времени (в течение 80 лет;  $dt = 80$ ), величина  $E_z$  уменьшилась примерно вдвое:  $dE_z / dt$  ( $E_z'$ )  $\approx 2$  (со скоростью  $\approx 1$  В/м  $\approx 1\%$  в год), в то время как температура поверхности Земли в этот же период времени выросла на  $0.7 - 0.8$  градуса ( $0.01^\circ \text{ год}^{-1}$ ), что составляет, примерно,  $dT/dt$  ( $T'$ ) = 0.06, или 6 %. (где среднегодовая температура Земли  $T = 15^\circ \text{C}$ ). Отношение скоростей изменения параметров  $T'/E' = 0.03$

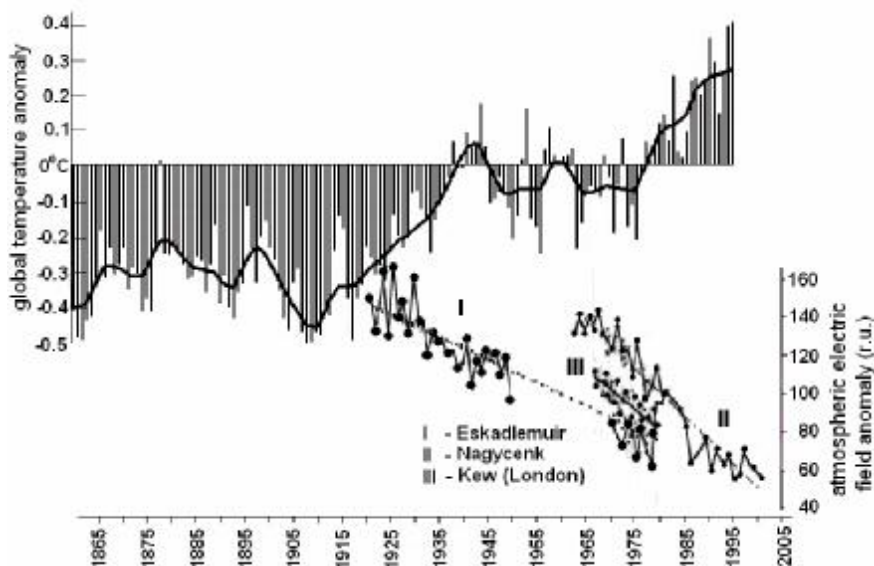


Рис. 9-24. Изменение глобальной температуры Земли. Уменьшение величины  $E_z$  на обсерваториях Венгрии и Великобритании (Märcz, Harrison, 2003)

Для подтверждения модели нам следует получить теоретическую зависимость  $E_Z$  от температуры  $T$ , типа:  $E_Z \sim \exp(-T)$ , или:  $M \sim \exp(-T)$ , т.к.  $E_Z \sim M$ .

Водность  $M$ , иначе, интегральная масса образующихся в атмосфере капель, определяется скоростью нуклеации, т.е. скоростью роста капли. Для оценки скорости нуклеации воспользуемся формулой, полученной Зельдовичем (1942):

$$M \sim nZ (4\pi rPK)/(2\pi m kT)^{1/2},$$

$n$  – концентрация,  $r$  – радиус,  $m$  – масса ядер конденсации, т.е. «зародышей» капель,  $Z$  – фактор Зельдовича,  $P$  – давление,  $K$  – скорость конденсации  $K \sim \exp(-T)$ ,  $k$  – постоянная Больцмана. Учитывая зависимость  $E_Z$  только от температуры, получаем:

$$M \sim T^{1/2} \exp(-T), \text{ или, иначе:}$$

$$E_Z \sim T^{1/2} \exp(-T).$$

Температура поверхности Земли возрастала в течение времени наблюдения  $t$  более или менее линейно со временем:  $T = at$ , тогда  $T' = dT/dt = a$ . Подставим это выражение в формулу для  $E_Z'$  и получим:  $E_Z' \approx \exp(-at)(1 + 2at)/a (at)^{3/2}$ , а отношение  $T'/E' \approx 2a^{3/2}$ , полагая  $t = 1$ . Как отмечалось, величина  $a$ , из наблюдений:  $a = 0.06$ , получаем отношение:  $T'/E' = 0.03$ , что можно рассматривать как подтверждение справедливости нашей модели.

Предположим, что глобальное потепление будет продолжаться с той же скоростью, что и сейчас, т.е.  $\sim 1^\circ/100$  лет, тогда Земля, «нагреваясь», может достичь критической температуры  $T = 26,5^\circ \text{C}$  примерно за 1000 лет. В этом случае поле  $E_Z$  уменьшится, примерно в 10 раз, так что его можно считать практически равным нулю ( $\approx 10 - 15 \text{ В}$ ), что ниже величины флуктуаций  $E_Z$ .

Рассмотрим альтернативную модель, в которой уменьшение величины АЭП может быть, например, связано с вековым уменьшением интенсивности потока ГКЛ. Как мы показали, при Форбуш понижениях, уменьшение  $E_Z$  происходит примерно в 10 раз больше (10 %), чем ГКЛ (1 %). Однако в этом случае понижение величины  $E_Z$  связано с уменьшением самой низкоэнергетической частью общего потока ГКЛ, не принимающих участия в ионизации атмосферы. Принято считать, что максимум ионизации атмосферы приходится на область высот порядка 5 км., где наблюдается максимум ионизации атмосферы потоком ГКЛ, его вариации в процентах примерно соответствуют вариациям  $E_Z$ , что составляет  $\approx 1$  %. С другой стороны, 11-летние солнечные вариации ГКЛ составляют примерно 1 - 2 % в год. Наблюдения ГКЛ на нейтронных мониторах ведется около 50 лет, т.е. имеются данные по 5 циклам солнечной активности. Этих данных недостаточно для того, чтобы утвердительно ответить на вопрос существует ли тенденция векового уменьшения интенсивности потока ГКЛ. В такой ситуации нет возможности ни принять альтернативную модель, ни её опровергнуть.

*Поле  $E_Z$  и грозы.* Неоднократные наблюдения АЭП показывают, что во время гроз его величина – уменьшается, в то время принято считать, что гроза – источник атмосферного электричества. В работе (Франк-Каменецкий и др. 2006) показано, что вклад грозовых разрядов в АЭП ничтожен и не превышает 0.1 %. Обнаружено, что увеличение числа грозовых разрядов ведет к уменьшению величины АЭП.

Ежедневное количество гроз в целом, и их распределение по поверхности Земли значительно изменяется. Это говорит о том, что мирового центра гроз не существует. Можно выделить три региона грозовой активности (по убыванию интенсивности): 1 – Индонезийский, 2 – Бразильский, 3 – Африканский. Кроме этого, большое количество гроз происходит и в экваториальных областях мирового океана.

Итак, изменения количества гроз в году антикоррелирует с изменениями АЭП, в то время как, ещё А.Л. Чижевским и многими другими показано, что многолетний ход кривой частоты гроз и ход кривой числа солнечных пятен совпадают достаточно хорошо.



Например, в качестве иллюстрации приведем Таблицу 9-3, в которой сравниваются числа Вольфа -  $W$  с годовым количеством гроз на Горном Алтае –  $N$  (Дмитриев и др., 2002).

Таблица 9-3

годы:	1956	1964	1968	1976	1979	1987	1990	1998
$W$	142.6	27.6	91.4	36.5	114.0	41.3	118.9	28.6
$N$	340	218	341	270	349	184	231	147
$k = N/W$	2.38	7.89	3.73	7.39	3.06	4.45	1.95	5.13

Из таблицы следует, что в годы максимума солнечной активности, отношение числа гроз ( $N$ ) к числу Вольфа ( $W$ )  $k$  принимает значения:  $k(\max) = 2.7 \pm 1$ , в годы минимума  $k(\min) = 6.2 \pm 1.5$ . Видно, что всегда:  $N \sim W$ , и никогда не наблюдается:  $N \sim 1/W$ . Отношения  $W/W = 142.6/27.6 = 5.16$ ,  $N/N = 349/147 = 2.37$ . (Жирным цветом выделены годы солнечной активности). Зависимость интенсивности ГКЛ и чисел Вольфа от времени:  $I(t) \sim 1/W(t)$ , хорошо известна. Имеется достаточно много доказательств зависимости:  $E(t) \sim I(t)$ . Эти факты противоречат модели грозового источника АЭП.

\* Согласно данным по частоте гроз, представленным на карте, отображенной на сайте: [http://flash.ess.washington.edu/TOGA\\_network\\_global\\_maps.htm](http://flash.ess.washington.edu/TOGA_network_global_maps.htm) Африка вовсе не является мировым центром гроз. Частота появления гроз значительно выше в Индонезии и Южной Америке. Постоянный мониторинг данных, приводимых на этом сайте, убедительно показывает, что вообще нет смысла говорить о каком-либо мировом центре гроз.

*Унитарная вариация АЭП (Carnegie curve).* Как отмечалось, обсуждаемая модель АЭП основана на том, что разделение зарядов происходит не столько в грозовом облаке, что очевидно, но и в атмосфере «хорошей погоды». Подтверждением правомерности модели атмосферного электричества могло бы служить объяснение природы Carnegie curve (CC) АЭП, называемую - Universal diurnal variation (UD-variation, иногда её называют UT). Предложим модель UD-вариации АЭП без привлечения механизма, связанного с частотой гроз\*, якобы максимальной на Африканском материке. Напомним, что суть Carnegie curve АЭП состоит в том, что величина поля возрастает примерно на 20 % одновременно, на всей Земле, в период времени, когда в Лондоне 19 часов (UT = 19). Заметим, что в это время Земля ориентирована относительно Солнца таким образом, что полдень приходится в район Канады, точнее, Канадской магнитной аномалии, т.е. области, в которой горизонтальная компонента геомагнитного поля  $H$  - минимальна. Второй максимум кривой CC приходится на другой минимум величины компоненты  $H$ , который соответствует другой глобальной магнитной аномалии (ГМА) – Восточно-Сибирской.

Нашу модель CC АЭП иллюстрируем рис. 9-25-а, где показана плотность распределения ГКЛ, измеренная с помощью космического аппарата UoSAT, в период с 09.1988 по 05.1992 (Glassmeier et al., 2002). Для удобства представления, карта, показывающая плотность ГКЛ, перевернута таким образом, что северный полюс находится внизу, а восточная часть карты слева, - по ходу вращения Земли. Северное полушарие на рис. 9-25-а выбрано потому, что здесь наблюдается наибольшая долготная анизотропия ГКЛ. Несмотря на то, что в южном полушарии расположена Бразильская (Южно-Атлантическая) магнитная аномалия, в зоне влияния которой регистрируется огромная плотность заряженных частиц. Однако принято считать, что в районе БМА заряженные частицы «высыпаются» из радиационного пояса. Спектр этих частиц значительно «мягче» спектра тех ГКЛ, которые проникают в нижнюю атмосферу и там определяют концентрацию электрических зарядов. Частицы высокой энергии, регистрируемые в районе Бразильской ГМА, участия в притоке зарядов в нижнюю атмосферу не принимают и нами не учитываются. Распределение плотности ГКЛ в области южных полярных широт не имеет такой ярко выраженной анизотропии, как это

наблюдается в северных широтах. На этом основании нами используется только северная часть карты. На рис. 9-25-b приведена карта горизонтальной, Н-компоненты геомагнитного поля, расположенная аналогично карте рис. 9-25-а. Можно наблюдать пространственную корреляцию: области понижения величины Н соответствуют областям, где наблюдается наибольшая концентрация ГКЛ, что очевидно.

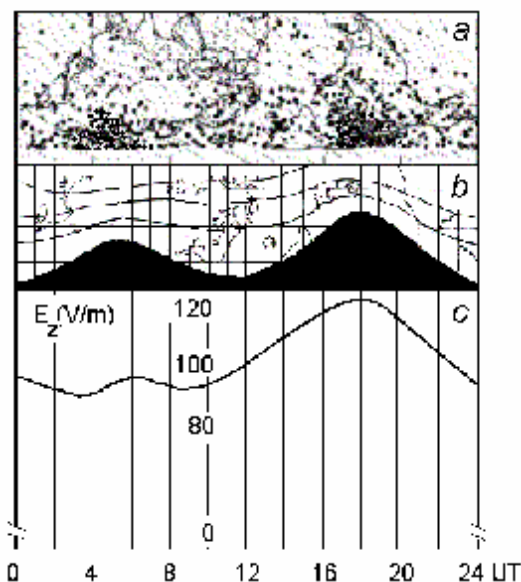


Рис. 9-25. а – Распределение интенсивности космических лучей, полученное с помощью космического аппарата UoSAT в период с 09.1988 по 05.1992 (Glassmeier et al., 2002) в северном полушарии (север – внизу); б - Изолиния величины Н-компоненты геомагнитного поля 10 мкТл (выделена черным цветом, север – внизу); с – СС АЭП.

Определим шкалу времени в нашей модели. Будем полагать, что ноль часов (0 UT) соответствует  $180^\circ$  меридиану, причем именно тогда, когда здесь полдень по местному времени. В такой шкале 19 UT соответствует полуденному времени в районе Канадской ГМА, региону Земли, в котором в атмосферу попадает максимальное количество ГКЛ, модифицированных солнечным ветром. Так как, когда в Лондоне 19 часов, как показано на рис. 9-25-с, Земля ориентирована таким образом, что линия 10 мкТл Н-компоненты геомагнитного поля занимает самые низкие широты, а это означает, что на Землю попадает максимальное количество ГКЛ, обладающих минимально возможной энергией (самая низкая энергия обрезания). Очевидно, что при этом количество заряженных частиц в нижней атмосфере заметно возрастает, что собственно и приводит к увеличению атмосферного электрического поля. На рис. 9-25-с показана унитарная вариация электрического поля. Можно видеть, что изолиния Н-компоненты геомагнитного поля 10 мкТл (выделена черным цветом, север – внизу) и УТ-вариация атмосферного электрического поля  $E$  – практически совпадают. Эти факты положены в основу нашей модели.

Надо сказать, что эта идея совсем не нова. Аналогичную мысль высказал много лет тому назад Э. Швейдлер, который писал: « .. время вступления в максимум (19 часов по Гринвичу) совпадает приблизительно с полуднем меридиана ( $96^\circ$  з.д.), проходящего через магнитный полюс северного полушария» (Швейдлер, 1936). Северный магнитный полюс близок к Канадской глобальной магнитной аномалии.

Зададимся вопросом, существуют ли экспериментальные факты, касающиеся УТ-вариации, свидетельствующие в пользу нашей модели? Действительно, такие факты известны, сошлемся, например, на результаты наблюдений сезонного хода  $E_z$  в Антарктиде, на станции Восток, в течение 1998 г. (Corney, et al., 2003). Результаты, полученные авторами этого сообщения (данные представлены в относительных

единицах), приведены на рис. 9-26 (1). Авторы измеряли унитарную вариацию в течение 1998 года спокойного Солнца и отобрали всего 127 дней «хорошей погоды»: зимой (ноябрь, декабрь, январь и февраль) - 44; летом (май, июнь, июль и август) - 33 и 50 - в равноденствие (март, апрель, сентябрь и октябрь). Как и следовало ожидать, электрическое поле в дни равноденствий (equinox) вело себя таким же образом, что и в среднем в году. Максимальные значения поля  $E_z$  были примерно одинаковы и от сезона особенно не зависели. Кривые (рис. 9-26.1) удобнее различать по относительным величинам поля в периоды второго максимума: летом, это 0.9, в дни равноденствия – 0.8, зимой – 0.7.

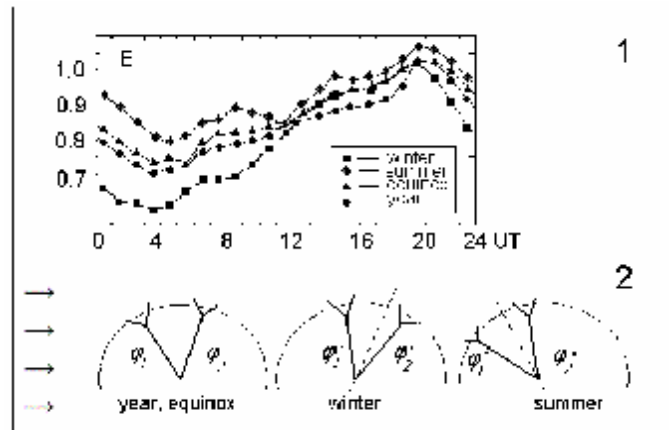


Рис. 9-26. Усредненная величина атмосферного электрического поля (в отн. ед.), зарегистрированная на станции Восток (Антарктида) в течение 1998 г. (Corney, et al., 2003) [1]. Ориентация Земли относительно направления СКЛ (стрелки) в равноденствие, зимой и летом. Углы и «воронки» соответствуют ГМА [2]: Канадская ГМА находится на широте  $\varphi_1 \approx 55^\circ$  N, Сибирская -  $\varphi_2 \approx 63^\circ$  N.

Рассмотрим модель взаимодействия ГКЛ (на рис. 9-26.2 - показаны стрелками), с магнитным полем Земли. В дипольном геомагнитном поле ГКЛ, модифицированное Солнцем, достигнут Земли преимущественно на её геомагнитных полюсах, где горизонтальная компонента равна нулю. Именно в районах полюсов должна наблюдаться самая высокая концентрация электрических зарядов.

Четыре глобальных магнитных аномалии Земли оказывают существенное влияние на структуру геомагнитного поля, две из них расположены в северном полушарии: это Канадская и Сибирская магнитные аномалии. Координаты Канадской ГМА: широта  $\varphi_1 \approx 55^\circ$  N, долгота  $\lambda \approx -100^\circ$ ; координаты Сибирской аномалии:  $\varphi_2 \approx 63^\circ$  N, долгота  $\lambda \approx 120^\circ$ . Эти ГМА определяют конфигурацию геомагнитного поля в северном полушарии, в частности, - «провал» к югу изолинии Н-компоненты, изображенный в верхней части рис. 7. Представим себе схему, в которой высокоэнергичные протоны ГКЛ попадают в атмосферу Земли через ГМА, как своеобразные стоки - «воронки» (рис. 9-26.2). Обозначим широту Канадской ГМА -  $\varphi_1$ , Сибирской -  $\varphi_2$ . Плотность потока частиц ГКЛ, попадающих в геомагнитную «воронку», пропорциональна широте положения ГМА:  $\sim \cos \varphi$ , где  $\varphi$  - широта. Повторим, что наибольшее количество ГКЛ попадает в атмосферу Земли в районах полярных широт, где  $\varphi \rightarrow 90^\circ$ . Пользуясь принятым правилом, оценим соотношение интенсивностей потоков ГКЛ (обозначим его  $A$ ) в районе Канадской ГМА, соответствующей 19 UT и Сибирской ГМА, соответствующей 7 UT.

Учтем, что положение Земли относительно Солнца в течение года меняется на угол  $\pm 23^\circ$ . Среднегодовое значение  $A$  равно отношению интенсивностей потоков ГКЛ в периоды весеннего и осеннего равноденствий, величина  $A \sim \cos \varphi_1 / \cos \varphi_2 = E = 0.8$ , для зимы  $A \sim \cos (\varphi_1 + 23) / \cos (\varphi_2 + 23) = E = 0.7$ , и лета  $A \sim \cos (\varphi_1 - 23) / \cos (\varphi_2 - 23) = E =$

0.9, Полученные значения практически совпадают с данными, по отношению  $E$ , приведенными на рис. 9-26.1, что может говорить об адекватности модели.

В поддержку модели можно сослаться на результаты работы (Tinsley, 2000), где показано, что в моменты Форбуш понижения потока ГКЛ синхронно уменьшается и величина  $E_z$ . Этот вопрос подробнее будет рассмотрен ниже.

*Модель унитарной вариации в ионосфере.* Необычное поведение слоя  $F_2$  на высоких широтах, в частности, образование широтной зоны пониженной ионизации («провала»), идущей параллельно зоне полярных сияний, где наблюдается более высокая степень ионизации, хорошо известно и изучено. Всё это говорит о том, что помимо солнечного излучения изменения электронной концентрации, а, следовательно, и критической частоты  $f_0$  в  $F_2$ -слое определяются рядом геофизических факторов. Одним из таких факторов может быть и наличие ГМА, являющихся причиной, по нашей модели, возникновения УТ-вариации  $E_z$ . В общепринятой интерпретации, это явление адекватно факту несовпадения полюсов: географического и магнитного.

В качестве примера на рис. 9-27 приведены результаты расчетов унитарной вариации  $f_0F_2$  в зависимости от УТ для значений местного времени 00, 06, 12 18 часов. Расчеты проводились для “станций”, расположенных на широте 53 градуса северного полушария для равноденствия, магнитоспокойных условий ( $K_p=1$ ) и низкой солнечной активности ( $F10.7=70$ ).

В.В.Бычковым на модельных расчетах получена унитарная вариация слоя  $F_2$  ионосферы (рис. 9-27). Она определяется несовпадением географической и геомагнитной осей, вращением магнитного поля Земли и, связанной с ним, - системы конвекции плазмы относительно географической оси и основного источника ионизации – Солнца. Схожесть поведения унитарной вариации в ионосфере и в постоянном электрическом поле Земли подтверждает гипотезу о том, что источником электрического поля скорее могут быть особенности взаимодействия ГКЛ с геомагнитным полем Земли, чем неравномерное распределение гроз по континентам.

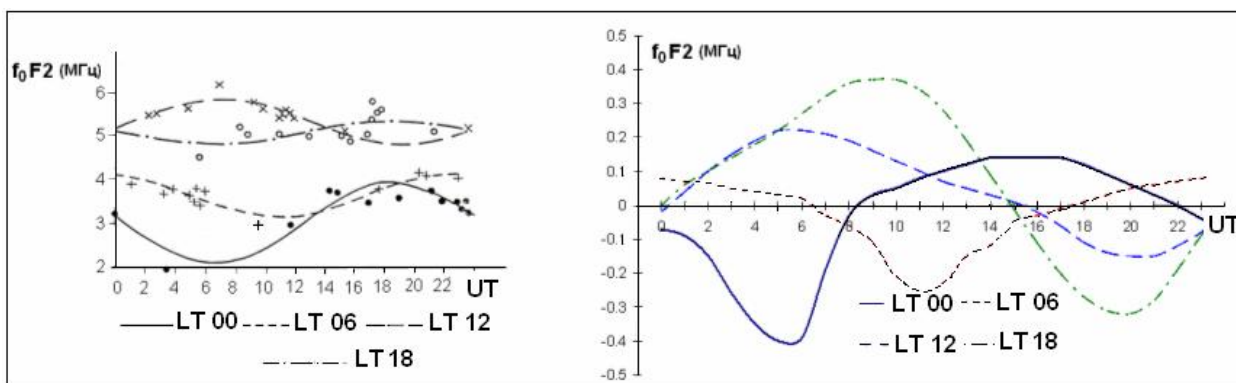


Рис.9-27. Аппроксимация хода критической частоты  $F_2$ -слоя ионосферы от мирового времени УТ в солнечно-ионосферной системе координат по 13 станциям (слева). УТ - вариация  $f_0F_2$  ионосферы для местного времени  $LT= 00, 06, 12$  и  $18$  часов для условий равноденствия и солнечной активности  $F10.7 = 150$  (модель - справа).

*Атмосферное электрическое поле и геомагнитные бури.* Магнитные бури и ионосферные возмущения находят отражение в поведении атмосферного электричества «хорошей погоды». Эта проблема интенсивно изучается, однако, она выходит из круга обсуждаемых нами здесь вопросов. Остановимся лишь на эффектах, демонстрирующих влияние на атмосферное электричество - ГКЛ и других заряженных частиц, попадающих в атмосферу Земли во время геомагнитных бурь. Как отмечалось выше, основной вопрос,

рассматриваемый в этой работе, состоит в выяснении причины, почему и каким образом Земля сохраняет свой заряд неизменным? В контексте с этой темой, нас интересует, какое влияние на заряд Земли оказывают заряженные частицы, попадающие в атмосферу. Казалось бы, присутствие таких частиц приводит к дополнительной ионизации, иначе, к увеличению электропроводности  $\sigma$  и, т.к.  $E \sim 1/\sigma$ , - к уменьшению величины АЭП. С другой стороны, как следует из нашей модели, ГКЛ вносят в атмосферу Земли электрический заряд, который, разделяясь падающими на Землю каплями, является источником поля  $E$ . Таким образом, должно наблюдаться увеличение поля  $E$  при увеличении потока ГКЛ.

Исследованию этого явления посвящена работа (Märcz, 1997), в которой автор в течение 1962-1994 гг. регистрировал поведение АЭП в моменты Форбуш понижений ГКЛ. Наблюдения велись на венгерской обсерватории Nagycenk. Оказалось, что в моменты сильных Форбуш понижений, электрическое поле уменьшалось на  $\sim 5 - 10 \%$ , а затем восстанавливалось до прежнего уровня в течение 5 – 10 дней. Полученные автором результаты отличались от всех предшествующих, но, как можно понять из статьи (Märcz, 1997), исследования проведены очень тщательно и вполне заслуживают доверия. Автор приходит к выводу, что в рамках существующих представлений о глобальном атмосферном электрическом контуре (ГАЭК), объяснить поведение  $E$  не удастся: «маловероятно, что изменения проводимости и потока солнечных частиц одни могут объяснить глобальные изменения электрического поля». Кроме этого, автор приходит к важному для нашей модели выводу: «электрическое поле может одновременно находиться под влиянием других факторов, которые более эффективны в другом месте в атмосфере, и действуют посредством изменения параметров ГАЭК. Таким образом, реакция АЭП к солнечно-земным событиям не всегда однозначна».

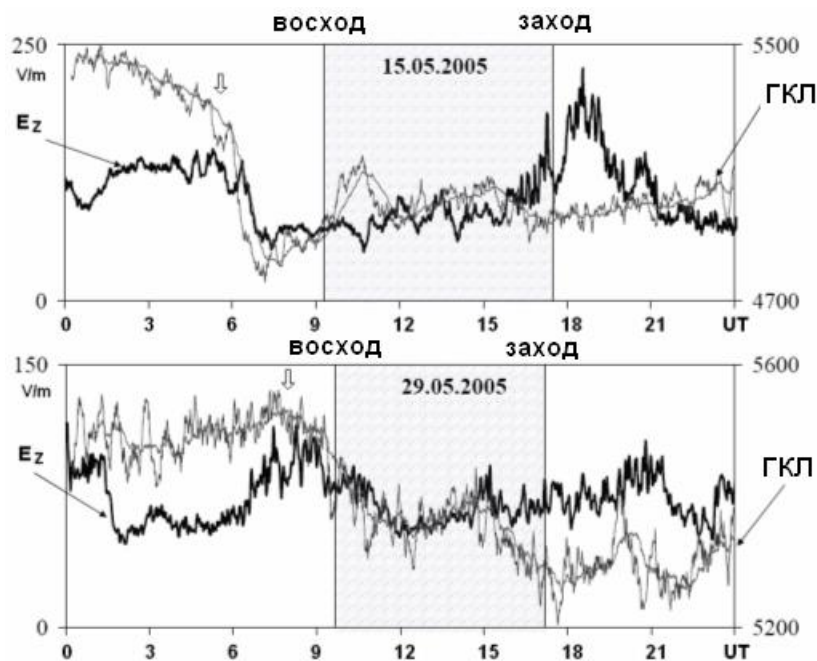


Рис.9-28. Изменение атмосферного электрического поля  $E$  в момент Форбуш понижения и восстановления величины  $E$  в последующие дни (Чернева, Кузнецов, 2005).

Форбуш-эффект исследовался на Камчатке (Чернева, Кузнецов, 2005). Результаты приведены на рис. 9-28. Принципиальное отличие от результата (Märcz, 1997) состоит в том, что АЭП сначала, уменьшалось примерно в 10 раз больше, чем ГКЛ: на 70%, по сравнению с уменьшением ГКЛ на 7%. Затем АЭП возрастало быстрее, чем восстанавливался сигнал ГКЛ. Возможно, в атмосфере происходят одновременно два

процесса: один из них, это возникновение электрического поля за счет разделения заряда падающими каплями, а другой, состоит в том, что присутствующие в атмосфере легкие ионы, не захваченные каплями, являются носителями атмосферного электрического тока  $j$  за счет собственной подвижности  $u$ :  $j = n^+ eu$ . В первом процессе тоже «течет ток», обозначим его  $j_i$ . Этот «ток» представляет собой перемещение отрицательных зарядов к Земле и положительных – к ионосфере. Будем считать его внутренним током источника. Заметим, что наша модель в высокой степени согласована: внутреннее сопротивление источника равно сопротивлению внешней цепи атмосферного тока. Это условие соответствует, как мы отмечали выше:  $I = I_i$  ( $I$  - ток утечки,  $I_i$  – внутренний ток источника), однако, это совсем не означает, что  $j = j_i$ , т.е. должно соблюдаться равенство плотностей тока.

В такой ситуации, естественно, возникает вопрос, известно ли что-нибудь о внутреннем токе источника, т.е., иначе, имеются ли данные о наличии «другого тока» в атмосфере, кроме  $j = n^+ eu$ ? Это принципиальный момент нашей модели. Оговоримся, что современные методы регистрации АЭП и проводимости  $\sigma$  обнаружить  $I_i$  не смогут, т.к. тяжелых ионов и заряженных аэрозолей не регистрируют. Принято считать, что ток утечки  $I$ , - это дрейф легких ионов в поле  $E$ . Модель АЭП окажется правдоподобной в том случае, если удастся выявить ток источника, привлекая любые, в том числе не прямые методы обнаружения.

Один из таких методов, - это прямая регистрация падающих заряженных аэрозолей на поверхность Земли из верхних слоев атмосферы, второй, - обнаружение тока источника по производимому им магнитному полю.

*Эксперименты и наблюдения, подтверждающие нашу модель АЭП.* Изменения величины и полярности АЭП могут быть вызваны рядом причин. В первую очередь. К ним относится воздействие на поле гроз, грозовых туч, циклонов и т.п. Известны случаи изменения величины АЭП в моменты сильных землетрясений. Так, например, в Италии было зафиксирован факт изменения поля в момент сильнейшего землетрясения на Суматре 24.12.04. Электрическое поле начало возрастать практически в момент начала землетрясения (возможно, чуть раньше), значительно раньше, чем пришел сейсмический сигнал в обсерваторию, где проводились измерения поля. Аналогичные результаты были получены в Новосибирске при проведении наблюдений АЭП во время работы сейсмовибраторов и при изучении афтершоков Чуйского землетрясения 27.09.03 на Алтае. И в том, и в другом случаях АЭП реагировало на процесс, происходящий с непосредственной близости от объекта возмущения. Либо в непосредственной близости от сейсмовибратора, либо в гипоцентре землетрясения.

Сошлемся на два наблюдения АЭП, имевших место на Камчатке. Первый – наблюдение за приближающимися к Камчатке циклонами. Исследованы эффекты влияния циклонов Камчатки на величину вертикальной компоненты атмосферного электрического поля (АЭП)  $E_z$ . Циклоны регистрировались по электромагнитному излучению грозовых разрядов с помощью ОНЧ пеленгатора, разработанного в ИКИР (Кузнецов и др., 2007-а). Максимальное расстояние до грозовых очагов, регистрируемое пеленгатором, - достигает четырех тысяч километров. Приведены азимутальные распределения источников ОНЧ излучения и распределения эпицентров циклонов, определяемых на основе синоптических карт гидрометеослужбы Камчатки. Показаны азимутальные перемещения грозовых источников, находящихся в прилегающих к Камчатке областях. Мониторинг  $E_z$  проводился на Камчатской обсерватории Паратунка с применением прибора «Поле-2». Величина  $E_z$  понижается синхронно с атмосферным давлением по мере приближения циклонов к обсерватории. Приводятся оценки величины электрического заряда циклона, максимального понижения атмосферного давления в центре циклона и др. Показано, что АЭП реагирует на перемещение циклона на расстоянии большем 1.5 тыс. км.

Второй эпизод включает результаты экспериментов по исследованию влияния на атмосферное электрическое поле искусственного пароводяного облака. Эксперименты проводились на Камчатском месторождении теплоэнергетических вод в районе Мутновской электростанции. Измерялась напряженность АЭП тремя датчиками, электропроводность воздуха, потенциал скважины и метеопараметры, одновременно в непосредственной близости от геотермальных скважин, открываемых и закрываемых на время наблюдений. Обнаружено различное поведение напряженности электрического поля в зависимости от «сухости» скважины в течение существования облака: чем выше его влажность, тем ниже АЭП и, наоборот, по мере того, как водяной пар становился суше – величина АЭП возрастала и превышала начальное значение в несколько раз (Кузнецов и др., 2007-б).

*Существуют ли «токи Шмидта-Бауэра»?* Мы отмечаем, что ни заряженные отрицательные аэрозоли, ни «тяжелые» ионы, - не регистрируются аппаратурой, предназначенной для измерения АЭП и проводимости атмосферы. Постулированный нами внутренний «ток» источника АЭП представляет собой сумму падающих на Землю отрицательно заряженных тяжелых ионов и капель, и подъем положительно заряженных мелких частиц восходящими потоками в верхние слои атмосферы, вплоть до ионосферы. Движение заряженных частиц положительных в одном направлении, а отрицательных - в другом, это, собственно, и есть ток - внутренний ток источника. Очевидно, что этот ток не может быть обнаружен стандартной аппаратурой.

Естественно, возникает вопрос, если это ток источника, то где же он должен «протекать»? В каком регионе Земли? Как отмечалось, ГКЛ в основном попадают на Землю в полярных регионах. Там должна быть максимальная концентрация зарядов. По-видимому, там должны быть и токи источника, причем направление тока должно быть противоположным току утечки: снизу-вверх. Известно ли что-нибудь о таких токах? Вполне возможно, что «ток», требующийся согласно модели, есть ни что иное, как тот самый, уже давно забытый ток Шмидта-Бауэра, который вызывал огромный интерес у физиков более 100 лет тому назад (Швейдлер, 1936). Так как наблюдения велись с помощью аппаратуры, предназначенной для измерения атмосферного тока  $j$ , токи Шмидта-Бауэра никогда не были обнаружены экспериментально. Наличие на Земле таких вертикальных токов в атмосфере, решало бы ещё одну важную проблему физики Земли - проблему потенциальности источника генерации геомагнитного поля, с одной стороны, и, с другой, служило бы поддержкой нашей модели АЭП.

В чем же состоит природа токов Шмидта-Бауэра? Напомним, что А. Шмидт, анализируя результаты наблюдений геомагнитных данных 1885 г., обнаружил, что, если интегрировать величины Н-компонент геомагнитного поля по замкнутой кривой на поверхности Земли, то интеграл оказывается не равным нулю. Это может означать только то, что внутри этого контура имеется вертикальный ток, плотность которого (по оценкам Шмидта) в 10 000 раз больше плотности тока  $j$ . Вычисления Шмидта по материалам, полученным на сети станций, местами недостаточно густой, признали не вполне надёжными. Однако, Л.А. Бауэр, опираясь на значительно более плотную сеть магнитных станций и на более точные наблюдения, повторил расчеты Шмидта для данных 1897, 1904, 1908, 1920 гг. Практически во всех случаях он находил подтверждение результата Шмидта. Проведенные им оценки погрешностей измерения поля и его интерполяции показали, что даже при отклонении ошибок в одном направлении во всех пунктах измерения и при примитивном линейном методе интерполяции, не получается и половины среднего значения циркуляции поля, что, в частности, послужило основанием для Швейдлера (1936) высказаться в пользу реальности данного явления.

В результате расчетов, проведенных Шмидтом и Бауэром, было обнаружено, что в полярных регионах "ток" действительно направлен вверх (как и следует из нашей модели), в то время как «ток» экваториального пояса в целом имеет противоположную

направленность. Согласно модели, этот «ток» обязан интенсивному испарению в районе экватора с выносом восходящих потоков большого количества отрицательно заряженных водных аэрозолей. Расчеты показали, что плотность обнаруженного таким методом "тока" на 4 порядка превышает плотность атмосферных токов проводимости.

*Некоторые, дополнительные результаты экспериментов.* Приведем некоторые результаты исследований, в значительной мере связанных с наблюдением на спутниках за высыпанием заряженных частиц (их плотности потока и энергии) в районах глобальных магнитных аномалий (ГМА). Первые спутниковые наблюдения показали, что в пяти районах Земли наблюдаются их значительные отличия по сравнению с другими областями земной магнитосферы (Вернов, 1961). Интенсивность выпадения и энергетический спектр частиц резко менялся в Восточной Сибири (1), на Севере Америки (2), Юге Тихого Океана (3), Юге Индийского Океана (4) и Центральной части Атлантики (5). Как выяснили авторы этой работы, 4-я зона является не самостоятельным образованием магнитосферы, а сопряжена по магнитному полю с 1-ой. Таким образом, авторы фактически выделили четыре самостоятельные зоны, в которых наблюдаются особенности поведения высыпающихся в магнитосферу высокоэнергичных частиц. Выделенные зоны пространственно совпадают с рассматриваемыми нами четырьмя ГМА. Эти данные подтверждаются работой (Марков, Мустель, 1983), в которой показано, что высыпание заряженных частиц высоких энергий из земной магнитосферы в нижнюю ионосферу, происходит преимущественно в областях магнитных аномалий. Это явление – проникновение высокоэнергетических частиц солнечного ветра в области магнитных аномалий, было признано в России открытием.

Результаты экспериментов, проведенных на американских спутниках DE-1 и DE-2 по изучению явления « $\Theta$ -авроры» (Frank et al., 1982; Frank et al., 1986), можно интерпретировать не совсем так, как это делают авторы. В нашей модели овал полярных сияний представим как кольцо с перемычкой, - в виде буквы  $\Theta$ . Тщательный анализ мест присоединения перемычки с кольцом (Кузнецов и др., 1989) показал, что эти места не случайны, а полярная дуга и ее «перемычка» совмещаются друг с другом практически всегда в районах Канадской и Сибирской магнитных аномалий. Это явление, проявляющееся уже значительно ниже, на ионосферных высотах, в области полярных сияний, так же служит подтверждением правомерности рассматриваемого подхода к ГМА.

Особенности поведения ионосферы в области Бразильской магнитной аномалии (БМА) рассмотрено в работе (Kane, 1982), где показано, что концентрация ионов в ионосфере этого региона значительно выше, чем в окружающем БМА пространстве ионосферы.

Аппаратура, установленная на японском спутнике EXOS-A позволяла регистрировать частицы, обладающие температурой порядка 1000 К. Авторы (Oyama, Schlegel, 1984) сообщают о том, что ими в районе Бразильской аномалии, в верхней части F-слоя ионосферы, была зарегистрирована значительно более высокая концентрация и энергия частиц, чем в окрестности аномалии. В эксперименте регистрировалась эмиссия электромагнитного излучения в диапазонах 45 кГц, 2 МГц и 3 МГц.

Эффекты проникновения частиц высокой энергии в атмосферу Земли в районе Бразильской магнитной аномалии исследованы в (Pinto, Gonzalez, 1989; Pinto et al., 1992). Наблюдения проводились с помощью космического Hubble – телескопа на орбите 600 км при регистрации потока протонов с энергией большей 10 МэВ. Область пространства, где наблюдалась наибольшая плотность протонов на высоте 600 км, совпадала с местоположением БМА. Измеренная «фоновая» плотность потока протонов, меньшая в 30



раз, чем максимальная, охватывала область пространства вплоть до юга Африки (с востока) и экватора (с севера).

Итак, результаты этих наблюдений демонстрируют очевидную зависимость прохождения заряженных частиц сквозь магнитосферу от её конфигурации. По-видимому, есть основания считать, что асимметрия магнитного поля относительно оси вращения Земли может служить причиной того, что Земля “получает” суммарный электрический заряд от Солнца неравномерно в течение своего оборота вокруг оси. Это явление приводит к появлению унитарной вариации в атмосфере и ионосфере.

В ионосфере известно необычное поведение слоя  $F_2$  на высоких широтах, в частности, образование широтной зоны пониженной ионизации («провала»), идущей параллельно зоне полярных сияний, где наблюдается более высокая степень ионизации. Это говорит о том, что помимо солнечного излучения изменения электронной концентрации, а, следовательно, и критической частоты  $f_o$  в  $F_2$ -слое определяются рядом геофизических факторов. Одним из таких факторов может быть и наличие ГМА, являющихся причиной, по нашей модели, возникновения УТ-вариации  $E_z$ . В общепринятой интерпретации, это явление адекватно факту несовпадения полюсов: географического и магнитного. Известно (гл. VI) распределение магнитных силовых линий в районе северного полюса. Можно видеть, что в области изучения вариаций ионосферы на широте  $\sim 50^\circ N$  плотность магнитных силовых линий возрастает в районах ГМА, что в принятой нами шкале соответствует  $\sim 7$  и  $19$  УТ. Как известно, ионосферная плазма в приполярных районах дрейфует вдоль магнитных силовых линий, и чем гуще силовые линии, тем выше плотность плазмы.

Выводы, следующие из материала Главы IX.

Процессы, происходящие в пространстве между Солнцем и поверхностью Земли, значительно доступнее для изучения, чем те, которые находятся на громадных глубинах. Однако и здесь видна масса нерешенных проблем. Заметим, что некоторые моменты взаимосвязи геооболочек очевидны, как правило, в них громадная роль отводится Солнцу. Действительно, Земля находится в гелиосфере и мы далеко не всегда учитываем этот тривиальный момент. Проблема климата беспокоит жителей Земли много веков, но до сих пор нет глубокого понимания причин его изменения.

Проблема климатических изменений, происходящих в течение последних 400 тысяч лет привлекает огромное внимание исследователей. Впервые в их руки попали достоверные материалы. Возможно, идея об определяющей роли экскурсов и инверсий, связанных с ними понижений уровня магнитного поля Земли и, как следствие, повышение температуры поверхности Земли и повышение уровня радиации в некоторых регионах, окажется продуктивной и поможет, при её дальнейшем развитии, решить ряд важных для человечества проблем эволюции климата и эволюции жизни.

Проблема атмосферного электричества, несмотря на 200-летний интерес к ней, по-видимому, ещё далека от решения. Возможно, развиваемый здесь подход к проблеме физики атмосферного электрического поля, как к разделению зарядов в атмосфере хорошей погоды, когда особое значение приобретают процессы «конкуренции» конденсации и испарения, может оказаться продуктивным. Будущие исследования могут показать, что роль атмосферного электричества в формировании погоды и климата будет заметно выше, чем принято считать в настоящее время.

Заключая, следует отметить, что, как и физика твердой Земли, физика взаимосвязи геооболочек и солнечно-земных связей, остается ещё очень далёкой до её ясного

понимания. Эта область науки настоятельно требует новых идей и подключения молодых энтузиастов-исследователей.

### *Литература*

- Адушкин В.В., Кудрявцев В.П., Турунтаев С.Б. Глобальный поток метана в межгеосферном газообмене. ДАН. 2003. Т. 391. № 6. С. 813-816.
- Апсен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П. и др. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука. 1988. 150 с.
- Артюхин А.С. Численный расчет критического пересыщения паров воды. 2001. [http://www.fizteh.ru/nich/conf\\_mipt/conf2001/falt/section8/artuhin.html](http://www.fizteh.ru/nich/conf_mipt/conf2001/falt/section8/artuhin.html)
- Архипов С.А., Волкова В.С., Гнибиденко З.Н., Орлова Л.А. Палинология, хронология и тонкая структура геомагнитного поля голоценовых отложений юга Западной Сибири. ДАН. 2000. Т. 372. С. 204-207.
- Асатуров М.Л., Будыко М.И., Винников К.Я. и др. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Л.: Гидрометеиздат. 1986.
- Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат. 1991.
- Беспалов П.А., Чугунов Ю.В. Вращение плазмосферы и природа атмосферного электричества. ДАН. 1994. Т. 337. № 4. С. 467-469.
- Боярчук К.А., Карелин А.В., Ломоносов А.М. Особенности ионизации атмосферного воздуха при радиоактивном загрязнении. Ж. тех. физ. 2000. Т. 70. №. 1. С. 139-142.
- Вернов С.Н., Савенко И.А., Шеврин И.И. и др. Внешний радиационный пояс Земли на высоте 320 км. ДАН СССР. 1961. Т. 140. N.4. С. 787-790.
- Герасименко В.И. Электрические и метеорологические поля нижней тропосферы. В кн. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1976. С. 25-31.
- Гирс С.П., Шварц Я.М. Вопросы начальной стадии электризации капель. В кн. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1976. С. 127-129.
- Головкин В.А. Современный энергетический дисбаланс Земли: доказательства существования и возможные последствия // Конференция ИКИ. Москва. 2006.
- Гончаренко А.Н., Копвиллем У.Х., Никитин А.Ю. Особенности изменения вертикальной компоненты электрического поля атмосферы над океаном. Изв. АН. Физика атм. и океана. 1992. Т. 28. № 12. С. 1216-1218.
- Гончаренко Ю.В., Кивва Ф.В. О размерах частиц атмосферного аэрозоля в отражающих слоях, появляющихся после сильных солнечных вспышек. Радиотехника и электроника. 2002. Т. 7. № 3. С. 509-512.
- Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозных облаков. М.: Препринт ФИАН. № 2. 2004. <http://ellphi.lebedev.ru/6/pdf2.pdf>
- Дмитриев А.Н., Кочева Н.А., Шитов А.В. Анализ грозной активности Горного Алтая за 1958-1999 годы. Новосибирск – Горно-Алтайск. ИМ СОРАН-ГАГУ. 2002. 40 с.
- Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб: НИИХ СПбГУ. 1999. 194 с.
- Изаков М.Н. Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах. УФН. 1997. Т. 167. № 10. С.1087-1094.
- Казимировский Э.С., Матафонов Г.К. Континентальные и орографические “структуры” в глобальном распределении общего содержания озона. ДАН. 1998. Т. 361. С. 544-546.
- Кашкин В.Б., Ромасько В.Ю., Сальникова О.Е., Сухинин А.И. Озоновый слой в Сибири по данным спутника NOAA в ИК-диапазоне летом 1995 г. Исследование Земли из Космоса. 1997. №5. С. 23-26.
- Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Нестерова И.И., Поздеева М.С. Унитарная вариация ионосферных параметров. Препринт ИГиГ. Новосибирск. 1988. 30 с.
- Кузнецов В.В., Семаков Н.Н., Доровский В.Н., Котляр П.Е. Физика Земли. Новый взгляд на некоторые проблемы. Новосибирск: Наука. 1989. 128 с.

- Кузнецов В.В., Павлов А.А., Павлов А.Ф. Результаты наблюдений атмосферного электрического поля на равнинной среднеширотной обсерватории “Ключи” (Новосибирск). Препринт № 14. Новосибирск: ОИГГиМ. 1991. 13 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск: Наука. 1992. 92 с.
- Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Нестерова Г.В., Нестерова И.И. Унитарная вариация foF2 и солнечная активность. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. № 2. С. 107-111.
- Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И. О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки // ДАН. 2007-а. Т. 412. № 4.
- Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Бабаханов И.Ю. Исследование влияния искусственного облака на атмосферное электрическое поле // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007-б. Т. 43. № 2. С. 1-7.
- Маричев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В., Шевцов Б.М. Влияние геомагнитных возмущений на образование аэрозольных слоев в стратосфере. Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44. № 6. С. 841-848.
- Марков М.Н., Мустель Е.П. Пространственно-временные эффекты солнечно - земных связей в тропосфере и термосфере. Астрономический журнал. 1983 Т. 60. С. 417-421.
- Мёрнер Н.А., Петрова Г.И. и др. Появление экскурсов на фоне изменения магнитного момента Земли. Физика Земли 2001. № 10 С. 24-32.
- Монин А.С. Прогноз погоды, как проблема физики. М.: Наука. 1969. 184 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.А. О пятилетней цикличности глобальной погоды. ДАН. 1998. Т. 358. С. 395-398.
- Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики. УФН. 2000. Т. 170. С. 419-445.
- Незлин М.В., Снежкин Е.Н. Вихри Россби и спиральные структуры. М.: Наука. 1990.
- Никандров В.Я. Метеорологический аспект электризации конвективного облака. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 41 с.
- Парамонов Н.А. Об унитарной вариации градиента атмосферного электрического потенциала. Докл. АН СССР. 1950. Т. 70. N 1. С. 37.
- Петрова Г.И., Распопов О.М. Связь изменений магнитного момента Земли и палеоклимата за последние 12 тысяч лет. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. № 5. С. 141-150.
- Плоткин В.В., Нестерова И.И., Израйлева Н.И. Унитарная вариация foF2 как характеристика глобального состояния ионосферы. Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. N 5. С. 195-199.
- Прокопенко А.А., Карабанов Е. Б., Кузьмин М.И. и др. Кратковременные климатические события 130-70 тыс. лет назад в осадочной записи озера Байкал. Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 7. С. 623-637.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры. Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 1-22.
- Распопов О.М., Дергачев В.А., Шумилов О.И., и др. Воздействие вариаций потока космических лучей, вызванных изменениями геомагнитного дипольного момента, на изменение климата. Геомагнетизм и Аэрономия. 2000. Т. 40. № 1. С. 97-108.
- Рис Ф., Вальдфогель А. Анализ фрактальной размерности облаков с мощными конвективными токами. В кн. Фракталы в физике М.: Мир. 1988. С. 644-649.
- Рише Л.Е. Концептуальная схема электрической машины Земли. ДАН. 1997. Т. 356. № 4. С. 538-540.
- Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. Киев: Наукова думка. 1981. 296 с.
- Селиверстов Н.И. Гидросферные процессы и четвертичный вулканизм // Вестник КРАУНЦ, 2004. № 3. С. 5-17.
- Тверской П.Н. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1949. 252 с.
- Урицкий В.М., Пудовкин М.И. Фрактальная динамика АЕ-индекса геомагнитной активности как возможное проявление самоорганизованной критичности в магнитосфере. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. № 3. С. 17-28.

- Федер Г. Фракталы М.: Мир. 1991. 260 с.
- Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.5. Электричество и магнетизм. М.: Мир. 1966. 296 с.
- Франк-Каменецкий А.В., Трошичев О.А., Морозов В.Н., Барнс Г., Корней Р. Связь приземного электрического поля в высоких широтах с интенсивными молниевыми разрядами облако-Земля, дающими всплески ОНЧ-излучения. Геомagnetизм и Аэрономия. 2006. Т. 46. № 3. С. 402-408.
- Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. Л-М.: Гостехиздат. 1949.
- Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 592 с.
- Хомутов С.Ю. Взаимосвязь нерегулярных вариаций скорости вращения Земли и глобальных геофизических параметров. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Новосибирск: 1997. 17 с.
- Чернева Н.В., Кузнецов В.В. Форбуш-понижения и эффекты терминатора в атмосферном электричестве Камчатки//Астрофизика и физика околоземного космического пространства: Тр. 8-ой конференции молодых ученых. Иркутск. 2005. Стр. 37-40.
- Швейдлер Э. Сохранение электрического заряда Земли. М, Л.: ОТЛ. 1936. 75 с.
- Aldahan A., Possnert G. Geomagnetic and climatic variability reflected by <sup>10</sup>Be during the Quaternary and late Pliocene. *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. doi: 10.1029/2002GL016077.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59. P. 381-384.
- Bard E. Climatic shock: abrupt changes over millennial time scales. *Phys. Today.* XII. 2002.
- Barracough D.R., De Santis A. Chaos in the present geomagnetic field. Abstracts 8-th scientific Assembly of IAGA Symposia. Uppsala. 1997. P. 13.
- Bassinot F.C., Labeyrie L.D., et al. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1994. V. 93. P. 11667-11680.
- Blunier T., Chappellaz J., Schwander, et al., Asynchrony of Antarctic and Greenland climate change during the last glacial period. *Nature.* 1998. V. 394. P. 739-743.
- Bohnel H., Molina-Garza R. Secular variation in Mexico during the last 40,000 years, *Phys. Earth Planet. Inter.* 2002. V. 133. P. 99-109.
- Boteler D.H. The relation between magnetic range values and spectral power. *Geophys. J. Int.* 1998. V. 134. P. 613-616.
- Brook E.J., Sowers T., Orchado J. Rapid variations in atmospheric methane concentration during the past 110,000 years. *Science.* 1996. V. 273. P. 1087-1091.
- Brunet M, Guy F., Pealbeam D., et al. A new hominid from upper Miocene of Chad, Central Africa. *Nature.* 2002. V. 418 P.145-151.
- Cann R.L., Stoneking M., Wilson A.C. Mitochondrial DNA and human evolution. *Nature.* 1987. V. 325. P. 31-36.
- Cavalli-Sforza L.L., Feldman M.W. The application of molecular genetic approaches to the study of human evolution. *Nature Genetics.* 2003. V. 33. P. 266-275.
- Chave A.D., Denham C.R. Climatic changes, magnetic intensity variations and fluctuations of the eccentricity of the Earth's orbit during the past 2,000,000 years and a mechanism which may be responsible for the relationship - a discussion. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1979. V. 44. P. 150-152.
- Chen J., Carlson B.E., Del Genio A.D. Evidence for strengthening of the tropical general circulation in the 1990s. *Science.* 2002. V. 295. P. 838-841.
- Chou H.H., Hayakawa T., Diaz S., et al. Inactivation of CMP-N-acetylneuraminic acid hydroxylase occurred prior to brain expansion during human evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2002. V. 99(18). P. 11736-11741.
- Clement B.M. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. *Nature.* 2004. V. 428. P. 637-640.
- Corney R.C., Burns G.B., Michael K., et al., The influence of polar-cap convection on the geoelectric field at Vostok, Antarctica. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2003. V. 65. P. 345-354.

- Creer K.M., Thouveny N., Blunk I. Climatic and geomagnetic influences on the Lac du Bouchet palaeomagnetic SV record through the last 110 000 years, *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. V. 64. P. 314-341.
- Cuffey K.M., Vimeux F. Covariation of carbon dioxide and temperature from the Vostok ice core after deuterium-excess correction. *Nature.* 2001. V. 412. P. 523-527.
- Dallenbach A., Blunier T., Fluckiger J., et al. Changes in the atmospheric CH<sub>4</sub> gradient between Greenland and Antarctica during the Last Glacial and the transition to the Holocene. *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 1005-1008.
- Doake C.S.M. A possible effect of ice ages on the Earth's magnetic field. *Nature.* 1977. V. 267. P. 415-417.
- Doake C.S.M. Climatic change and geomagnetic field reversals: a statistical correlation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1978. V. 38. P. 313-318.
- Ermakov V.I., Bazilevskaya G.A., Pokrevsky P.E., Stozhkov Y.I. Ion balance equation in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. D19. P. 23413-24420.
- Fairbridge R.W. Global climate change during the 13,500-b.p. Gothenburg geomagnetic excursion. *Nature.* 1977. V. 265 P. 430.
- Frank L.A., Craven J.D., Burch J.L. and Winningham J.D., Polar views of the Earth's aurora with Dynamics Explorer. *Geoph. Res. Lett.* 1982. V. 9. N. 9. P. 1001-1004.
- Frank L.A., Craven J. D, Gurnett D. A. et al. The Theta Aurora. *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 3177-3224.
- Frank M., Schwarz B., Baumann S., et al. A 200 kyr record of cosmogenic radionuclide production rate and geomagnetic field intensity from <sup>10</sup>Be in globally stacked deep-sea sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. V. 149. P. 121-129.
- Gagneux P., Wills C, Gerloff U., et al. Mitochondrial sequences show diverse evolutionary histories of African hominoids. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* 1999. V. 96(9). P. 5077-5082.
- Glassmeier K.-H., Neuhaus A., Vogt J. Space Climatology. Invited presentation. Alpach Summer School. 2002.
- Glazko G.V., Nei M. Estimation of Divergence Times for Major Lineages of Primate Species. *Mol. Biol. Evol.* 2003. V. 20(3). P. 424-434.
- Gosse J.C., Phillios F.M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quanter. Sci. Rev.* 2001. V. 20. P. 1475-1560.
- Guyodo Y., Valet J.-P. Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: the past 200,000 years. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. V. 143. P. 23-36.
- Hampton D.L., Heavner M.J., Wescott E.M., Sentman D.D. Optical spectral characteristics of sprites. *Geoph. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 89-92.
- Haq B.U. Natural gas hydrates: searching for the long-term climatic and slope-stability records. *Gas Hydrates Relevance to world margin stability and climate change.* Ed. J.-P. Henriot and J. Mienert. *Publ. Geol. Soc. London.* 1998. P. 303-318.
- Harrison C.G. Evolutionary processes and reversals of the Earth's magnetic field. *Nature.* 1968. V. 217. P. 46-47.
- Harrison C.G.A., Prospero J.M. Reversals of the Earth's magnetic field and climatic changes. *Nature.* 1974. V. 250 P. 563-565.
- Harrison R.G. Atmospheric electricity and cloud microphysics. CERN. Geneva. 2001.
- Harrison R.G. Twentieth century secular decrease in the atmospheric potential gradient // *Geoph. Res. Lett.*, V. 29, NO. 14, 1660, doi:10.1029/2002GL014878, 2002.
- Hartl P., Tauxe L. A precursor to the Matuyama/Brunhes transition-field instability as recorded in pelagic sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. V. 138. P. 121-135.
- Hawks J., Hunley K., Lee S-H., Wolpoff M. Population Bottlenecks and Pleistocene Human Evolution. *Molecular Biology and Evolution.* 2000. V. 17. P. 2-22.
- Hays P.B., Roble R.G. A Quasi-Static Model of Global Atmospheric Electricity. 1. The Lower Atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. N. A7. P. 3291-3305.
- Hecht A.D. Geomagnetism and climate (and replies Fairbridge). *Nature.* 1977. V. 268. P. 669.

- Heider F., Hufenbecher F., Draeger U., Hayashida A. The Brunhes-Matuyama and upper Jaramillo transitions recorded in sediments from the California margin. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*. Ed. Lyle M. et al. 2000. V. 167. P. 311-318.
- Heitzler J.R. The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 1701-1708.
- Horai S., Hayasaka K., Kondo R., et al. Recent African Origin of modern humans revealed by complete sequences of hominoid mitochondrial DNAs. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1995. V. 92. P. 532-536.
- Holt J.W., Kirschvink J.L. Geomagnetic field inclinations for the past 400 kyr from the 1 km core of the Hawaii scientific drilling project, *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 11655-11663.
- Huelsenbeck J.P., Imennov N.S. Geographic origin of human mitochondrial DNA: accommodating phylogenetic uncertainty and model comparison. *Syst. Biol.* 2002. V. 51(1). P. 155-165.
- Inan U.S., Bell T.F., Pasko V.P., Sentman D.D., Wescott E.M., Lyons W.A. VLF signatures of ionospheric disturbances associated with sprites. *Geoph. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 3461-3464.
- Inan U.S., Slingeland A., Pasko V.P., Rodrigues J.V. VLF and LF signatures of mesospheric/lower ionospheric response to lightning discharges. *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 5219-5238.
- Jacobs J.A. *Reversals of the Earth's magnetic field*. Cambridge Univ. Press. 1994.
- Imbrie J., Imbrie J.Z. Modeling the climatic response to orbital variations. *Science*. 1980. V. 207. P. 943-953.
- Jorde L.B., Bamshad M., Rogers A.R. Using mitochondrial and nuclear DNA markers to reconstruct human evolution. *Bio Essays*. 1998. V. 20(2). P. 126-136.
- Juozel J., Barkov N.I., Barnola J.M., et al. Vostok Ice Core Methane Data for 420,000 Years // *Nature*. 1993. V. 364. P.407- 412.
- Jouzel J., Masson V., Cattani O., et al., A new 27 ky high resolution East Antarctic climate record. *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 3199-3202.
- Kalnay E., Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*. 2003. V. 423. P. 528-531.
- Kane, R.P. Particle precipitation in the ionospheric F-2 region at location in vicinity of the south atlantic magnetic anomaly. *Ann. Geophys.* 1982. V.38. N. 6. P. 841-848.
- Kent D.V., Carlut J. A negative test of orbital control of geomagnetic reversal and excursions. *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 3561-3564.
- Kent D.V., Hemming S.R., Turrin B.D. Laschamp excursion at Mono Lake? *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 197. P. 151-164.
- Kostitzin V.A. *Evolution de l'atmosphère. Circulation organique époques glaciaires*. Paris.: Hermann. 1935.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I., Pozdeeva M.S. Universal diurnal variation of F2-layer critical frequency. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1990. V. 42. N 10. P. 1237.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I., Izraileva N.I. Universal Diurnal Variation of F<sub>2</sub>-Layer Critical Frequency as Characteristic of Global Ionosphere Condition. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1993-a. V. 45. P. 1175-1179.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I., Izraileva N.I. Universal variations of ionospheric parameters and the geomagnetic field: theoretical view and evaluations. *J. Atm. Terr. Physics*. 1993-b. V. 55. N. 11/12. P. 1575-1582.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Izraileva N.I. and Nesterova I.I., The investigation of electromagnetic interactions between regions surrounding the Earth - 1. Initial equations, the boundary conditions, the distribution of external currents and the methods of numerical solution. *J. Atm. Terr. Physics*. 1995-a. V. 57 N. 13. P. 1639-1646.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Izraileva N.I. and Nesterova I.I., The investigation of electromagnetic interactions between regions surrounding the Earth - 2. Results of the numerical simulation *J. Atm. Terr. Physics*. 1995-b. V. 57 N. 13. P. 1647-1660.

- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Nesterova I.I and Nesterova G.V., Universal variation of F<sub>2</sub>-layer critical frequency and solar activity. *Earth Planets Space*. 1998. V. 50. P. 57-61.
- Kuznetsov V.V. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals. *Phys. Earth Planet. Int.* 1999. V. 115. P. 173-179.
- Liddicoat J.C., Coe R.S. Mono Lake geomagnetic excursion, *J. Geophys. Res.* 1979. V. 64. P. 261-280.
- Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas. *Science*. 1982. V. 216. P. 185-187.
- Mende S.B., Rairden R.L., Swenson G.R. Sprite spectra; N<sub>2</sub> 1 PG band identification. *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 2633-2636.
- März F. Short-term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases. *J. Atm. Terr. Physics*. 1997. V. 59. N. 9. P. 975-982.
- März F., Harrison R.G. Long-term changes in atmospheric electrical parameters observed at Nagyecenk (Hungary) and the UK observatories at Eskdalemuir and Kew // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21. P. 2193-2200.
- Marsh N., Svensmark H. Solar influence on Earth's climate. *Space Sci. Rev.* 2003. V. 107. P. 317-325.
- Nickolaenko A.P., Hayakawa M. Natural electromagnetic pulses in the ELF range. *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3103-3106.
- Oda H., Shibuya H., Hsu V. Palaeomagnetic records of the Matuyama/Brunhes polarity transition from ODP Leg 124 (Celebes and Sulu seas). *Geophys. J. Int.* 2000. V. 142. P. 319-338.
- Oyama, K.I., Schlegel K. Anomalous electron temperatures above the South American Magnetic Field Anomaly. *Plan. Space Sci.* 1984. V. 32. N. 12. P. 1513-1522.
- Palle E., Goode P.R., Montanes-Rodriguez P., Koonin S.E. Can Earth's albedo and surface temperature increase together? // *Eos*, 2006. V. 87, N 4, P. 37, 43.
- Pasko V.T., Inan U.S., Bell T.F. Blue jets produced by quasi-electrostatic pre-discharge thundercloud fields. *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 301-304.
- Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F., Reising S.C. Mechanism of ELF radiation from sprites. *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3493-3496.
- Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D., et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999. V. 399. P. 429-436.
- Petrova G.N., Pospelova G.A. Excursions of the magnetic field during the Brunhes chron, *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. V. 63. P. 135-143.
- Pinto, Ir. O., Gonzalez W.D. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly: a review. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989. V.51. P. 351-365.
- Pinto, Ir., O., W. D. Gonzalez, I.R.C. Pinto, et al. The South Atlantic Magnetic Anomaly: three decades of research. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. V. 54. P. 1129-1134.
- Rairgen R.L., Mende S.B. Time resolved sprite imagery. *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 3465-3468.
- Raisbeck G.M., Yiou F., Bourles D., Kent D.V. Evidence for an increase in cosmogenic <sup>10</sup>Be during a geomagnetic reversal. *Nature*. 1985. V. 315. P. 315-317.
- Rahmstorf S. Timing of abrupt climate change: a precise clock. *Geophys. Res. Lett.* V. 30. doi: 10.1029/2003GL017115, 2003.
- Rampino M.R. Possible relationships between changes in global ice volume, geomagnetic excursions, and the eccentricity of the Earth's orbit. *Geology*. 1979. V. 7. N.12. P. 584-587.
- Rampino M.R., Stothers R.B.. Climatic effects of volcanic eruptions. *Nature*. 1985. V. 313. P. 272.
- Rampino M.R., Self S., Stothers R.B. Volcanic winters. // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1988. V. 16. P. 73-99.
- Rampino M.R., Ambrose S.H. Volcanic winter in the Garden of Eden: The Toba supereruption and the late Pleistocene human population crash. *Geological Society of America. Special paper* 345. 2000. P. 71-82.
- Rampino, M.R., 2002: Supereruptions as a threat to civilizations on Earth-like planets. *Icarus* , 156, 562-569, doi:10.1006/icar.2001.6808.

- Robinson C., Raisbeck G.M., Yiou F., et al. The relationship between  $^{10}\text{Be}$  and geomagnetic field strength records in central North Atlantic sediments during the last 80 ka. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. V. 136. P. 551-557.
- Roble R.G., Hays P.B. A Quasi-Static Model of Global Atmospheric Electricity. 2. Electrical coupling between the upper and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 7247-7256.
- Roca A.L., Georgiadis N., Pecon-Slatery J., O'Brien S.J. Genetic evidence for two species of Elephant in Africa. *Science*. 2001. V. 293. P. 1473-1477.
- Rothlisberger R., Mulvaney R., Wolff E.W. et al., Dust and sea salt variability in central East Antarctica (Dome C) over the last 45 kyrs and its implications for southern high-latitude climate. *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 24-1-4.
- Rozzi F.V., Castro J.B. Surprisingly rapid growth in Neanderthals. *Nature*. 2004. V. 428. P. 936-939.
- Satta Y., Takahata N. Ancestral haplotype distribution in finite stepping-stone models. *Molecular ecology*. 2004. V. 13. P. 877-886.
- Serre D., Langaney A., Chech M., et al. No evidence of Neandertail mtDNA contribution to Early Modern Humans. *PLoS Biology*. 2004. V. 2(3).  
[URL:http://www.plosbiology.org/archive/1545-7885/2/3/pdf/10.1371\\_journal.pbio.0020057-S.pdf](http://www.plosbiology.org/archive/1545-7885/2/3/pdf/10.1371_journal.pbio.0020057-S.pdf)
- Sentman D.D., Wescott E.M. Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft. *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 2857-2860.
- Sentman D.D., Wescott E.M., Osborn D.L., Hampton D.L., Heavner M.J. Preliminary results from the Sprite-94 campaign: red sprite. *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 1205-1208.
- Schulz H., von Rad U., Erinkeuser H. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110,000 years. *Nature*. 1998. V. 393. P. 54-57.
- Sloan, Jr E.D. Physical/chemical properties of gas hydrates and application to world margin stability and climatic change *Gas Hydrates Relevance to world margin stability and climate change*. Ed. J.-P. Henriot and J. Mienert. *Publ. Geol. Soc. London*. 1998. P. 31-50.
- Spitzer Jr. L. *Physical processes in the interstellar medium*. N.-Y.: J. Wiley & Sons, Inc. 1978
- Stedman H.H., Kozyak B.W. et al. Myosin gene mutation correlates with anatomical changes in the human lineage. *Nature*. 2004. V. 428. P. 415-418.
- Steig E. J., Brook E. J., White J. W. C., et al., Synchronous climate changes in Antarctica and the North Atlantic. *Science*. 1998. V. 275. P. 92-95.
- Sukhorukov A.I., Mishin E.V., Stubbe P. On blue jet dynamics. *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 1625-1628.
- Takahata N., Satta Y., Klein J. Divergence time and population size in the Lineage leading to modern Humans. *Theoretical population biology*. 1995. V. 48(2). P. 198-221.
- Takahata N., Satta Y. Evolution of the primate lineage leading to modern humans: Phylogenetic and demographic inferences from DNA sequences *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1997. V. 94(9). P. 4811-4815.
- Takahata N., Lee S., Satta Y. Testing Multiregionality of Modern Human Origins. *Molecular Biology and Evolution*. 2001. V. 18. P. 172-183.
- Thejll P., Christiansen Bo, Gleisner H. On correlations between the North Atlantic Oscillation, geopotential heights, and geomagnetic activity. *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. doi: 10.1029/2002GL016598.
- Tinsley B.A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Sci. Rev.* 2000. V. 94. P. 231-258.
- Tric E., Laj C., Valet J.-P., et al. The Blake geomagnetic event: transition geometry, dynamical characteristics and geomagnetic significance, *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 102. P. 1-13.
- Uffen R.J. Influence of the Earth's core on origin of life. *Nature*. 1963. V. 198. P. 143-144.
- Valet J.-P. Meynadler L. Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years. *Nature*. 1993. V. 366. P. 234-238.



- Vanhellemont F., Fussen D., Bingen C. Cosmic rays and stratospheric aerosols: Evidence for a connection? *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 10-1 – 10-4.
- Vimeux F., Masson V., Jouzel J. et al., Glacial-interglacial changes in ocean surface conditions in the Southern Hemisphere. *Nature.* 1999. V. 398. P. 410-413.
- Vimeux F., Cuffey K. M., Jouzel J. New insights into Southern hemisphere temperature changes from Vostok ice cores using deuterium excess correction. *Earth Plan. Sci. Lett.* 2002. V. 203. P. 829-843.
- Waddington C.J. Paleomagnetic field reversals and cosmic radiation. *Science.* 1967. V. 158. P. 913-915.
- Watanabe O., Jouzel J., Johnsen S., et al. Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles. *Nature.* 2003. V. 422. P. 509-512.
- Wollin G., Ericson D.B., Ryan W.B.F. Magnetism of the Earth and climatic changes, *Earth Planet. Sci. Lett.* 1971. V. 12. P. 175-183.
- Wollin G., Ryan W.B.F., Ericson D.B. Climatic changes, magnetic intensity variations and fluctuations of the eccentricity of the Earth's orbit during the past 2,000,000 years and a mechanism which may be responsible for the relationship, *Earth Planet. Sci. Lett.* 1978. V. 41. P. 395-397.
- Wood B. Palaeoanthropology: Hominid revelation from Chad. *Nature.* 2002. V. 418. P. 133-135.
- Worm H.-U. A link between geomagnetic reversals and events and glaciations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1997. V. 147. P. 55-67.
- Yamazaki T., Oda H. A Brunhes- Matuyama polarity transition record from anoxic sediments in the South Atlantic (Ocean Drilling Program Hole 1082C). *Earth Planets Space.* 2001. V. 53. P. 817-827.
- YANG Taibao, YU Yongtao, LI Jijun et al. Paleomagnetic excursions recorded in Yanci Playa in Middle Hexi Corridor, NW China since the last interglacial. *J. of Mountain Science.* 2004. V. 1. N. 2. P. 128-142.
- Yukhimuk V., Roussel-Dupre R.A., Symbalisky E.M.D. Optical characteristics of Blue Jets produced by runaway air breakdown, simulation results. *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3289-3292.
- Zadorozhny A.M., Tyutin A.A. Universal diurnal variation of mesospheric electric fields. *Adv. Space Res.* 1997. V. 20. P. 2177-2180.
- Zhang X.Y., Lu H.Y., Arimoto R., Gong S.L. Atmospheric dust loadings and their relationship to rapid oscillations of the Asian winter monsoon climate: two 250-kyr loess records, *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 202. P. 637-643.
- Zielinski G.A., Mayewski P.A., Meeker L.D., et al., Record of volcanism since 7000 B.C. from GISP2 Greenland ice core and implications for the volcano-climate system // *Science.* 1994. V. 264. P. 948-952.

## Глава V. ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГОРЯЧЕЙ ЗЕМЛИ

Новая модель устройства Земли, естественно, привносит новые аспекты во все разделы наук о Земле. В этой главе речь пойдет о некоторых принципиальных вопросах, касающихся химических аспектов модели горячей Земли. Разрабатывая принципиально новую теорию, или модель, всегда следует задаваться вопросом, в частности: можно ли найти ответы в самой модели горячей Земли на дискуссионные вопросы? Здесь предпринята попытка, найти такие ответы. Возможно, жизнь сама покажет, насколько всё изложенное ниже действительно имеет отношение к такому удивительному явлению, как планета Земля.

### V. 1. Химический состав планеты.

Земля, по нашей модели, как и другие планеты, и их спутники, образовалась одновременно с Солнцем из одного с ним вещества. Различия в средних плотностях планет определяются наличием и размером высокоплотного ядра и концентрацией водорода в оболочках планет и спутников. Развивая модель горячей Земли, в дальнейшем будем полагать, что химический состав планет, спутников и Солнца - одинаков. Выясним, как эта идея может сказаться на решении таких принципиальных в геологии и геофизике вопросов: почему скорость сейсмических волн плавно возрастает с увеличением глубины; почему образовались месторождения полезных ископаемых; почему на Земле и Венере есть и граниты, и базальты, а на Луне - гранитов нет и т.д.

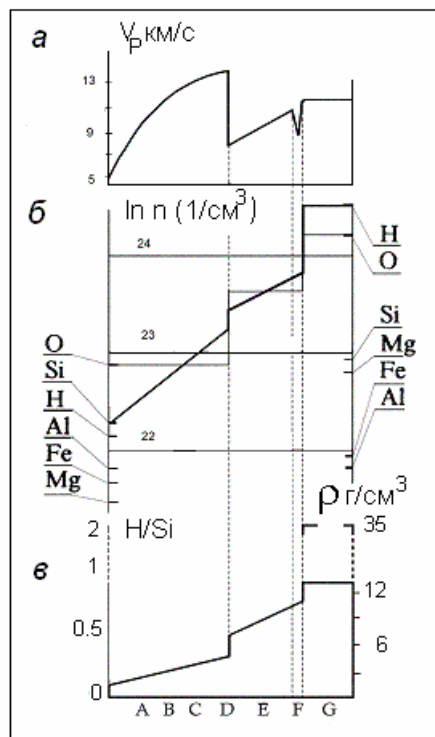


Рис. 5-1. Распределение скорости Р-волн и величины плотности по глубине Земли – а; изменение концентрации химических элементов по глубине Земли – б; параметр H/Si – в.

Рисунок 5-1 демонстрирует высказанную идею. Как следует из нашей модели, в центре Земли химический состав вещества идентичен солнечному. Относительное количество водорода на Земле значительно меньше, чем на Солнце (примерно в 1000 – 10 000 раз). Относительная концентрация остальных элементов во внутреннем ядре соответствует солнечной. Химический состав земной коры хорошо известен. Таким образом, можно подобрать концентрацию химических элементов (в  $\text{lg}$  штук в  $\text{cm}^3$ ) так, чтобы изменение химического состава земных оболочек происходило только на фазовых

границах (см. рис. 5-1-б). Концентрация водорода, в отличие от всех других элементов, уменьшается с увеличением радиуса. Очевидно, что такой характер изменения концентрации элементов предполагает особую роль водорода в строении вещества Земли.

## V. 2. Роль водорода.

Модель горячей Земли предполагает наличие водорода, как во внутреннем ядре, так и в других ее оболочках, естественно, в значительно меньших концентрациях. Воспользуемся введенным Karato (1990) параметром H/Si, характеризующим отношение концентраций “водород/кремний”. Этот параметр во внутреннем ядре (по нашей модели) примерно равен единице (точнее, 0,66). Согласно Карато, на глубине 100 км величина H/Si порядка  $10^{-3}$ - $10^{-4}$ . Наши оценки показывают, что на границе ядро-мантия, - отношение H/Si будет около 0,2 - 0,3.

Присутствие водорода в веществе земных оболочек позволяет воспользоваться его удивительной и уникальной способностью образовывать т.н. водородные связи между элементами (атомами, молекулами, ионами и т.п.) вещества. Как будет следовать из дальнейшего изложения, этот подход позволяет найти объяснение свойств и структуры земного вещества альтернативное общепринятой точке зрения.

Итак, вода и лед с их водородными связями обладают уникальными аномальными свойствами. Свойства системы “вода-лед” (резкое изменение плотности и скорости звука на границе жидкость-кристалл) в значительной мере похожи на свойства системы “ядро-мантия” (см. рис. 5-2). Это обстоятельство позволяет нам использовать теории и модели, разработанные для объяснения свойств воды, для толкования свойств и структуры вещества земных оболочек. Однако прежде чем перейти к построению нашей модели, приведем некоторые сведения о свойствах воды, льда и водородных связей.

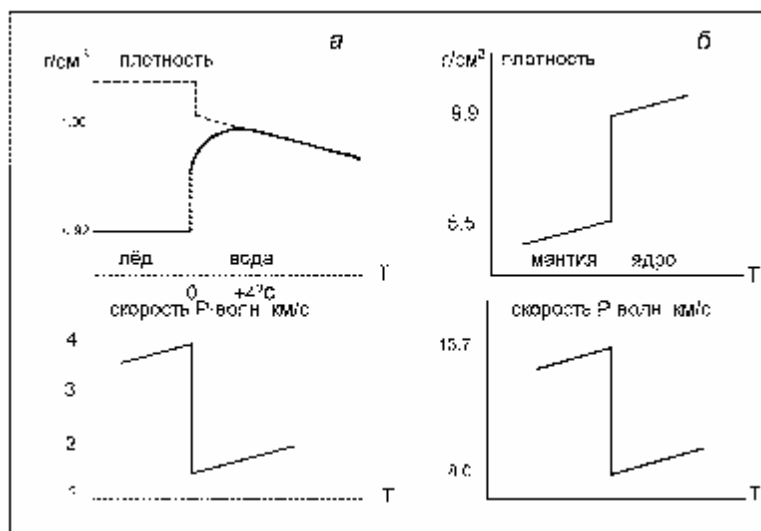


Рис.5-2. Изменение плотности и скорости звука на границе вода-лед - а и границе ядро-мантия – б.

*Вода, лед и водородные связи.* Вода и лед, это самое распространенное вещество во Вселенной, и в то же время, это самое необычное вещество, обладающее самыми “аномальными” (по сравнению с другими “нормальными” веществами) свойствами. Аномальные свойства воды настолько привычны, что о них обычно не задумываются. Еще Галилей заметил, что жизнь на Земле обязана проявлению водой ее аномальных свойств. Физические и химические свойства воды и льда обсуждаются в научной литературе не менее 200 лет. Аномальное поведение воды обязано, как известно, наличию у нее водородных связей. Вещества, так же обладающие водородными связями, ведут себя аналогично воде. Водородная связь между атомами считается промежуточной между

валентной и Ван дер-Ваальсовой связями. Эта связь может образоваться при наличии атома Н между двумя электроотрицательными атомами, причем с одним из них атом Н связан ковалентной связью. Природа водородной связи состоит в том, что электронная плотность на линии Н...О (N, F и т.п.) смещается к отрицательному атому. Это способствует сближению электронов отрицательных атомов соседних молекул. В результате, расстояния О – О, О – N и т.п. становятся значительно меньше, чем они были бы без наличия атома Н. Явление укорочения длины атомных связей двух молекул А и В: А - В (без водорода) и А - Н...В (с присутствием атома водорода), иллюстрирует таблица 5.1, построенная по данным, приведенным в Физической энциклопедии (1992).

Таблица 5.1.

Н – связь:	энергия ккал/моль	расстояние в Å А - В	расстояние в Å А - Н...В
слабая	0.1 - 1.0	3.0 - 3.5	2.0 - 2.5
средняя	5.0 - 15.0	2.7 - 3.0	1.7 - 2.0
сильная	20 - 60	2.2 - 2.5	1.1 - 1.2

Из таблицы 5.1 следует, что наличие сильной водородной связи приводит к тому, что расстояние между атомами уменьшается примерно вдвое.

Плотность льда меньше плотности воды. Это свойство отличает воду и другие вещества, обладающие водородными связями, от прочих, у которых плотность вещества в твердом кристаллическом состоянии всегда выше, чем плотность его расплава. При переходе жидкости в твердое состояние, молекулы большинства веществ в обычном состоянии располагаются теснее, а само вещество становится плотнее. Однако, это совсем не так у воды. Охлаждая воду, можно наблюдать за поведением ее плотности (см. рис. 5-2-а). В начале плотность ведет себя обычным образом: вода при охлаждении становится все плотнее и плотнее. После охлаждения ее до температуры 4° С она, вопреки общим представлениям, становится легче, а замерзая и образуя лед, - еще легче.

Вода представляет собой гидрид кислорода. Сравним ее свойства со свойствами гидридов элементов, входящих так же как кислород в шестую группу таблицы Менделеева. Данные по температурам плавления и кипения этих гидридов приведены в таблице 5.2. В четвертой строке таблицы указаны примерные величины температур плавления и кипения воды, если бы она была обычным гидридом, и не обладала бы водородными связями. Оценка получена в предположении об обратной зависимости температур плавления и кипения от величины молекулярного веса. Эта зависимость достаточно четко прослеживается для гидридов первых трех столбцов таблицы. Из таблиц 5.1 и 5.2 видно, насколько наличие водородных связей меняет не только плотность упаковки вещества, но и его термодинамические характеристики: Наличие водородных связей в веществе, в нашем случае в воде, приводит к повышению его температуры плавления примерно на 95, а температуры кипения, на 170 градусов. Если бы вода не обладала способностью к образованию водородных связей, то в нормальных условиях она находилась бы только в газообразном состоянии и превращалась в жидкость при температуре порядка -70 °С.

Природа аномального поведения воды была предметом исследований более 200 лет тому назад Г. Кавендиша и А. Лавуазье. Они заложили основы современного понимания природы воды. В 1910 г. физики, американец П. Бриджмен и немец Г. Тамман, обнаружили, что лед может образовывать несколько полиморфных кристаллических модификаций. Понятие о водородных связях было впервые введено в 1920 г. американскими учеными У. Латимером и У. Родебушем. С этих пор водородные связи являются предметом фундаментальных исследований. Английский ученый У. Брэгг, разработавший рентгеноструктурный метод анализа кристаллов, обнаружил, что каждая молекула Н<sub>2</sub>О во льду окружена четырьмя другими молекулами. В 1932 году ученик Брэгга проф. Д. Бернал (1934) совместно с Р. Фаулером разработали теорию молекулярной

структуры воды, основанную на интерпретации рентгенографических данных льда. В основе их теории были положены представления о воде как о трехмерной структуре с четверной координацией.

Рентгенографические исследования льда показывают, что ядра кислорода располагаются в нем так же, как атомы кремния в решетке тридимита. Структура жидкой воды, согласно Берналу и Фаулеру, напоминает структуру кварца. При этом каждая молекула  $H_2O$  окружена четырьмя ближайшими к ней молекулами. Тридимит и кварц, это два различных кристаллических состояния кремнезема  $SiO_2$ . Химический состав и молекулярные структуры их одинаковы, а плотность кварца выше примерно на 10 %. Это различие обусловлено тем, что, имея одинаковые расстояния между атомами и ближайшими молекулами (т.е. первые координационные сферы), у кварца и тридимита различаются вторые координационные сферы: 4.2 Å - у кварца и 4.5 Å – у тридимита. В последствии выяснилось, что эта аналогия не более чем образное представление воды и льда, т.к. кварцеподобных структур в жидкой воде обнаружить не удалось.

Таблица 5.2

	Гидриды:	T плавления (°C)	T кипения (°C)	Молекулярный вес:
1	$H_2 Te$	- 60	- 5	129.6
2	$H_2 Se$	- 65	- 40	81
3	$H_2 S$	- 85	- 60	34
4	$H_2 O$	- 95	- 70	18
5	$H_2 O$	0	100	18

Л. Полинг в 1952 году высказал предположение, что структура воды подобна структуре клатратных гидратов. Он предполагал, что у льда и воды, находящихся при различной температуре, количество водородных связей весьма различается. По его данным при 0° С, около 15 % водородных связей оказываются разорванными. По характеру зависимости диэлектрических свойств воды от температуры, удалось выяснить, что при 25° С в жидкой воде 67 % всех молекул  $H_2 O$  сохраняют все четыре водородные связи, 23 % - три водородные связи, 7,6 % - две связи и лишь 0,2 % полностью свободные молекулы. Английский физик Д. Ж. Попл предположил, что водородные связи вообще не рвутся, а всего лишь “изгибаются”. Перестройка структуры воды, по Поплу, происходит именно благодаря “изгибанию” водородных связей. Попл предложил рассматривать воду как ассоциат, состоящий из двух структур: обычной и плотноупакованной. Упомянем еще одно, весьма важное свойство водородных связей. Оно называется кооперативностью и означает, что образование одной водородной связи способствует возникновению рядом следующих связей. Идея кооперативности основывается на том, что для образования системы водородных связей требуется меньше энергии, чем арифметическое сложение энергий отдельных связей.

Воспользуемся хорошо известным и широко используемым методом определения термодинамических параметров вещества по скорости звука. Суть метода состоит в использовании связи скорости звука ( $v$ ) со сжимаемостью вещества:

$$b_{ad} = 1/rv^2,$$

$$b_t = b_{ad} + a^2T/rc_p, \quad (5.1)$$

где  $b_{ad}$  - адиабатическая сжимаемость;  $b_t$  - изотермическая сжимаемость;  $r$  - плотность;  $T$  - температура;  $c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении;  $a$  - термический коэффициент расширения. Эти уравнения интегрируются на основе допущения о постоянстве отношения адиабатической и изотермической сжимаемостей, что более или менее справедливо для сравнительно невысоких давлений. Например, в работе (Киселев и др., 1993) плотность и теплоемкость воды были определены вплоть до давлений 7 000 атм. в диапазоне изменения температуры от 20° до 80° С. Здесь же получены точные уравнения

для определения термодинамических свойств газообразных и конденсированных сред по измерениям скорости звука. Показано, что с ростом давления плотность воды линейно возрастает, а теплоемкость - уменьшается. Авторы гарантируют корректность метода и стабильность результатов расчета термодинамических характеристик воды. Возникает естественное желание воспользоваться этими результатами для оценки параметров воды при мегабарных давлениях. По-видимому, для того, чтобы аппроксимировать ход увеличения плотности воды к таким величинам давления и получить точное значение плотности, достаточных оснований нет. Тем не менее, для грубой оценки, если использовать результаты этой работы, то плотность воды при давлении в миллион атмосфер должна быть порядка  $10 \text{ г/см}^3$ , что примерно соответствует величине плотности вещества Земли на соответствующей этому давлению глубине. В дальнейшем, для оценки параметров структуры вещества Земли, будем использовать величину скорости звука (сейсмических волн) и принятые в моделях Земли величины плотности.

*Скорость звука, плотность и структура вещества мантии.* Используем метод оценки величины сжимаемости ( $b$ ), разработанный для ионных кристаллов (Михайлов и др., 1964). Величина сжимаемости:

$$b = 18R^4/(n - 1) e^2 A. \quad (5.2)$$

Обычно это выражение используется для вычисления не сжимаемости, которая известна из эксперимента, а величины  $n$ , где  $n$  - показатель степени потенциала взаимодействия, для кристаллов; величина  $n$  порядка 10 (Михайлов и др., 1964). Здесь  $e$  - заряд электрона,  $R$  - расстояние между ближайшими атомами кристалла, а величина  $A$  - постоянная Маделунга. Эта формула позволяет оценить величину  $R$  по известному распределению скорости звука (скорости Р-волны) в мантии. Однако прежде следует несколько слов сказать о том, что представляет собой величина  $A$ .

Межатомное взаимодействие обусловлено перекрытием электронных оболочек соседних атомов, которое может быть записано в форме Борна-Майера:  $C \exp(-R/b)$ , ( $C$  и  $b$  - эмпирические константы) плюс вклад потенциальной энергии  $e^2/R$  кулоновского взаимодействия. Величина  $e^2/R$  может быть представлена как энергия Маделунга (Анималу, 1981)  $\Phi_{M(R)}$ :

$$\Phi_{M(R)} = - N A e^2/R.$$

Здесь  $N$  - плотность атомов (ионов) в кристалле. Сумма Маделунга одномерного ионного кристалла, состоящего из цепочки  $2N$  ионов с чередующимся зарядом  $\pm q$ , характеризуется взаимодействием вида:

$$\begin{aligned} & (C/x^n - q/x) \text{ - для ближних соседей,} \\ j \ (x_{ij}) \ \left\{ \right. & \\ & \quad \pm (q^2/xr_{ij}) \text{ - для остальных случаев,} \end{aligned} \quad (5.3)$$

$C$  - константа,  $n$  - целое число,  $xr_{ij}$  - расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м атомами,  $x$  - расстояние между ближайшими соседями. Постоянная Маделунга:

$$A/x = \sum (\pm 1)/xr_{ij} = 2(1/x - 1/2x + 1/3x - 1/4x + \dots), \quad (5.4)$$

или:

$$A/x = (2/x) \ln(1+y), \text{ при } y = 1, A = 2 \ln 2. \quad (5.5)$$

Например, для NaCl сжимаемость  $b = 3.3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$ ,  $A = 1.75$ ,  $R = 2.81 \text{ \AA}$ ,  $n = 9.1$ .

Однозначно оценить величину  $R$  по данным о сжимаемости (воспользовавшись распределением скоростей Р-волн по глубине мантии) не представляется возможным, однако можно оценить сочетание  $R^4/(n - 1)A$ . Данные по  $R$  можно получить из кривой распределения плотности по глубине мантии, полагая, что химический состав ее на глубине от 700 до 2900 км (в зоне т.н. континуума) постоянен. Положим, что мантия состоит из  $\text{SiO}_2$  (что, очевидно, не совсем верно), тогда величина  $R$  (в  $\text{Å}$ ) может быть оценена по формуле:

$$R \gg (100/r)^{1/3}, \quad (5.6)$$

где  $r$  - плотность вещества мантии (в  $\text{г/см}^3$ ). (Цифра 100 - результат умножения молекулярного веса  $\text{SiO}_2$  (60) на массу протона  $m = 1,6 \cdot 10^{-24}$  г). Эта зависимость изображена на рис. 5-1-в. Параметр  $(n-1)A$  незначительно (примерно на 1/3) меняется по глубине (от 100 до 2900 км), что говорит о некоторой, весьма незначительной перестройке ионной кристаллической структуры вещества мантии.

Оценки показывают, что расстояние  $R$  между ближайшими атомами (ионами) в кристаллической структуре вещества мантии меняется от, примерно,  $3 \text{ \AA}$  на глубине 100 км до  $2,6 \text{ \AA}$  - на глубине 2900 км. Здесь мы не учитываем изменений структуры, плотности и, соответственно, величины  $R$  в области фазовых переходов происходящих на глубинах 400 и 670 км. Нас интересует область т.н. континуума, в которой наблюдается плавное изменение скоростей звука (P- и S-волн) и плотности в наиболее глубоких слоях мантии. Можно ли получить требуемое по модели изменение величины  $R$  для  $\text{SiO}_2$ ? Оказывается можно. Выше мы отмечали, что параметр H/Si меняется от величины 0,2 - 0,3 на глубине 2900 км до 0,001 - на глубине 100 км (рис. 5-1-в). Температура вещества мантии на этом расстоянии изменяется примерно в 3 раза (от 2 000 К до 6 000 К). Удельная энергия так же меняется примерно в 3 раза (от 40 до 120 ккал/моль). Как следует из табл. 5.1 (3-я строчка), величина  $R$  за счет водородных связей может уменьшиться в два раза. Для ориентировочных расчетов примем, что наличие водородной связи уменьшает величину  $R$  от ее начального значения  $R_0 = 3 \text{ \AA}$  вдвое. Приняв эти условия, не возникает проблем в подборе такой концентрации H/Si, чтобы изменение величины плотности вещества мантии соответствовало принятой модели Земли. Наша ориентировочная оценка H/Si = 0,2 - 0,3 на глубине 2900 км примерно подтверждается (H/Si = 0,3) расчетами концентрации водорода при подгонке необходимой величины плотности. Относительная концентрация водорода оценивалась по формуле:

$$\text{H/Si} = 1 - (R/R_0)^3. \quad (5.7)$$

В последнее время наибольший интерес у исследователей, занимающихся изучением особенностей строения мантии, вызывает D''-слой. Это слой толщиной примерно 300 км располагается на границе мантии с внешним ядром. Сравнительно недавно было обнаружено (Wysession, 1995), что скорость S-волн на внешней (относительно ядра) границе этого слоя резко возрастает от 7,1 до 7,3 км/с. Согласно мнению большинства исследователей, D''-слой является тем местом, где происходит генерация плюмов (Courtillot and Besse, 1987). Почему это происходит, каков механизм процессов, происходящих в D''-слое? Эти и другие, подобные вопросы, - остаются пока не выясненными.

Не будем сомневаться в том, что модель горячей Земли внутренне непротиворечива и самосогласованна. Тогда мы должны в самой модели найти естественные и очевидные ответы на подобные вопросы. Согласно модели, в области границы ядро-мантия реализуется фазовый переход первого рода "кристаллизация-плавление". В принципе, здесь вещество может, как кристаллизироваться из расплава ядра при соответствующих  $pT$ -условиях, так и плавиться при их изменении. Обратим внимание на то, что плотность расплава примерно на  $4 \text{ г/см}^3$  больше, чем плотность вещества в кристаллическом состоянии. Как мы отмечали, наличие водородных связей (концентрация H/Si) играет решающую роль в нашей модели. Следовательно, увеличение плотности расплава относительно кристаллического состояния вещества, либо обязано увеличению концентрации H/Si, либо "изгибанию" водородных связей, как это предлагал Попл. Если  $pT$ -условия соответствуют преимуществу процессов плавления (и сжатия Земли) над процессами кристаллизации и в области фазового перехода (на границе ядро-мантия) имеется необходимая концентрация H/Si, - плавление реализуется. Если необходимой концентрации H/Si нет, то избыток тепла может пойти на нагрев близлежащего слоя мантии - D''-слоя. Вещество D''-слоя при этом перегревается, становится легче вещества вышележащего слоя и "всплывает".

Сделаем еще одно замечание по поводу вещества D''-слоя. В процессе реализации фазового перехода “кристаллизация-плавление” вещество, если не принимать специальных мер, затвердевает в стеклообразном, метастабильном состоянии. Если создаются необходимые условия, то впоследствии стекло кристаллизуется. Вещество в стеклообразном состоянии (состоянии переохлажденной жидкости) легче (это относится к воде и веществам с водородными связями), чем жидкость (расплав) и кристаллическое состояние. Возможно, именно то обстоятельство, что в D''-слое вещество мантии находится в метастабильном стеклообразном состоянии, приводит к увеличению скорости S-волн на границе его с кристаллическим D'-слоем. Метастабильное вещество D''-слоя легко перегревается при незначительных изменениях pT-условий и способно к образованию т.н. плюмов.

Насколько нова идея о роли водорода в веществе мантии? Насколько она неправдоподобна? Ничего подобного, подобные идеи неоднократно высказывались авторами ранее. Так, например, авторы (Feldman et al., 1998) обнаружили, что в породах лунного грунта, взятого из окрестностей географических полюсов Луны, избыток водорода не образует льда, а входит в состав гидроксильных групп, предположительно радиационного происхождения. В работе (Mattern et al., 1976) экспериментально изучалось воздействие на окись кремния ядер водорода с энергией от нескольких кэВ до единиц МэВ. При таком воздействии атомы кислорода в SiO<sub>2</sub> оказывались связанными с гидроксильными группами ОН (или ОН). Эти группы не соответствуют никакому химическому соединению гидроксила. Они представляют собой одиночные группы, неупорядоченно расположенные в оксиде-матрице. Наличие гидроксильных групп в SiO<sub>2</sub> и их концентрация определялась по поглощению инфракрасного излучения в диапазоне около 3 микрон. Примеры можно продолжить, все они показывают, что наша постановка проблемы не столь необычна, как это могло показаться.

*Внешнее ядро.* Внешнее ядро жидкое и конвективное, поэтому структура его вещества, по всей видимости, должна быть более или менее равномерной и однородной по глубине. Известно, что скорость звука и плотность вещества ядра более или менее равномерно увеличиваются по глубине. Как мы отмечали выше, могут быть две причины повышения плотности жидкости (расплава) с повышением давления. Это, либо увеличение концентрации водородных связей, либо их “изгибание”. Возможно, вторая причина, так же как и первая, имеет место в нашем случае. Тем не менее, рассматривать ее не будем, так как идея Попла не нашла удовлетворительной теоретической проработки. Таким образом, остановимся на первой идее. Конвекция вещества внешнего ядра, казалось бы, должна основательно его “перемешать” и уравнять по глубине концентрацию Н/Si. Однако если внутреннее ядро является источником водорода, постоянно “подпитывающим” другие оболочки Земли, то вдоль радиуса внешнего ядра возникает градиент концентрации Н/Si и концентрации водородных связей. В этом плане, вещество внешнего ядра можно рассматривать как двухструктурную жидкость, состоящую из “обычной” компоненты и компоненты переуплотненного вещества. Изотермическая сжимаемость такой жидкости равна (Михайлов и др., 1964):

$$b_t = (V_2/V) b_2 + (V_1 b_1 - V_2 b_2) k_1 / V + (\Delta V^2 / VRT) k_1 (1 - k_1). \quad (5.8)$$

Первые два члена этого уравнения представляют упругую часть сжимаемости жидкости, последний член - структурную сжимаемость, связанную с перестройкой жидкости при изменении давления. Здесь  $k_1$  - концентрация обычной компоненты,  $V = k_1 V + k_2 V$ ,  $b_1$  и  $b_2$  - сжимаемости первой (обычной) и второй (переуплотненной) фаз. Уравнение описывает зависимость сжимаемости от температуры. Увеличение температуры приводит к увеличению межмолекулярных расстояний, что ведет к увеличению  $b$ . Увеличение относительного числа молекул во второй структуре, которая более упакована, чем первая ( $b_1 > b_2$ ), приводит к уменьшению  $b$ . С температурой уменьшается структурная часть



сжимаемости, что ведет к уменьшению  $b$ . Эти рассуждения носят качественный характер и не претендуют на количественные оценки.

К качественным оценкам можно отнести так же использование для жидкости (и расплава) т.н. правила Рао. Согласно этому правилу (Михайлов и др., 1964), отношение температурного коэффициента скорости звука в жидкостях к температурному коэффициенту объемного расширения, остается постоянным и равным примерно трем. Отсюда следует соотношение Рао:  $v^{1/3}(m/r) = Ra$ , здесь  $v$  - скорость звука,  $m$  и  $r$  - молекулярный вес и плотность жидкости. Плотности и скорости звука в веществе внешнего ядра известны. Это позволяет оценить изменение величины  $m$  по глубине, если наша жидкость подчиняется правилу Рао. Согласно этому правилу, величина  $m$  должна возрастать по мере приближения к границе внутреннего ядра. Обратим внимание на то, что при увеличении  $m$  должна уменьшаться концентрация H/Si (см. рис 5-1-в), т.к., в определенном смысле,  $m \sim 1/(H/Si)$ . Поэтому, даже если расплавленное состояние внешнего ядра подчиняется правилу Рао, оценить изменение величины  $m$  по нему нельзя, т.к. значительно больший вклад в это значение дает внешняя концентрация H/Si, которая подбирается таким образом, чтобы плотность и скорость звука соответствовали величинам, наблюдаемым экспериментально. По-видимому, эта ситуация аналогична воде, у которой на границе кристалл-расплав концентрация водородных связей резко возрастает. Среднее расстояние между атомами на этой границе уменьшается от 2,6 Å до 2,2 Å, концентрация H/Si возрастает от 0,3 до 0,5, а молекулярный вес уменьшается от 21 до 17. Тенденция увеличения H/Si сохраняется вплоть до границы внутреннего ядра.

*Внутреннее ядро и F-слой.* Скорость звука во внутреннем ядре, в отличие от других земных оболочек, практически постоянна на всей длине его радиуса и равна 11,2 км/с. (Это свойство внутреннего ядра нигде в литературе специально не обсуждалось, хотя явно его достойно). Несмотря на то, что внутреннее ядро было обнаружено И. Леманн еще 60 лет тому назад (Lehman, 1936), его свойства (плотность, добротность и пр.) до сих пор обсуждаются в научной литературе. Дело в том, что оценки термодинамических и структурных параметров вещества внутреннего ядра далеко не однозначны. Принято считать, что внутреннее ядро представляет собой кристаллическое железо. Этот вопрос подробно обсуждался в Главе III, где было показано, что железо не может быть основным и единственным компонентом внутреннего ядра. Согласно нашей модели горячей Земли, внутреннее ядро «заполнено» горячим, пересжатым газом (пылевой кристаллической плазмой). В Главе III приводится оценка сжимаемости кристаллической плазмы, сжатой мегабарным давлением. Плотность вещества внутреннего ядра (в пределе) могла бы достигать на ранних этапах эволюции 35 г/см<sup>3</sup>. Реально плотность, по-видимому, меньше. В свое время Буллен оценил плотность вещества внутреннего ядра примерно в 20 г/см<sup>3</sup> (т.н. модель “В”). Как показали недавние исследования, рассчитанная величина добротности внутреннего ядра равна измеренной (по затуханию собственных колебаний), только при условии использования при расчетах модели “В” (Giardini et al., 1988).

Выше мы оценивали величину  $m$  ( $m \approx 10$ ) по величине скорости звука во внутреннем ядре. Вещество внутреннего ядра, согласно нашей модели, сжато внутренним давлением до такой степени, что ионы скорее напоминают кристаллическую структуру, подобную металлу, а электроны, так же как в металле, “свободны”. Ионы можно представить как твердые невзаимодействующие сферы. В этом случае, можно воспользоваться известной формулой скорости звука, рассчитанной для модели твердых невзаимодействующих сфер (Михайлов и др., 1964):

$$v = (3kT/m)^{1/2} (1 + pd/kT). \quad (5.9)$$

Здесь  $p$  - одномерное давление,  $d$  - диаметр частицы ( $d = R$ , в нашей модели),  $m$  - ее масса. Из этой формулы можно получить:

$$(\mathcal{V}/\mathcal{V}T)_p = 1/2T (3kT/m)^{1/2} (1 - pd/kT). \quad (5.10)$$

При  $pd/kT > 1$ , температурный коэффициент скорости положителен, при  $pd/kT < 1$ , - отрицателен. Скорость  $v$  остается постоянной (что и наблюдается в G-ядре) при  $(pd/kT) = 1$ . Прежде чем оценить величину  $d$  ( $R$ ), необходимо выяснить, что такое одномерное давление  $p$ . Положим, что величина  $p$ , это давление в центре Земли, деленное на площадь поверхности внутреннего ядра, тогда величина  $d$  (или,  $R$ ) равна примерно:  $R = 1,5 \text{ \AA}$ . Такое же значение  $R$  получается при оценке его по величине плотности. Концентрация H/Si во внутреннем ядре, как мы отмечали выше, порядка  $2/3$  (0,66).

### V. 3. Теория флуктуаций и концентрация элементов в земной коре.

Как известно, «... любое месторождение полезных ископаемых представляет собой исключительное природное явление, и задача геолога сводится к определению геологических и физико-химических условий, приведших к локальной концентрации минерального сырья на фоне его регионального рассеяния» (Смирнов, 1969, стр. 10). Содержание ценных компонентов в рудных месторождениях всегда больше среднего содержания их в горных породах земной коры (их кларка). Например, для свинца оно выше кларка в 600 раз ( $A = 600$ ), для молибдена и урана в 200-250 раз, для меди и золота в 100 раз, для никеля, ванадия и цинка в 50 раз, для олова в 25 раз, для железа в 8-10 раз ( $A = 10$ ) и т.д. Следовательно, месторождения полезных ископаемых представляют собой местное повышение концентрации тех или иных элементов и их природных химических соединений, на общем фоне их рассеяния в земной коре. Заметим, что общий объем полезных элементов собранных в месторождениях ничтожен по сравнению с их массами, содержащимися в земной коре.

Месторождения полезных ископаемых и их повышенная концентрация приурочены к разломам в земной коре. Более масштабный подход к этим явлениям, выявляет некоторую общность, состоящую в том, что эти разрозненные группы проявлений повышенной концентрации полезных элементов объединяются в обширные пространственные структуры. Размеры таких структур (иногда называемых «поясами») соизмеримы с земным радиусом. По всей вероятности, появление таких глобальных «поясов», это общеземное, а не какое-либо локальное, местное явление.

Создавая физически непротиворечивую модель процессов, происходивших на Земле в течение времени ее существования от момента зарождения до наших дней, необходимо учитывать следующее:

- размеры исследуемого явления говорят о его общепланетарном происхождении;
- флуктуации концентрации полезных элементов и их соединений значительно (в десятки и сотни раз) превышают их исходную концентрацию в веществе земной коры.

Добавим к этому некоторые соображения, касающиеся исходного состояния вещества планеты. Как известно, в модели «холодной» Земли ее кора представляет собой слипшиеся частицы протопланетного вещества. В этом случае, флуктуации концентрации и образование протяженных поясов могут быть вызваны, по-видимому, только тем, что они получились такими в результате действия каких-то локальных механизмов аккреции. Такой подход к проблеме в принципе возможен, однако он, на наш взгляд, не поддается исследованию и анализу, и, с точки зрения физики, - просто не интересен. Эта задача выглядит значительно более перспективной в том случае, когда Земля находилась на начальном этапе своей эволюции в газообразном состоянии. Поясним, что лишь в этом случае оказывается возможным протекание процессов, общих для всей Земли и приводящих к локальному изменению концентрации тех или иных химических элементов и их соединений. В физике подобные процессы рассматриваются с позиций хорошо развитой теории флуктуаций. Будем следовать теории флуктуаций, изложенной в книге М.А. Леонтовича (1983).

*Модель.* Рассмотрим вещество, которое может представлять собой идеальный газ или раствор, содержащий молекулы или взвешенные коллоидные частицы, занимающее объем

$V$  и содержащее  $N$  частиц. Выделим внутри него некоторый объем  $V_o$ . Найдем средний квадрат отклонения числа частиц  $n$  находящихся в объеме  $V_o$  от его среднего значения  $\bar{n}$  и вероятность того, что число частиц в этом объеме равно  $n$ .

Вероятность того, что некоторая частица находится внутри объема  $V_o$ , равна  $p = V_o/V$ . Среднее число частиц в объеме  $V_o$  равно  $\bar{n} = Np$ . Среднее квадратичное отклонение, согласно Леонтовичу:

$$(n - \bar{n})^2 = \bar{n} (1 - p). \quad (5.13)$$

Если вероятность  $p = V_o/V$  очень мала и ею можно пренебречь по сравнению с единицей (если объем  $V_o$  очень мал по сравнению с  $V$ ), то формула обращается в:

$$(n - \bar{n})^2 = \bar{n}. \quad (5.14)$$

Эта формула играет основную роль в теории явлений, связанных с флуктуациями.

Квадрат относительного отклонения числа частиц от среднего:

$$K^2 = (n - \bar{n})^2 / (\bar{n})^2 = 1/n = 1/N_1 V_o, \quad (5.15)$$

где  $N_1$  – среднее число частиц в единице объема (концентрация частиц).

*Данные.* Согласно теории флуктуаций, относительные отклонения концентрации уменьшаются с увеличением объема  $V_n$  и концентрации частиц  $N$ . Положим, что  $V_n$  это объем земной коры,  $V_n = \text{const}$ , тогда зависимость  $K^2 \sim 1/N$  показывает, что в системе имеют (или имели раньше) место флуктуации. Выше мы отмечали, что концентрация полезных элементов в породах рудных месторождений тем выше, чем ниже его кларковое содержание. Рисунок 5-3 показывает отношение концентрации некоторых химических элементов  $N$  солнечного вещества к относительной концентрации их  $K$  в земной коре (в log-log координатах). Видно, что для некоторых элементов, таких как, например, Pb, Mo, Cu, Ni, можно записать:  $K^2 \sim N^D$ , где  $D < 1$  ( $D \approx 2/5$ ). Железо и олово не попадают в эту зависимость, однако, если учесть, что мы использовали данные по  $N$  солнечного вещества, а в земных гранитах относительная концентрация железа примерно в 3-4 раза меньше, чем на Солнце, хондритах и базальтах, то и железо «оказывается на этой прямой». Вероятно, можно найти причину, по которой и Sn окажется в общей зависимости с другими элементами. Эти факты служат иллюстрацией того, что распределение полезных элементов в земной коре имеет флуктуационный характер.

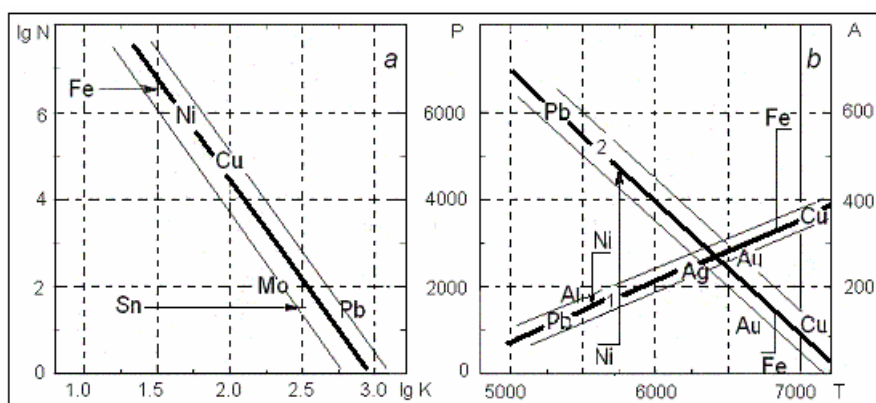


Рис. 5-3. Связь концентрации химических элементов в земной коре  $K$  с концентрацией  $N$  их на Солнце (Смирнов, 1969) – *a*. Критические параметры элементов  $T_{кр}$  и  $P_{кр}$  (1) и  $A$  (2) для тех же элементов – *b*.

*Обсуждение.* Естественно поставить вопрос, от чего зависят флуктуации данного параметра, можно ли говорить о свойствах системы, зная флуктуацию ее параметров? Ответ на эти вопросы был дан в работах Смолуховского и Эйнштейна, которые предложили использовать так называемый принцип Больцмана, связывающий отношение вероятностей двух каких-нибудь неравновесных состояний изотермической системы с

разностью их свободных энергий (или энтропий – для энергетически замкнутой системы).

Как известно, средний квадрат флуктуации объема выделенной массы сжатого (не идеального) газа или жидкости определяется выражением (Леонтович, 1983, стр.271):

$$V^2 = (V - \bar{V})^2 = kT V_o / (-v_o \cdot \partial p / \partial v). \quad (5.16)$$

Средний квадрат флуктуации концентрации, так же как флуктуации объема, пропорционален изотермической сжимаемости –  $1/v_o \cdot \partial v / \partial p$ :

$$(\Delta \bar{n})^2 = (n^2/v) \cdot kT / (-\partial p / \partial v). \quad (5.17)$$

Эта формула показывает, что средний квадрат флуктуации концентрации зависит как от начальной концентрации, так и от изотермической сжимаемости и температуры. Она позволяет оценить термодинамические характеристики системы, если известны её параметры флуктуации. Так как в интересующем нас случае:  $K^2 = (\Delta \bar{n})^2 / n^2 \gg 1$ , а сжимаемость большинства физических тел (в том числе и расплавов горных пород) известна (по крайней мере, по порядку величин), то возникает возможность оценить температуру, при которой, в заданном объеме вещества, могут возникнуть такие большие флуктуации плотности. Оказывается, что для их возникновения «разумной» величины температуры, например температуры плавления металла, явно недостаточно.

Известно, что флуктуации объема, плотности и концентрации становятся очень большими при приближении к критической точке данного вещества (или его компонента), так как при этом  $\partial p / \partial v$  стремится к нулю. Это явление носит название фазового перехода второго рода (ФП-2) «критическая точка равновесия жидкость-пар» (Паташинский, Покровский, 1982). В частности, наличие в системе ФП-2 объясняет очень сильное рассеяние света веществом, находящимся в состоянии, близком к критическому. Это, так называемая, «критическая опалесценция». Для нашей модели это означает, что если образование месторождений имеет флуктуационный характер, то они могли бы возникнуть только при температуре вещества земной коры, приближающейся к критической. По порядку величины, это тысячи градусов, например, критические температуры  $T_{кр}$  и давления  $P_{кр}$  (бар) для некоторых элементов: Pb = 5395 К, 1065 бар; Al = 5445 К, 1920 бар; Cu = 7010 К, 3545 бар и т.д. (рис. 5-3-b) (Кузнецов, 1985; Басин, 2002). В этих работах приведены критические давления, объемы и энтропии ряда химических элементов. Можно считать, что  $T_{кр}$  интересующих нас химических элементов, по порядку величины, около 10 000 К.

*Возможный механизм.* Физику расслоения растворов можно рассмотреть в качестве примера физического механизма, приводящего к образованию вещества с повышенной концентрацией некоторых элементов. Допустим, что исследуемое нами вещество представляет собой раствор полезных элементов в матрице. Нас будут интересовать условия, при которых полезные элементы не смешиваются с матрицей. Оказывается, что при заданном давлении, в ряде случаев имеется две температуры, выше которой ( $T_1$ ) и ниже другой ( $T_2$ ) раствор смешивается. В интервале температур:  $T_2 < T < T_1$  – часть раствора расслаивается. Температура  $T_1$  близка к критической температуре смешения веществ. Возможно, что вблизи нее (как и при критической температуре индивидуального вещества, где  $\partial p / \partial v = 0$ ), в смеси веществ самопроизвольно возникают волны сжатия и разрежения и оно распадается на жидкость и пар. Температура  $T_1$  называется в физике растворов верхней критической температурой смешения. В некоторых растворах возникает и нижняя температура смешения  $T_2$ . Ее появление вызвано ослаблением притяжения молекул (атомов) растворенного вещества вследствие «экранирующего» воздействия растворителя при понижении температуры (Веденов, 1984).

Рассмотрим задачу, в которой флуктуация концентрации меняется в пространстве. Задача сводится к оценке вероятности распределения флуктуаций в пространстве, или иначе, сводится к вопросу о вероятности того или иного вида функции, дающей зависимость рассматриваемой величины от координат. Теория флуктуаций, как правило,

имеет дело с флуктуациями статистически независимыми. Однако в нашей задаче имеется несомненная взаимная зависимость функций (в нашем примере, - это локальные месторождения, объединенные в общую геологическую структуру). Теория флуктуаций, развитая в работах Смолуховского и Эйнштейна, не годится для жидкости в состоянии, близком к критическому. Орнштейн и Цернике обобщили теорию таким образом, чтобы она была справедлива и для критического состояния. При этом они отказались от прежнего допущения о статистической независимости флуктуаций в разных объемах жидкости и допустили, что между этими флуктуациями имеется статистическая зависимость. Она убывает вместе с увеличением расстояния между отдельными флуктуациями, так что флуктуации в удаленных объемах оказываются между собой статистически независимыми.

Связь между флуктуациями в объеме жидкости при критической температуре обуславливается силами межмолекулярного взаимодействия, однако, она может действовать на расстояниях, значительно превышающих радиус взаимодействия. Это может происходить потому, что сжимаемость вещества вблизи критической точки очень велика и уже малые силы могут вызывать значительные изменения, как плотности вещества, так и концентрации входящих в него элементов. Статистическую связь флуктуаций и ее зависимость от величин пространственных размеров можно характеризовать некоторым расстоянием:

$$R = r - r'. \quad (5.18)$$

Из теории Орнштейна и Цернике следует определение функции вероятности  $p_R$ :

$$p_R = (kT/4\pi s^2) \times (e^{-cR/R}),$$

$$c^2 = [(-v' \cdot \rho/\rho) \cdot s^2]^{-1}, \quad (5.19)$$

где  $s$  - некоторая постоянная, тем большая, чем на большие расстояния простирается связь между флуктуациями.

Рассмотрим в качестве примера флуктуации поверхности жидкости, возникающие как тепловые движения в поле силы тяжести. Леонтович показывает, что функция  $p_R$  дает воронкообразную форму поверхности жидкости в том случае, когда в точке  $(x, y)$  действует сосредоточенная вертикальная сила, равная  $kT$ . Функция  $s$  оказывается (в этом примере) зависящей от силы тяжести и величины поверхностного натяжения жидкости.

Для отыскания функции  $p_R$ , характеризующей узкую протяженную область, такую как «пояс», действия силы тяжести и высокой температуры оказывается недостаточно. Этой «недостающей» силой может оказаться вращение Земли и возникающая при этом сила Кориолиса. Действительно, можно представить себе некоторую модель, в которой глобальные разломы, горные пояса и другие крупные геологические структуры, образовались не без участия вращения Земли (Стовас, 1975). В этом случае, возможно, оценка вида функции  $p_R$  покажет наблюдаемые геологами «пояса».

### V. 3. Проблема гранитов и базальтов.

*Постановка задачи.* Известные всем граниты по-своему уникальны и даже загадочны. Граниты обнаружены только на Земле и, возможно, на Венере. Если земные базальты ничем не отличаются от базальтов лунных, то граниты, в этом смысле, «неповторимы». (Мы используем обобщенные понятия «гранитов» и «базальтов», имея в виду не столько их минералогические различия, сколько различия в их химическом составе). Информация об обнаружении «гранитов» на Венере следует из результатов анализа грунта, полученных автоматической станцией «Венера-8», аппаратура которой зарегистрировала повышенное содержание калия, урана и тория, характерное для гранитов. Остальные аналогичные станции «Венера» также определяли наличие этих элементов, но уже в концентрациях, более близких к базальтам (Ксанфомалити, 1985).

Сходство и различия тектономагматического развития Земли и Луны изучали Шарков и Богатилов (1999). Они показали, что главная особенность Луны, это её близость к палеопротерозойской (кратонной) стадии развития Земли. На Луне полностью

отсутствуют гранитоиды. Древнейший (4.45-4.25 млрд. лет) магматизм материков Луны близок к земной палеопротерозойской стадии. Вторая стадия развития Луны 3.8-3.2 млрд. лет тому назад, характеризуется генерацией морских базальтов, аналогичных базальтам срединно-океанических хребтов Земли. Различия в эволюции Земли и Луны авторы связывают с «различными энергетическими возможностями этих планетных тел» (стр. 415). По этому поводу американский геолог астронавт Р. Шмитт заметил: «Луна - это запыленное окно в прошлое Земли».

Граниты встречаются исключительно на континентах. Обнаруженные в Тихом океане небольшие “островки” гранитов были, по всей видимости, оторваны от материков и “транспортированы” при спрединге и разрастании океанов. Уникально соотношение химических элементов в “граните”. Если в “базальте” процентный состав породообразующих элементов повторяет состав хондритов и состав тяжелых элементов в атмосфере Солнца, то “граниты” заметно обеднены тяжелыми элементами: железом и магнием. С другой стороны, в “гранитах” значительно больше радиоактивных элементов: урана, тория и калия.

Проблема “базальт-гранит” давно, и не без основания, занимает геологов. Принято считать, что образование гранитов связано с направленным метаморфизмом, в результате действия которого произошло вымывание “лишних” и привнесение “дополнительных” химических элементов. В результате из первоначальной “базальтовой” оболочки получилась “гранитная” кора. Заметная роль в этом процессе отводится воде, магматическим процессам и “продувке” коры флюидами. Возможно, эта модель верна, но как могли образоваться “граниты” на Венере, где воды не было, или почему их нет на Луне, где магматические процессы “налицо”? Почему в настоящее время, когда на Земле полно и базальтов, и воды, не находят следов современной “гранитизации”? Вопросов можно задать еще очень много. Действительно, на каждый из них имеется ответ. Все ответы базируются на модели холодной Земли, однако, связать ответы в какую-либо правдоподобную концепцию не удастся. Тем не менее, не будем критиковать эту модель. Наша задача состоит в том, чтобы найти ответы, естественным образом следующие из модели горячей Земли. Можно ли получить “гранитизацию” первичного вещества базальтового состава на раннем этапе эволюции Земли? Попытаемся ответить на этот вопрос.

*Гипотеза “гранитизации”.* Воспользуемся известными данными по составу базальтов и гранитов. В Таблице 5.3 приведены относительные концентрации атомов в составе Солнца. За единицу принята концентрация водорода  $N = 10^{12}$  частиц. В таблице 5.4 приведены осредненные данные по химическому составу гранитов и базальтов. В таблице 5.5 - тоже для элементного состава.

Таблица 5.3

	H	He	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
lg N	12.0	11.7	8.72	8.96	6.3	7.4	6.2	7.5	7.3	4.7	6.1	6.6

Таблица 5.4

	Si O <sub>2</sub>	Ti O <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe O	Mn O	Mg O	Ca O	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Базальт	48.0 %	3.0	12.0	2.0	8.0	0.1	14.0	10.0	2.0	0.3
Гранит	73.0 %	0.5	13.0	1.3	1.6	0.04	0.6	2.2	3.6	3.7

Таблица 5.5

	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K
Базальт	18 %	6.1	8.0	16	3.5	1.5	0.25
Гранит	33 %	8.6	2.5	0.5	1.2	2.5	3.55

На рис. 5-4 схематически изображена диаграмма, показывающая каким образом, взяв две части вещества с химическим составом, эквивалентным базальту, и “отняв” от этого вещества некоторую часть элементов определенной концентрации, можно получить другое вещество, по составу эквивалентное “граниту”. (Химические составы “базальта” и “гранита” нормированы таким образом, чтобы количество кремния было одинаковым в обоих составах). Если в процессе образования гранитной коры в нашей модели можно найти непротиворечивые механизмы, позволяющие обеспечить “потерю” этих элементов, проблема преобразования базальта в гранит (т.е. гранитизация базальта) может оказаться близкой к решению. Естественно, эта задача решается в контексте модели горячей Земли на той её стадии, когда все вещество планеты, включая ее самые верхние слои, было очень горячим. Эта система была открытой для того, чтобы химические элементы и их соединения, обладающие наибольшей летучестью, были способны покинуть Землю, т.е. диссипировать. Как следует из модели образования планет, только Земля и Венера были, с одной стороны, достаточно “разогреты” для осуществления этого процесса, а, с другой, они были слишком малы (по сравнению с “большими” планетами) для того, чтобы удержать своим гравитационным полем летучие элементы и их соединения. На таких планетах как Марс и Меркурий их вещество на поверхности планет никогда не нагревалось до температуры выше температуры плавления. Поэтому рассматриваемых явлений там происходить не могло. Следовательно, на этих планетах не может быть (по нашей модели) и гранитов.

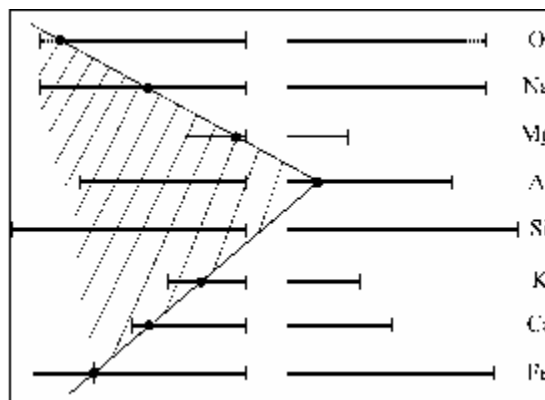


Рис. 5-4 Диаграмма гранитизации: получение гранита (заштрихованная часть) из двух исходных частей базальта.

До тех пор, пока вещество, из которого впоследствии образовалась земная кора, находилось в газообразном состоянии (“вскоре” после образования планеты) мы можем применительно к нему пользоваться формулами кинетической теории газов. Скорость диссипации определяется формулой Джинса:

$$n = n_0 \left( \frac{c^2}{6\pi} \right) \exp(-3gR/c^2) \times (1 + 3gR/c^2), \quad (5.20)$$

где  $n$  - число частиц, покидающих площадь в  $1 \text{ см}^2$  в секунду;  $n_0$  - концентрация частиц ( $\text{см}^{-3}$ );  $g$  - ускорение силы тяжести;  $R$  текущее значение земного радиуса,  $c$  - средняя квадратичная скорость частиц:

$$c^2 = 3kT/m. \quad (5.21)$$

Здесь:  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура,  $m$  - масса частицы. Так как  $m = m_0$ , где  $m_0$  - масса протона, то водород покинет Землю раньше остальных газов. Естественно, нам точно не известны величины  $g$ ,  $R$  и  $T$  во время процесса гравитационной конденсации, поэтому наши оценки носят качественный характер. По мере того, как Земля “теряла” водород в момент своего формирования в планету, диссипировали и другие элементы: кислород, азот, кремний, магний и др., так как все они, по модели горячей Земли, находились в этот момент в газообразном состоянии.

В момент остановки процесса формирования планеты, т.е. окончания гравитационной конденсации (гравитационного коллапса, самогравитации), начался период её охлаждения, сначала поверхности планеты, а потом и её внутренних оболочек. Охлаждение поверхности планеты возможно только за счет передачи тепла через излучение. При т.н. радиационном охлаждении, происходит диффузия излучения через “оптически толстое тело”, т.е. через плотную атмосферу, окружавшую Землю на самой ранней стадии её формирования.

Раннюю стадию такого процесса мы рассмотрели в третьей главе. Температура  $T_1$  отличалась от начальной  $T_0$  как:

$$T_1 = T_0 (1 - a_0 T_0^3), \quad (5.22)$$

где  $a_0$  - как и раньше, функция, зависящая от толщины слоя, через который идет диффузия излучения, времени охлаждения  $t$ , химического состава атмосферы, её плотности и т.д. Оцененная нами ранее величина  $a_0$  для интервала температур  $T_0 = 10^3$  К и ниже и периода охлаждения  $t_0 = 10^9$  лет была порядка  $a_0 = 10^{-9}$  К<sup>-3</sup>.

В интересующем нас сейчас случае:  $T_0 = 10^4$  К, а  $T_1 = 10^3$  К, коэффициент  $a_1$  оказывается равным примерно  $10^{-12}$  К<sup>-3</sup>. Если считать, что и давление и химический состав атмосферы те же, что и в рассмотренном нами ранее случае (что, по-видимому, не совсем так), то время охлаждения  $t_1$  можно оценить из пропорции:  $a_0/a_1 = t_0/t_1$ . Величина  $t_1$  оказывается порядка  $10^6$  лет. По всей видимости, эта величина может быть определена нами с точностью до порядка величины:

$$10^5 < t_1 < 10^7 \text{ лет.}$$

Зная эту величину, а так же зная величину температуропроводности вещества, можно оценить толщину обменного слоя, т.е. слоя, в котором происходят процессы охлаждения, массопереноса, где возможны процессы разделения химического состава вещества Земли. Положим величину коэффициента температуропроводности  $\zeta$  порядка  $1 \text{ см}^2/\text{с}$ , толщина обменного слоя  $d \approx (\zeta t_1)^{1/2} = 60 \text{ км}$ . Оценим величину  $d$  иначе, воспользовавшись известной барометрической формулой, осознавая, что она справедлива только для современной атмосферы. Тем не менее, упрощая барометрическую формулу, получим:

$$d \approx 2 \times 10^4 (1 + 0.003 T) \lg(p_1/p_2). \quad (5.23)$$

Подставляя:  $T = 10^4$  К и  $\lg(p_1/p_2) \approx 5$ , величина  $d$  оказывается того же порядка (50 км).

Будем считать, что в процессе гравитационного сжатия и формирования Земли как планеты, она представляла собой шар, состоящий из горячего переуплотненного ( $r \approx 35 \text{ г/см}^3$ ) вещества, окруженный достаточно плотной газовой оболочкой, толщиной примерно 50 км. Температура внешней части оболочки составляла примерно  $10^3$  К, внутренней -  $10^4$  К, плотность менялась, соответственно, от 0 до  $35 \text{ г/см}^3$ . Эта оболочка, с одной стороны, экранировала пересжатое и переуплотненное вещество Земли от тепло- и массообмена с окружающим Землю космическим пространством и, с другой, сама являлась открытой системой, в которой происходил такой обмен. Вещество оболочки охлаждалось, конденсировалось и кристаллизовалось и, в конечном счете, по нашей модели, превратилось в гранитную кору, покрывающую все материки.

Концентрация более тяжелых элементов на внутренней границе оболочки была, естественно, выше, чем на поверхности, т.е. на её внешней границе. Это обеспечило действие механизма газовой концентрационной диффузии. Тепловой поток направлен в сторону градиента концентрации, что способствовало возможности проявления механизма термодиффузии, когда тяжелые и большие по размерам атомы (молекулы) “выносились” в более холодную часть, т.е. к поверхности оболочки, откуда они могли быть потеряны за счет диссипации в космос. Все перечисленные механизмы протекали на фоне тепловой конвекции, которая ещё больше усиливала их эффективность.

Концентрационная диффузия определяла перенос частиц (атомов, молекул) от границы слоя к поверхности в соответствии с начальными концентрациями и различием в тепловых скоростях, обязанным различию в атомных весах элементов. Термодиффузия обеспечивала преимущественный перенос больших по размеру и более тяжелых частиц.



Оба этих, в принципе возможных, механизма протекали в водородной среде, причем термодиффузионное разделение эффективнее происходит тогда, когда концентрации легких частиц (водорода) и тяжелых (железо, кремний, магний и т.п.) становятся более или менее соизмеримы. Это означает, что термодиффузия будет значима в тот момент, когда Земля уже потеряла значительную долю водорода, а температура её вещества - ещё превышала критическую.

В отличие от концентрационной диффузии, скорость которой определяется величиной  $D_{12}$ , термическая диффузия характеризуется коэффициентом  $D_T$  и термодиффузионным отношением  $k_T = D_T/D_{12}$ . В свою очередь, величина  $k_T$  зависит от концентрации частиц  $n$  и термодиффузионной постоянной  $b$ :

$$k_T = b n_{10} n_{20},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  - относительные концентрации частиц первого сорта:  $n_{10} = n_1/(n_1 + n_2)$  и второго:  $n_{20} = n_2/(n_1 + n_2)$ . Перенос более “тяжелых” и больших по размеру частиц в более “холодную” область оболочки определяется формулой Грю и Иббса (1956):

$$\nabla n / \nabla r = - k_T / T \cdot \nabla T / \nabla r. \quad (5.24)$$

Из этих формул следует, что для одинаковых температурных условий и одинаковой начальной концентрации “тяжелых” частиц различного веса и размера, эффект их термодиффузионного разделения определяется коэффициентом  $b$ , который индивидуален для каждого вещества (Грю и Иббс, 1956).

Будем считать частицами первого сорта атомы водорода, второго - атомы более “тяжелых” элементов. Для качественной оценки эффекта термодиффузионного разделения и упрощая формулу для параметра  $b$ , можно получить, что  $b \sim m^{1/2} r$ , т.е. он в большей степени зависит от размера, чем от массы частиц. Воспользуемся полученным выражением и оценим насколько различен эффект термодиффузионного разделения для порообразующих элементов. Параметр  $b$  для калия оказывается выше, чем для других элементов, однако, его так мало в исходном “солнечном” веществе, а мы оговаривались, что эффекты термодиффузионного разделения эффективны при условии примерного равенства концентраций тяжелых и легких компонент, что мы вынуждены исключить калий из рассмотрения. Это обстоятельство тем более нам на пользу, так как концентрацию калия, для того, чтобы из базальта “сделать” гранит, мы должны не уменьшать, а наоборот, увеличивать.

После калия, по величине параметра  $b$ , идут: кальций, железо, натрий, магний. Термодиффузионный эффект, как мы отмечали, сильнее проявляется тогда, когда начальная концентрация разделяемых веществ - выше. Обозначим начальную концентрацию разделяемого за счет термодиффузии элемента через  $n_0$ , а оставшуюся после разделения, -  $n_1$ , “потерянную”, через  $n_2$ , тогда:  $n_2 = b n_0$ . Как отмечалось выше, нас интересует, каким образом может быть “потеряна” та “лишняя” часть вещества, без которой после естественных процессов конденсации и кристаллизации мы могли бы “получить” гранит, взяв базальт в качестве исходного вещества. Возьмем две части (в процентах) вещества базальтового состава и “отнимем” одну часть гранитового (рис. 5-4). При этом получим “остаток”, который Земля должна “потерять”, например, за счет диффузии и последующей диссипации. На рис. 5-5-а, в числителе приведена удвоенная концентрация элементов, свойственная базальтам, в знаменателе, - одна “порция” гранитов. На рис. 5-5-б изображен “остаток”, как результат вычитания концентрации элементов гранита из удвоенной концентрации базальтов. Рис. 5-5-в показывает относительную величину коэффициента  $b$ , а рис. 5-5-г - результат действия механизма термодиффузионного разделения. Сравнивая рис. 5-5-б и 5-5-г видно, что нам удалось получить гранит из двух “навесок” базальта практически на всех основных элементах кроме, пожалуй, магния и железа. Для завершения процесса “гранитизации” базальта, нам необходимо найти еще один способ, который мог бы привести к дополнительной “потере” магния и железа.

Как уже отмечалось, диффузионные процессы термического разделения происходят при вполне определенных условиях: вещество находится в газообразном состоянии, имеется различие между частицами по массе и размеру, существует температурный градиент. По нашим оценкам, такие условия могли иметь место на Земле на самой ранней стадии её формирования. Принципиальным моментом является то, что такие явления на Земле происходили одновременно со стадией формирования Солнца. Оно, по модели, поглощает газы и летучие элементы, преодолевающие гравитационное притяжение Земли. По мере остывания оболочки обменного слоя Земли, - в нем начали образовываться химические соединения. Так как процессы синтеза происходили в водородной среде, возникали преимущественно гидриды. Далее, по мере истощения водорода в обменном слое, определенную роль в синтезе летучих соединений начинали приобретать кислород и углерод (точнее, радикалы CO).

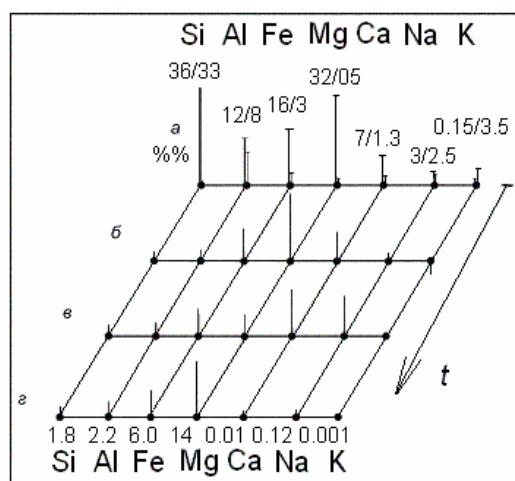


Рис. 5-5 Этапы гранитизации: начальный этап – а; удаляемые элементы и их концентрация – б; термодиффузионная постоянная – в; «остаток» – з.

Идея транспортировки химических элементов, в частности металлов, из глубин Земли с помощью присоединения к ним (или химической связи) летучих легандов не нова. В свое время такую модель развивал в ИГиГ СО РАН Р.М. Слободской (1981). Этому вопросу посвящен ряд фундаментальных исследований, проводимых в институте геологии рудных месторождений М.И. Новгородовой (1983, 1991) и Е.Ю. Буслаевой (1989). Несколько лет тому назад группа сотрудников из ИГиГ и института вулканологии (Камчатка) провели эксперимент по регистрации карбониллов железа в кальдере вулкана Узон на Камчатке (Балдин и др., 1983). По всей видимости, факт образования в Земле элементоорганических соединений с металлами и маталлоидами - беспорен. Например, сравнительно недавно был обнаружен самородный магний (Новгородова, 1991), несколько ранее - алюминий. Принято считать, что эти металлы транспортируются из недр Земли с помощью органических соединений. В принципе, подобные явления вполне могли происходить на Земле на более ранних этапах её эволюции. Для того чтобы транспортировка элементов с помощью летучих легандов могла происходить в нашей модели "гранитизации", необходимо лишь «обеспечить» необходимые для их синтеза  $pT$ -условия.

Вернемся еще раз к интересному событию - обнаружению самородного магния. Как следует из сообщения, по данным масс-спектрометрического анализа, в газовой фазе, выделенной из образца самородного магния, содержится (в объемных процентах): водород - 89.9; метан - 0.6; закись углерода - 0.3 и углекислый газ - 1.4. Кроме того, присутствует рассеянный тонкодисперсный углерод - 8.1 %, обогащенный легкими изотопами. Автор сообщения считает, что магний мигрировал в потоке флюидов углеводороды - водород.

Нельзя считать, что приведенный выше пример можно напрямую использовать для объяснения возможного пути транспортировки магния и железа с целью “удачной” “гранитизации” исходного базальта. Тем не менее, этот случай демонстрирует принципиальные возможности того, что на Земле могли проходить процессы избирательной транспортировки элементов. Можно привести и другие варианты аналогичных механизмов, в частности, путем образования летучих гидридов. Правда, не все элементы образуют гидриды, например, железо. В этом случае, транспортером железа могла бы выступить карбонильная группа, для алюминия - алкильная или этильная и т.п.

Обратим внимание на деталь, имеющую принципиальное значение в нашей модели. Речь пойдет о том, что у сопутствующего самородному магнию углерода обнаружено обогащение его легкими изотопами. Этот факт можно интерпретировать следующим образом. Предположим, что наша модель “гранитизации” реальна. Отсюда следует, что часть протокоры представляла собой открытую систему, изотопный состав элементов которой мог, и, по-видимому, обязан был измениться по сравнению с составом той части вещества, которая находилась в состоянии закрытой системы. Здесь необходимо акцентировать внимание на известном экспериментальном факте, что более легкие изотопы испаряются быстрее, чем более тяжелые. В такой открытой системе как гранитная протокора на определенном этапе эволюции Земли должны были существовать большие температурные градиенты. Это не могло не привести к термодиффузионному разделению не только элементов (что мы отмечали выше), но и к разделению их изотопов. Ранее показано, что увеличение температурного градиента в геохимической системе приводит к утяжелению отношения изотопов ртути (Кузнецов, Оболенский, 1980). Согласно нашей модели, вещество мантии Земли, не подвергшейся дифференциации, должно быть обогащено легкими изотопами. Согласно модели горячей Земли, состав вещества мантии (соответствующий базальтам) идентичен и с солнечным веществом. В этом случае, возвращаясь к обсуждению находки самородного магния, сопутствующий ему изотопно облегченный углерод должен быть мантийного происхождения. Следуя изложенной выше модели “гранитизации”, магний, входящий в состав вещества открытой системы, вообще должен был быть “потерян” на самом раннем этапе эволюции Земли.

Среди элементов, сопутствующих магнию, - такие элементы как: кремний, алюминий, железо и кальций. То есть, это те самые элементы, которые необходимо было бы “потерять” в нашей модели гранитизации базальтов. Этот факт, если не подтверждает справедливость наших предположений, то, во всяком случае, не отрицает их. Согласно нашей модели, эти элементы каким-либо способом были “транспортированы” из мантии. Этот факт является демонстрацией возможности подобной транспортировки и миграции химических элементов в Земле.

В качестве поддержки нашей модели о разделении изотопов ртути, сошлемся на работу Э.М. Галимова (1988) по результатам измерения отношения изотопов кислорода  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  в осадочной оболочке Земли. Показано, что в течение различных этапов эволюции Земли, связанных с повышением величины температурного градиента, наблюдается “потяжеление” кислорода (увеличение относительной концентрации  $^{18}\text{O}$ ). Сравнивая это отношение изотопов для океанической воды и осадочной оболочки, автор приходит к нетривиальному выводу, имеющему важное значение для нашей модели, и подтверждающему её правомерность: “Океан образовался отнюдь не сразу после завершения формирования Земли. Первые полмиллиарда лет водяная оболочка на Земле была не развита, если существовала вообще” (Галимов, 1988, стр. 981). Согласно нашей модели, земная оболочка могла остыть до температуры примерно  $100^\circ\text{C}$  около 3.8 млрд. лет тому назад.

В принципе, можно сделать оценку, аналогичную той, которую мы делали для термодиффузионного разделения элементов, и показать, что «остаток» элементов нашего вещества (изображенный на рис. 5-5) может быть «вынесен» и удален с помощью элементоорганических транспортеров. Можно, например, рассчитать коэффициент  $g$ ,

показывающий отношение давления пара летучего вещества (при заданной температуре) к давлению газа на границе обменного слоя, а дальше, аналогично предыдущему, оценить величину  $n_2 = gn_0$  и т.п. Зная ход температурных зависимостей, к примеру, карбонила железа и триэтилалюминия, можно показать, что железо будет убывать из нашего “остатка” с большей скоростью, чем алюминий и т.п. Однако, как и в случае с термодиффузией, подобные оценки носят исключительно качественный характер. Они приводятся нами только для иллюстрации того, что подобное явление в принципе возможно, а, следовательно, возможна и предлагаемая модель гранитизации первоначально “базальтоподобного” вещества. По мере дальнейшего охлаждения газообразного вещества обменного слоя, в нем начинаются процессы конденсации, а затем и кристаллизации.

*Конденсация и кристаллизация вещества обменного слоя.* Процессы конденсации первичного земного вещества рассматривались многими авторами гипотез аккреции планет из солнечной туманности. Обычно в таких случаях у авторов имелось две возможности выбрать, либо гомогенную аккрецию из равномерно перемешанной смеси веществ, либо гетерогенную, когда сначала образуется ядро из железа, а потом мантия - из силикатов. В зависимости от такого выбора, возникали те или иные проблемы, связанные с образованием ядра, природой границы между ядром и мантией, обособлением внутреннего ядра и т.п. Собственно проблемы, связанные с конденсацией, мало зависели от выбора модели. Общепринято считать, что первоначальное вещество конденсировалось в том виде и составе, в котором оно находится и в наше время. Так, например, А.Е. Рингвуд (1982), приводя данные по температурной зависимости конденсации элементов из газа солнечного состава, принимает во внимание либо простые вещества - химические элементы (Al, Ti, Ca, Si, ...), либо их окислы. Правда, есть и другие модели, несколько отличающиеся от этой. Например, Н.П. Семенов (1990), предлагая кислородно-водородную модель Земли, считает, что поначалу окисленные породы земной коры, потом были восстановлены водородом из ядра Земли.

В отличие от предыдущих моделей, согласно нашей, - процессы конденсации происходили в водородной среде и поэтому образовывались преимущественно гидриды, которые, на более поздних этапах эволюции Земли, окислялись при кислородной “продувке”. Вещество при этом находилось в конденсированном, расплавленном состоянии. Наша задача здесь состоит в том, чтобы найти физически непротиворечивые механизмы “гранитизации” вещества, изначально базальтового состава, во-первых, и, во-вторых, “обеспечить” его повышенным содержанием радиоактивных элементов. С первой задачей мы, возможно, как-то справились, однако, решения второй задачи на самой ранней стадии формирования гранитной коры Земли, когда её протовещество находилось ещё в газообразном состоянии, не находится. Нам остается поискать решения второй задачи на этапе расплавленного состояния вещества коры.

Протогранитное вещество обменного слоя Земли находилось сначала в газообразном состоянии. Затем оно конденсировалось, превращаясь в расплав, окружающий высокоплотное и горячее ядро, из которого затем выделяется мантия, внешнее и внутреннее ядро. Расплавленная “кора” находилась под очень высокими градиентами температуры и величины силы тяжести. Они оказали принципиальное значение на процессы дифференциации его вещества. В расплавленной коре могло происходить термодиффузионное разделение химических элементов в жидкости, т.н. эффект Соре (Грю, Иббс, 1956). Проявление эффекта Соре - может быть одним из возможных механизмов концентрирования таких элементов как K, U, Th. В подтверждение сказанному, приведем пример разделения элементов, описанный в этой книге. Сплав олова с медью (в других примерах, со свинцом, кадмием или цинком) помещался в кварцевую трубку и нагревался таким образом, что температура на одном конце трубки была  $360^\circ \text{C}$ , а на другом, доходила до  $900^\circ \text{C}$ . После выдержки в таком

режиме в течение 10 дней, сплав быстро охлаждался до затвердевания и состав его определялся химически. Во всех четырех сплавах было обнаружено, что олово диффундировало против направления температурного градиента, каков бы ни был начальный состав сплава, концентрация олова оказывалась на 8 - 10 % выше у горячего конца трубки. Эксперименты по термодиффузионному разделению веществ, находящихся в расплавленном состоянии показали, что чем выше температурный градиент, тем эффективнее разделение. И ещё, эффект Соре наблюдается далеко не у всех веществ. Грю и Иббс (1956), анализируя результаты экспериментов по эффекту Соре, приходят к выводу, что “объяснение даже этих общих результатов требует больше знаний о жидком состоянии, чем мы имеем в настоящее время” (стр. 152).

В принципе, можно предложить возможность экспериментальной проверки этой гипотезы (если таких экспериментов ранее не проводилось), для чего расплав гранита нужно поместить в кювету с большим температурным градиентом, выдержать большое время и убедиться концентрируются ли радиогенные элементы.

Упомянем еще один из возможных механизмов дифференциации вещества в расплавленной мантии. Это явление названо его автором академиком А.П. Виноградовым “зонной плавкой” (1962). Разделение вещества на “базальт” и “дунит” (более тяжелую фракцию) наблюдалось экспериментально: Вещество каменных метеоритов помещалось в молибденовый контейнер, который, в свою очередь, в графитовую трубку. С помощью высокочастотного генератора осуществлялся локальный нагрев образца до температуры 1500 °С, причем зона нагрева перемещалась вдоль образца. В результате легкоплавкая фаза расплава диффундировала вдоль градиента и скапливалась в одном конце контейнера. При охлаждении она застывала в виде стеклообразной базальтовой массы, по химическому составу более кислой, чем материал хондрита. Оставшаяся, более тугоплавкая масса, представляла собой оливиновую породу - дунит.

В модели горячей Земли дифференциация вещества может происходить, например, на фронте кристаллизации на границе ядро-мантия. Эта задача близка к одной из известных в математической физике задач - задаче Стефана о физике процессов, происходящих на фронте промерзания.

#### V. 4. Нефть и газ в контексте модели горячей Земли,

Проблема образования нефти и газа обсуждается среди специалистов до сих пор и, несмотря на всю свою значимость для человечества, все еще не имеет однозначного решения. Высказываются разные мнения по поводу органической и неорганической природы месторождений нефти и газа, выдвигаются и обсуждаются те или иные способы синтеза углеводородов в земных недрах, определяется роль водорода и тепла в этом процессе.

Рассмотрим модельную задачу, которая возможно имеет отношение к проблеме образования углеводородов. В любом случае, по своей постановке, эта задача находится в контексте нашей модели. Представим себе, что имеется некая газопроницаемая осадочная толща, в которой произвольным образом распределен углерод. Это может быть 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. В свою очередь, заметная прибавка подвижных частиц углеводородов к массе «продуваемого» водорода, меняют параметры массопереноса. Таким образом, образование углеводородных кластеров-фракталов приводит к прекращению процесса переноса.

Как известно, структура, включающая два взаимосвязанных механизма: дрейф и перколяцию, обладает способностью к самоорганизации (Хакен, 1980). Как известно, подобные процессы самоорганизации описываются известным уравнением Фоккера-Планка (ФП). Физический смысл решения уравнения ФП можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (энергия, площадь поверхности и т.п.), тем меньше вероятность появления этого решения ( $1/f$  фликкер-шум). В нашей задаче это означает, что должна наблюдаться линейная зависимость (в логарифмических координатах) между энергетическим параметром, характеризующим нефтяное или газовое месторождение и частотой встречаемости месторождений подобного типа. В принципе, если формирование месторождений углеводородов (УВ) происходит как процесс самоорганизации (а именно так реализуется преобладающее большинство процессов в Природе), то должна наблюдаться аналогичная зависимость. Показатель угла наклона такой прямой характеризует величину фрактальной размерности (Федер, 1991). Рядом авторов, в том числе и в этой книге, было показано, что по мере того, как система самоорганизуется все в большей и большей степени, величина фрактальной размерности убывает.

Проиллюстрируем сказанное на таком примере. В начале процесса мы имели некий объем, занятый углеродом. Топологическая размерность объема - тройка. По мере того, как происходила “прокачка” водородом, образование УВ и их диффузия в направлении “продувки”, топологическая размерность области УВ убывала, стремясь к двойке и меньше. В этом случае толщина обогащенного УВ слоя стремится к минимуму, структура становится двумерной и меньше, напоминая известный «ковёр Серпинского». Таким образом, оценивая степень фрактальности ряда месторождений, можно сказать, насколько успешной была самоорганизация в процессе их образования.

Рассмотрим решение уравнения ФП, связанное с пространственным распределением зон повышенной концентрации УВ, т.е. с пространственным распределением месторождений. Примем, что месторождения УВ возникли в процессе самоорганизации некой геологической структуры, тогда они фрактальны. Воспользуемся параметром фрактальности, аналогичным тому, что используется для облаков, т.е. отношению площади поверхности месторождений  $S$  к их периметру  $P$ :  $P = S^{D/2}$ . (Для месторождений УВ это может быть совсем другой параметр, его ещё необходимо найти, но, в любом случае, будет выполняться общее для таких структур правило: больших месторождений - мало, меньших, - больше, ещё меньших, - ещё больше и т.д.). Показатель наклона прямой в координатах  $\log\text{-}\log$  определяет величину фрактальной размерности, величина которой, в свою очередь, показывает степень самоорганизации. По-видимому, для геологов-нефтяников особый интерес приобретает проблема cutoff, т.е. проблема ограничения величины и числа крупных месторождений. В последнее время эти проблемы оказались в сфере интересов новой области физики, занимающейся проблемой самоорганизованной критичности.

Как было показано в работе (Vak et al., 1987) и серии последующих работ различных авторов, системы с большим количеством взаимодействующих элементов естественным образом эволюционируют к критическому состоянию, в котором любое малое событие может привести к катастрофе или резкой смене состояния. Это состояние системы было названо авторами состоянием самоорганизованной критичности.

Согласно этой теории, составные части системы никогда не достигают равновесия, а эволюционируют от одного метастабильного состояния к другому. Авторы демонстрируют основную идею своей теории на примере с кучей песка. Песчинки

высыпаются медленно и равномерно и всегда из одного и того же места. Песчинки образуют кучу, склон которой становится все круче, до тех пор, пока песчинки не образуют лавины. Считается, что система (куча песка) перед тем, как на неё упала последняя песчинка, находится в критическом состоянии. Песок сыплется с постоянной скоростью, а его количество меняется со временем и график этой величины представляет собой набор случайных хаотических чисел различной длительности, это фликкер-шум или шум мерцания. От белого шума он отличается тем, что система “помнит” все предыдущие сигналы.

Баком и др. (1987) было получено наиболее убедительное доказательство генерации фликкер-шума и образование самоорганизованной критичности двумерной структурой, включающей  $100 \times 100$  маятников, связанных между собой торсионными пружинами. Начальное условие состоит в том, что маятники нестабильны. Затем система почти уравнивается и достигает т.н. локально минимально стабильного (т.е. максимально чувствительного) состояния. Предположим, что мы толкнем один маятник, ослабляя силу, удерживающую его в квазистабильном состоянии. Это вызовет колебания соседних маятников и возмущение (шум) будет передаваться посредством эффекта домино. Если в конце процесса все маятники вернутся в исходное состояние, то система стабильна к малым возмущениям. Ситуация существенно отличается, если возмущение будет усиливаться при его распространении, эта конфигурация уже нестабильна к малым возмущениям. Такая система эволюционирует и в ней образуется всё больше и больше минимально стабильных состояний, которые начнут задерживать распространение шума. Система придет в стабильное состояние в том случае, когда шум не сможет распространяться сколь угодно далеко. В этой ситуации можно ожидать возникновение пространственно-инвариантной структуры минимально стабильных состояний, т.е. образования самоподобных фрактальных структур.

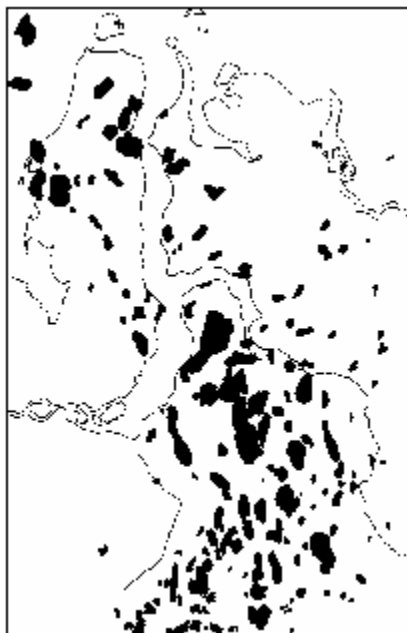


Рис. 5-6. Обзорная карта газовых и нефтяных месторождений севера Тюменской области.

Компьютерное моделирование с использованием алгоритма Бака и др. показало, что  $P$  и  $S$  образующихся кластеров соответствуют полученным из наблюдений для облаков:  $D \approx 1.33$ . Этот факт показывает, что двумерная структура будет самоорганизующейся, если она образует кластеры, периметр которых  $P$  пропорционален их площади  $S$ :  $P = S^{D/2}$ . Т.о., если реальная структура, содержащая месторождения УВ, обладает аналогичными свойствами, то это может открыть новый подход к проблеме образования УВ, как к открытой структуре, способной к самоорганизации.

Воспользуемся картой месторождений УВ расположенных на севере Тюменской области (см. рис. 5-6). 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. 5-7-а). Число месторождений от их величины в  $\log$ - $\log$  масштабе представлено на рис. 5-7-б ( $\text{tg}$  угла наклона прямой = -1.15), а на рис. 5-7-в 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. 5-7, можно отметить, что полученный результат по выявлению фрактальности структур залежей углеводородов идентичен результатам численного моделирования с алгоритмом Бака и др. по самоорганизованной критичности на двумерных решетках. По-видимому, идею аналогии между месторождениями УВ и облаками можно признать удачной. Для того чтобы оценить область «обрезания» (cutoff) по всей видимости, мала статистика, это может означать, что-либо в этой области не выявлены более мелкие месторождения, либо крупные представляют собой не самостоятельные образования, а сумму более мелких. Получившаяся у нас фрактальная размерность  $D$  для залежей УВ больше, чем для облаков. Это может означать, что самоорганизация облаков происходит более эффективно, чем УВ. Однако это может означать и то, что на карте не нанесены более подробные детали строения УВ структур.

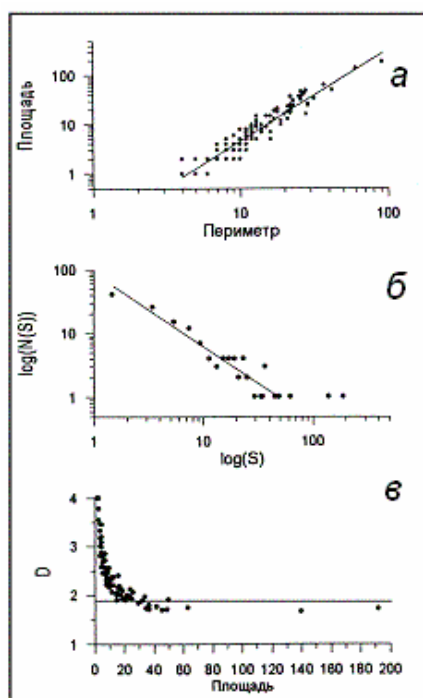


Рис. 5-7. Фрактальный характер нефтяных месторождений: а) периметр  $P$  - площадь  $S$  в  $\log$ - $\log$  масштабе; б) число месторождений  $N$  - площадь  $S$ ; в) фрактальная размерность  $D = 2 \lg P / \lg S$ , как функция  $S$ .

Предлагаемый подход имеет смысл применить для других нефтяных и газовых регионов и даже внутри них. Возможно, это окажется полезным для понимания природы образования нефтяных и газовых месторождений и для более эффективного их использования.



## V. 5. Могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли?

Алмаз - наиболее изученный минерал. Согласно (Харькив и др. 1997), каждый год публикуется более 1000 статей и монографий, посвященных алмазу. Не раскрывая широко эту очень интересную тему, мы попытаемся ответить на вопрос, могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли, или они возникли на очень большой глубине и затем были вынесены на дневную поверхность. Геологи считают, что алмазы сформировались в условиях их термодинамического равновесия, хотя известны алмазы ударного (импактного) происхождения. Считается, что средний возраст алмазов 3.2-3.5 млрд. лет, в то время как возраст пород кимберлитовых трубок «всего лишь» 90 - 170 млн. лет. Имеются данные, что возраст некоторых алмазов сравним с возрастом нашей планеты (Озима, 1990). Месторождения алмазов сосредоточены в пределах древних структур Земли, консолидация которых завершилась 2.5 млрд. лет тому назад. Преобладающее большинство специалистов считают, что алмаз доставлен на поверхность Земли примерно с глубины 140-280 км. Поэтому мантийный алмаз важен как источник информации о событиях, происходящих на ранних этапах формирования Земли, во-первых, и как источник информации о верхней мантии, во-вторых.

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, где их обнаруживают в т.н. трубках взрыва - диатремах (Милашев, 1984). Такие трубки напоминают жерла вулканов, что и определило способ их транспортировки - в лаве вулкана. Всё было бы хорошо, но в этой привычной для всех схеме есть небольшой, но неприятный дефект. Дело в том, что при такой транспортировке алмазы из области  $pT$ -условий устойчивого их существования в мантии обязаны перейти в такую область, где они существовать не могут и где углерод существует только в состоянии графита (см., например, Озима, 1990; Кузнецов, 1992).

Алмазы стабильны на глубине ниже 150 км, а на более высоких горизонтах они становятся неравновесными и переходят в графит, причем, этот переход происходит очень быстро при высоких температурах внутри Земли. Следовательно, если алмазы, образовавшиеся в недрах Земли, будут вследствие мантийной конвекции перенесены на глубину менее 100 км, они разрушатся и превратятся в графит (Озима, 1990).

В  $pT$ -условиях земной поверхности алмазы устойчивы. Заметим, что буквально все алмазы на Земле образовались раньше одного миллиарда лет назад, т.е. на самой “ранней” стадии эволюции Земли. Более того, совсем недавно Соболевым и Шацким было доказано, что алмазы образовались в породах земной коры (Sobolev, Shatsky, 1990). Напомним, что согласно модели горячей расширяющейся Земли, 1 млрд. лет назад  $pT$ -условия, необходимые для образования алмаза, существовали практически на её поверхности, точнее, на самых малых глубинах земной коры. Продемонстрируем справедливость этого утверждения.

В главе III показано, что  $pT$ -параметры на поверхности Земли и в её коре на раннем этапе её эволюции значительно отличались от современных. Там же показано, что резкое изменение термодинамических характеристик Земли началось примерно 160-200 млн. лет назад, т.е. этот период совпадает с периодом образования трубок взрыва. Наша модель недостаточно точна для того, чтобы однозначно определить глубину земной коры, на которой величины давлений и температур соответствовали условиям, необходимым для синтеза алмазов. Так же сложно определить период времени эволюции Земли, когда эти параметры были именно такими, какие нужны для синтеза. Базируясь на нашей модели, по-видимому, можно утверждать, что на глубине порядка 5-10 км в земной коре

примерно 1 млрд. лет тому назад,  $pT$ -условия вполне могли соответствовать тем, которые необходимы для синтеза алмазов. Как следует из модели горячей Земли, 160-200 млн. лет назад началось довольно резкое охлаждение её оболочек, как внутренних, так и внешних. Термодинамическое равновесие оболочек достигалось путем конвективного тепло- и массопереноса в т.н. астеносферных зонах. В тех местах Земли, где конвекции не удавалось развиться, её вещество сохранялось в перегретом и переуплотненном виде. Переуплотнение вещества, как мы отмечали в начале главы, достигается увеличением количества водородных связей. Таким образом, Земле был необходим некий механизм, с помощью которого можно было бы освободиться от тепловой и гравитационной энергии, возникшей в некоем объеме, где ранее образовались алмазы. Как мы неоднократно отмечали, Земля располагает несколькими способами "сброса" энергии: землетрясения, горные удары, вулканизм, плюмы. Если ни один из этих способов по той или иной причине Земле «не подходил», следовало «изобрести» ещё один.

Вполне возможно, что образование трубок взрыва - диатрем, это как раз и есть такой способ, которым Земля «воспользовалась» на одном из этапов своей эволюции. Суть его, в рамках нашей модели, заключается в быстром, взрывном освобождении нагретого до высокой температуры водорода, за счет разрыва водородных связей и выделения теплоты порядка 10 ккал/моль (см. Табл. 5.1). Экзотермическое выделение энергии (теплоты) связи приводит к ещё большему нагреву водорода. Может развиться тепловой взрыв и дальнейшее истечение горячих газов. Именно такая причина считается Милашевым (1984) как наиболее вероятная для образования диатрем. Явление подобного спонтанного перехода, связанного с разуплотнением, декомпрессией вещества, имеет смысл реологического взрыва (Ярославский, 1982). Он должен отличаться от классического химического или ядерного взрыва, когда имеется взрывчатое вещество (ВВ), а порода дробится и выносится с помощью газов, выделяющихся при детонации ВВ. В нашей ситуации более вероятен случай объемной детонации, наиболее близкий известный аналог которой, например, детонация газообразных ВВ или пыли. Сделаем необходимые оценки.

Стандартная трубка взрыва согласно данным, приведенным в (Милашев, 1984), представляет собой конус. Радиус основания конуса  $\sim 300$  м, глубина  $\sim 2$  км, радиус «острия» конуса  $\sim 20$  м. Объем типовой диатремы  $\approx 2.5 \cdot 10^7$  м<sup>3</sup>, а энергия, необходимая для дробления горной породы и выноса её из объема трубки, должна быть не менее  $2.5 \cdot 10^{14}$  Дж. Плотность энергии оказывается порядка  $10^7$  Дж/м<sup>3</sup>, или  $10^8$  эрг/см<sup>3</sup>. Если допустить, что разуплотнение вещества в процессе его адиабатического охлаждения порядка самого объема, то «сбрасываемое» в этом процессе давление оказывается порядка 0.1 - 1 кбар. Эта оценка делается таким образом. Предположим, что величина  $g$  изменилась на  $1/2g$ . Давление  $p$  на глубине 10 км  $\approx 2$  кбар, следовательно, разуплотнение соответствует изменению  $p$  на 1 кбар и меньше. Необходимая плотность водорода  $n$  должна быть:  $n = p/kT$ , где  $T = 10^3$  К, а  $k$  – постоянная Больцмана, что после подстановки дает:  $n = 10^{21} - 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Общее количество атомов Si в см<sup>3</sup> примерно равно  $10^{24}$ , отношение H/Si, по нашей модели, должно быть порядка  $10^{-3}$ , что примерно совпадает с нашими оценками. Если принять энергию водородной связи 10 ккал/моль, то на водород приходится примерно 1/30 часть, или около 1 кДж/г, что примерно в 4 раза меньше чем удельная энергия тротила. По оценке Милашева (1984), для создания типовой трубки взрыва необходимо примерно  $2.5 \cdot 10^{14}$  Дж или, в тротиловом (TNT) эквиваленте  $10^{11}$  г TNT. По нашим оценкам, эффективность перегретого вещества диатремы примерно в 4 раза меньше. Примем, что она хуже в 10 раз. Тогда масса ВВ должна быть порядка  $10^{12}$  г, а масса самой трубки равна  $5 \cdot 10^{13}$  г, что в 50 раз больше, чем масса ВВ. Можно сделать вывод, что идея образования объемного взрыва вещества диатремы, выброса материала на поверхность Земли и охлаждение части вещества её недр вполне правдоподобна. По-видимому, имеет смысл учитывать и этот диссипативный механизм, так же как, дрейф материков, землетрясения, вулканизм, образование плюмов и т.п. Заканчивая этот раздел, на вопрос о

том, могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли, мы, по-видимому, можем ответить утвердительно.

#### Выводы

В пятой главе приведены несколько эпизодов, следующих из модели горячей Земли. Возможно, они имеют некоторое отношение к геохимии, т.е. к науке, изучающей химические процессы, происходящие в Земле, скорее, на её поверхности, и на очень небольших глубинах. Наиболее вероятно, что эти эпизоды общепринятыми догмами геохимии никак не могут быть восприняты в изложенном здесь виде. Время для этого, скорее всего, ещё не пришло. Автор и не ставил перед собой такой задачи. Основная цель, которую преследовал автор, помещая настоящую главу в книгу по физике горячей Земли, состояла в том, чтобы показать, что в науке о Земле имеются альтернативные подходы и их учет, возможно, в будущем, поможет найти более верные решения в такой сложной проблеме как физика и химия Земли.

#### Литература

- Анималу А. Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.: Мир. 1981. 574 с.
- Балдин, М.Н., Павлов А.Л., Кузнецов В.В. и др. Пентакарбонил железа  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  в газогидротермах вулкана Узон (Камчатка). ДАН СССР. 1983. Т. 269. № 2. С. 458-460.
- Басин А.С. Основные параметры критической точки металлов с плотноупакованной кристаллической структурой. Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2002. № 10. С. 83-88.
- Бернал Дж., Фаулер Р. Структура воды и ионных растворов. УФН. 1934. Т. 14. № 5. С. 586-644.
- Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И. Элементоорганические соединения в проблеме миграции рудного вещества. М.: Наука. 1990. 151 с.
- Введенков А.А. Физика растворов. М.: Наука. 1984. 110 с.
- Виноградов А.П. Происхождение оболочек Земли. Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1962. № 11. С. 3 - 17.
- Галимов Э.М. О возникновении и эволюции океана по данным об изменениях  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  осадочной оболочки Земли в ходе геологического времени. ДАН СССР. 1988. Т. 299. № 4 С. 977-981.
- Грю К.Э., Иббс Т.Л. Термическая диффузия в газах. М.: ГИТТЛ, 1956, 183 с.
- Киселев О.Е., Тихонов Д.А., Саркисов Г.Н., Сарвазян А.П. Определение термодинамических характеристик вещества по измерениям скорости звука. ДАН. 1993. Т. 331. N.3. С. 302-305.
- Ксанфомалити Л.В. Планета Венера. М.: Наука. 1985. 375 с.
- Кузнецов В.В., Оболенский А.А. Возможный механизм природного фракционирования изотопов ртути. ДАН СССР. 1980. Т. 252. № 2. С. 459-460.
- Кузнецов В.В. Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности. Новосибирск: ИГиГ. 1985. 72 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск: Наука. 1992.
- Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика. М.: Наука. 1983.
- Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра. 1984. 268 с.
- Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики. М.: Наука. 1964. 514 с.
- Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука. 1983, 286 с.
- Новгородова М.И. Обнаружен самородный магний? Природа. 1991. № 1. С.32-33.
- Озима М. Глобальная эволюция Земли. М.: Мир. 1990. 164 с.
- Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука. 1982.

- Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра. 1982. 293 с.
- Семенов Н.П. Кислородно-водородная модель Земли. Киев: Наукова думка, 1990. 247 с.
- Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М.: Недра. 1969. 687 с.
- Слободской Р.М. Элементо-органические соединения в магматогенных и рудообразующих процессах. Новосибирск: Наука. 1981. 135 с.
- Стовас М.В. Избранные труды. М.: Недра. 1975. 155 с.
- Федер Г. Фракталы М.: Мир. 1991.
- Физическая энциклопедия. Т. 3. М.: БРЭ. 1992. с.78-81.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 404 с.
- Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Зуев В.М. История алмаза. М.: Недра. 1997. 600 с.
- Шарков Е.В., Богатииков О.А. Сходство и различия тектономагматического развития Земли и Луны: современный взгляд. *Астрономический вестник*. 1999. Т. 33. № 5. С. 415-429.
- Ярославский М.А. Реологический взрыв. М.: Наука. 1982.193 с.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59. P. 381-384.
- Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversals, polar wander, and core-mantle coupling. *Science*. 1987. V. 237. P. 1140-1147.
- Giardini D., Li X.D., Woodhouse J.H. Splitting function of long-period normal modes of the Earth. *J. Geophys. Res.* 1988. V.93. №. B 11. P. 13716 - 13742.
- Feldman W.C., Binder A.B., Malrice S., et al. First positive indication of water ice at the lunar poles. *Eos Trans. AGU 79 (17) Spring. Meet. Suppl.* 1998. S.190.
- Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. *Nature*. 1990. V. 347. P. 272-273.
- Lehman I. P' . Bureau Centrale Seismologique Internationale Travaux Scientifiques. 1936. V. A 14. P. 3-31.
- Mattern P.L., Thomas G.J., Bauer W. Hydrogen and helium implantation in vitreous silica. *J. Vac. Sci. Technol.* 1976. V. 13. N. 1. P. 430-436.
- Sobolev N.V., Shatsky V.C. Diamond inclusion in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation. *Nature*. 1990. V. 343. P. 742-746.
- Wysession M.E. Seismic images of the core-mantle boundary. *GSA TODAY*. 1995. V. 5. N. 12. P. 238-240, 256, 257.

## Глава VI. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Природа магнитного поля Земли остаётся неизвестной, несмотря на многолетние и многочисленные усилия исследователей многих стран. Как известно, эта проблема считается проблемой "номер 1" в физике Земли. Более того, некоторые авторы работ по геомагнетизму утверждают, что Альберт Эйнштейн относил решение задачи генерации геомагнитного поля к одной из пяти главных проблем физики. Ясное понимание природы земного магнетизма автоматически решило бы многие вопросы, например, такие как: внутреннее устройство Земли; природа источника ее теплового потока, причины движения материков и плит, причины возникновения и исчезновения магнитного поля на Луне и спутниках Юпитера: Ио и Ганимеду (Cheng, Paranicas, 1996; Stevenson, 1997); синхронизм явлений в геомагнетизме и тектонике (например, суперхроны и суперплюмы) и т.п. Геомагнитное поле (см. рис. 6-1) нельзя рассматривать вне контекста общей модели Земли и планет, так как вряд ли природа геомагнетизма отличается от физики магнетизма других планет и спутников Солнечной системы. Принято считать, что геомагнитное поле взаимосвязано с тепловым потоком, геодинамикой. Очевидно, что модель магнитного поля Земли (МПЗ) должна включать связь с этими явлениями. Модель МПЗ должна объяснять весь широкий спектр явлений геомагнетизма: инверсии, экскурсы, джерки, дрейф магнитных полюсов и фокусов векового хода и т.п.

Рис. 6-1 дает общее представление о морфологии геомагнитного поля. Можно видеть, что поле имеет довольно сложный характер, - это не просто дипольное поле. Кроме северного и южного магнитных полюсов хорошо различимы четыре аномальных участка – два в северном и два в южном полушариях. Очевидно, что модель генерации геомагнитного поля должна находить объяснение этим особенностям. Очевидно так же, что это только самый поверхностный взгляд на проблему, как будет показано ниже, магнитному полю Земли присущи не только пространственные аномалии, но и особенности его поведения во времени в течение всего периода эволюции Земли.

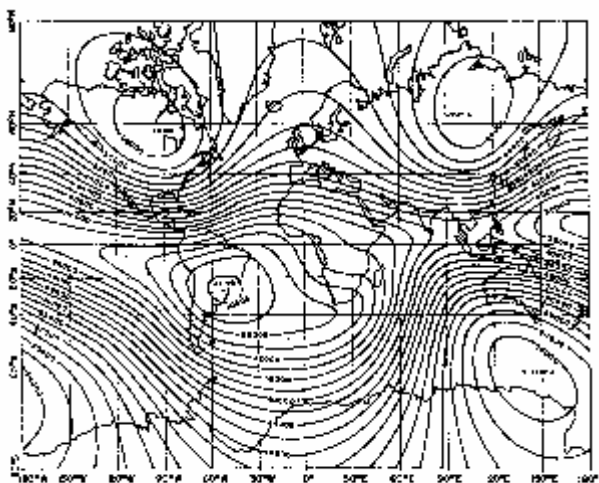


Рис. 6-1. Модуль интенсивности (в нТл) геомагнитного поля (Паркинсон, 1986).

### VI. 1. Модели и гипотезы.

Большая часть моделей генерации МПЗ связана с идеей магнитного динамо и т.н. моделью "холодной" Земли. В основе такой модели лежит гипотеза железного ядра, разогрева его вещества за счет распада радиоактивных элементов, конвекции в ядре, захвата конвективным потоком вмороженного в него неземного магнитного поля и его усиление (Паркинсон, 1986; Яновский, 1953; Джекобс, 1979; Паркер, 1982; Рикитаки, 1968; Каулинг, 1959; и др.). Эта модель считается общепринятой, однако она не находит

ответов на многие вопросы из области физики Земли. Кратко перечислим некоторые из них. Во-первых, это инверсии поля. Кроме механизмов двухдискового динамо Рикитаки (1968) и динамо Паркера, в котором присутствуют меридиональные токовые кольца (Parker, 1969), здесь нет ни одной заслуживающей внимания идеи. Идеи Рикитаки и Паркера не находят геофизического наполнения и "не вписываются" в современные модели динамо. Инверсии, как известно, повторяются совершенно случайным образом, что так же не находит объяснения в динамо, в котором основной смысл состоит в строгой периодичности процессов (хотя существуют и другие идеи, т.н. турбулентного, "хаотического" динамо). Во-вторых, магнитное поле планет-гигантов и особенно наличие палеополя у Луны и Марса, а так же у некоторых других спутников, категорически не находит объяснения в рамках динамо в железном ядре. В третьих, дрейф магнитных полюсов как в прошлом, так и современный, не находит толкования в модели динамо. В четвертых, наличие глобальных аномалий отрицается в современной модели динамо. Не находит эта модель объяснений возникновению джерков, фокусов векового хода и т.п. Этот список можно продолжить. Все это позволяет (возможно, даже требует) искать другие, альтернативные пути. Один из таких путей состоит в создании принципиально новой модели "горячей" Земли и разработке на ее основе модели генерации МПЗ.

Отсутствие дипольного магнитного поля на Луне и на Марсе связывается в нашей модели с тем, что там вещество внутреннего ядра уже полностью релаксировало. В нашей модели Земли наличие аномалий, джерков и фокусов векового хода свидетельствует о том, что в области фазового перехода (в F-слое) происходят процессы выравнивания температуры. Система при этом стремится поддерживать постоянными  $pT$ -условия и выходит на стационарный режим. Наличие инверсий говорит о том, что вещество в области фазового перехода перегрелось (или переохладилось) и, как следствие этого, произошла смена направления фазового перехода; В свою очередь, наличие суперхрон (длительных периодов в несколько млн. лет в истории Земли, в течение которых ее магнитное поле не менялось) говорит о том, что система фазового перехода «вышла» на термодинамическое равновесие (что маловероятно), либо она очень далека от равновесия и т.п.

Согласно развиваемой нами модели горячей Земли во внутреннем ядре и на его границе возможно образование электронной «кристаллической» структуры типа Вигнеровского кристалла (Wigner, 1934; Van Horn, 1991; Аврорин и др., 1993), либо состояния, подобного «кристаллической пылевой плазме» (см. Приложение 3). Если это действительно так, то такая гипотеза позволила бы объяснить факт прохождения сдвиговых сейсмических волн через внутреннее ядро, состоящее, по модели, из плотного "газа". Внешнее ядро, согласно этой модели, состоит из конденсата этого "газа". В области фазового перехода "испарение-конденсация", происходящего на границе внутреннего ядра, по нашей модели, возможно образование и разделение электрических зарядов, и возникновение т.н. двойного электрического слоя (ДЭС). Суточное вращение ДЭС приведет к возникновению небольшого по величине "затравочного" дипольного магнитного поля. Это поле оказывается нормальным к электрическому полю ДЭС. В такой системе возможно, в принципе, возникновение холловского тока, который может усиливать затравочное магнитное. В принципе, в такой модели возможно возникновение динамо-механизма, усиливающего затравочное поле, аналогичного динамо-эффектам в ионосфере. Вообще говоря, процессы, происходящие в F-слое, в определенном смысле аналогичны явлениям, имеющим место в атмосфере. В частности, речь может идти о механизме образования, разделения электрических зарядов и возникновения двойного электрического слоя «Земля-ионосфера». Можно упомянуть об образовании геострофического ветра в атмосфере и течения в океане, о вихрях и волнах Россби и слое Экмана, об образовании спиральных структур и т.п.

*Нединамо модели.* Надо сказать, что идеи нединамо моделей генерации магнитного поля Земли возникли задолго до появления динамо-механизма. Среди прочих, идея генерации поля за счет возникновения тока Холла так же не нова. Как альтернатива магнитному динамо, эта идея развивалась Вестингом (Vestine, 1954). Известны и другие идеи, в частности, использование эффекта Нернста предлагалось Ганном, возбуждение электрических токов под воздействием давлений - Инглисом (Inglis, 1955) и т.п. Все подобные модели базировались, в той или иной степени, на некотором, не всегда ясном, механизме образования и разделения электрических зарядов. Суточное вращение их обеспечило бы некое начальное поле (наша модель тоже использует эту идею), которое может быть усилено за счет “работы” гальваномагнитного эффекта, например, эффекта Холла.

По-видимому, одним из первых, кто высказал эту идею еще в начале века, был австралийский физик В. Сазерленд. Признания его идея не получила, т.к. им не было разработано сколько-нибудь убедительной гипотезы разделения зарядов, а так же потому, что некоторым ученым казалось, что идея Сазерленда противоречит принципу относительности, “ ... ибо наблюдатель на поверхности Земли, вращаясь вместе с зарядами, остается неподвижным относительно них” (Яновский, 1953, с. 139). Это утверждение ошибочно, что было доказано известным экспериментом Эйхенвальда (1927), который обнаружил эффект возникновения магнитного поля при вращении диэлектрического диска с индуцированными на нём электрическими зарядами. Величина магнитного поля в этих экспериментах оказалась пропорциональной скорости вращения диска, его радиусу и концентрации индуцированных зарядов. Эксперимент Эйхенвальда служит прямым доказательством генерации магнитного поля при вращении электрических зарядов, которое, в свою очередь, эквивалентно прохождению электрического тока.

В подтверждение гипотезы Сазерленда, русский физик П.Н.Лебедев ещё в 1911 г. безуспешно пытался обнаружить намагниченность быстро вращающихся тел. Аналогичные опыты проводились чуть позже, в 1928 г. в Америке – Сванном и Лангакром, и тоже безуспешно (Григорьев и др. 1990). Отрицательные результаты этих экспериментов во многом определили скептическое отношение к гипотезе Сазерленда. Оно, по всей видимости, так и не было поколеблено результатом А.А. Эйхенвальда. Эксперимент Лебедева был недавно успешно повторен в Дубне Б.В. Васильевым (1994), который, используя современную экспериментальную технику, – сверхпроводящие экраны и очень чувствительные измерители магнитного поля (сквиды), обнаружил термогиромагнитный эффект, т.е. генерацию магнитного поля во вращающемся металлическом цилиндре, в котором искусственно создавался температурный градиент вдоль радиуса.

Теоретические исследования, связанные с проблемой генерации магнитного поля за счет вращающихся электрических зарядов, были выполнены Е.В.Григорьевой (1990). Она пришла к выводу, что покоящийся относительно Земли наблюдатель должен фиксировать магнитное поле, создаваемое стационарно распределенными во вращающейся Земле электрическими зарядами.

## VI. 2. Модель генерации дипольного поля горячей Земли.

*Электрическая модель.* Построим феноменологическую модель процессов, которые, в принципе, могли бы приводить к генерации геомагнитного поля. Будем пользоваться аналогией с электрическими явлениями в атмосфере. Дело в том, что и в атмосфере, и в F-слое земного ядра, происходят, по нашей модели, процессы конденсации и испарения.

Как известно, в атмосфере Земли постоянно образуются, разделяются и рекомбинируют электрические заряды. Согласно теории Френкеля (1949), большие капли воды несут на себе отрицательный заряд, а маленькие – положительный. Большие капли падают на Землю (представляющую собой хорошо проводящую “обкладку” сферического конденсатора), обеспечивая ей отрицательный заряд. Положительный заряд скапливается

на другой “обкладке” – проводящей ионосфере (см. рис. 6-2 и Главу IX). Суть теории Френкеля (в рамках нашей модели) состоит в преобладании процессов конденсации воды в земной атмосфере над испарением. Если бы наблюдалась обратная картина, и горячий пар воды, вскипая, всплывал бы над поверхностью Земли, переносил отрицательный заряд к ионосфере, Земля оказалась бы заряженной положительно. Таким образом, если наша посылка верна, то смена режима ФП к преимуществу испарения над конденсацией поменяла бы полярность двойного электрического слоя (ДЭС) “Земля-ионосфера”.

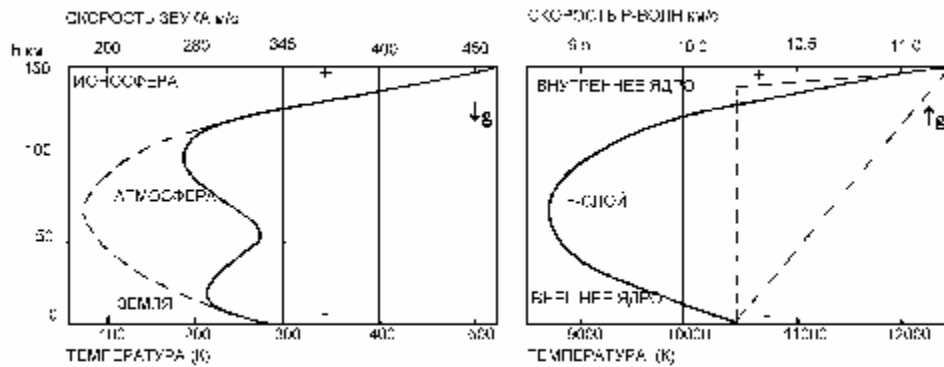


Рис. 6-2. Распределение температуры и скорости звука в ионосфере и F-слое ядра Земли.

Обратим внимание на характер распределения скорости звука по высоте атмосферы и Р-волн в F-слое, а так же на характер, в рамках нашей модели, распределения температуры в атмосфере и F-слое (рис. 6-2). Легко видеть их внешнюю схожесть. Но это не только внешняя сторона проблемы, на самом деле, и в том, и в другом случае, мы имеем дело с распределением скорости звука в двухфазной среде (см. соответствующие разделы глав IV и V). Этот факт говорит в пользу используемой нами аналогии между электрическими процессами в атмосфере и F-слое. Основное различие этих процессов состоит в том, что плотности вещества во втором случае на четыре порядка больше чем в первом, давление больше в миллион раз, а температура, - примерно, в тридцать раз.

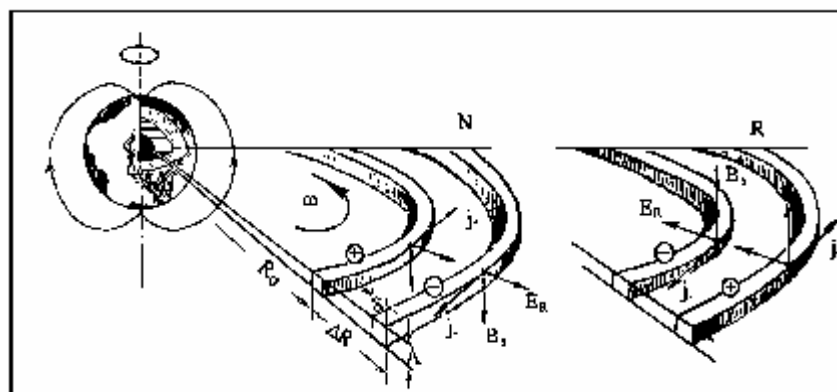


Рис. 6-3. Токовые системы в F-слое в случае прямой (N) и обратной (R) полярности МПЗ.

Предположим, что в области F-слоя происходят процессы, аналогичные тем, которые происходят с водяным паром в атмосфере. При конденсации плотного газообразного вещества внутреннего G-ядра (по Буллену) большие капли, поскольку они легче, скапливаются вблизи внутренней поверхности внешнего ядра, представляющего собой конденсат вещества внутреннего ядра. Как мы отмечали, конденсация, процесс экзотермический, приводящий к выделению дополнительного тепла и повышению



температуры. Если нет специального «канала» для отвода тепла, то в системе, после достижения в ней определенной температуры, режим конденсации изменится на преимущество испарения. Во время этого цикла (преимущества испарения при перегреве) кипящие пузыри собираются около поверхности внутреннего ядра. (В нашей модели, в отличие от ситуации в атмосфере, капли “легче” пузырей). В первом случае ( $K > J$ ), внешняя граница F-слоя становится отрицательной, а внутренняя – положительной, во втором ( $K < J$ ), – наоборот, полярность ДЭС меняется - на обратную. Таким образом, F-слой будем в дальнейшем рассматривать как ДЭС, в котором происходит смена его полярности при смене режима “работы” фазового перехода (см. рис. 6-3).

Оценим напряженность электрического поля  $E_R$  в F-слое:  $E_R = q/(C \times \Delta R)$ , здесь  $q = NeV$  – электрический заряд слоя,  $\Delta R$  – толщина F-слоя,  $N$  – концентрация зарядов,  $e$  – заряд электрона. Заметим, что отношение  $1/Ne$  – имеет смысл холловской постоянной. Обозначим её через  $D$ , а через  $V$  – объем сферического “конденсатора”:  $V = 4\pi R_G^2 \Delta R$ , где  $R_G$  – радиус внутреннего ядра, тогда  $C$  – электрическая емкость ДЭС:  $C = 4\pi e_o R_G^2 / \Delta R$ ,  $e_o$  – электрическая постоянная. Получаем:

$$E_R = \Delta R / (e_o D). \quad (6.1)$$

По-видимому, концентрация электрических зарядов  $Ne$  неравномерно распределена по F-слою, так же как это имеет место в атмосфере. Заряды в F-слое разделяются в той его области, как в облаках атмосферы, где преимущественно происходят процессы конденсации. Следовательно,  $E_R$  меняется по слою (по  $\Delta R$ ). Например, в атмосфере электрическое поле максимально ( $10^5$  В/м) в облаках, где, как принято считать, и происходит генерация электрических зарядов. Поле достаточно велико вблизи земной поверхности ( $10^2$  В/м) и значительно меньше на ионосферных высотах. В рассматриваемой нами модели поле  $E_R$  должно быть максимальным в тонких слоях на границах F-слоя, где, возможно, и реализуются механизмы конденсации и кипения.

Как было сказано выше, суточное вращение ДЭС с частотой  $w$  может вызывать возникновение “кваситоков” и генерацию магнитного поля. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Будем считать, что у одной поверхности F-слоя скопился положительный заряд, а у другой – отрицательный (рис. 6-3). Будем считать, что в первом случае холловская постоянная положительна  $D^{(+)}$ , во втором – отрицательна  $D^{(-)}$ . Смена полярности ДЭС, следующая за сменой преимущества режима «испарение-конденсация», меняет знак у  $E_R$ . Вращение зарядов со скоростью  $w R_G$  эквивалентно “току” с плотностью  $j_w = w R_G / D$ . Магнитное поле (индукция) такого “тока” на оси вращения системы:

$$B = m_b j_w S_X / 2R_G,$$

где  $S_X$  – эффективная площадь сосредоточения зарядов:  $S_X \gg d \times A$ , здесь  $d \ll \Delta R$  – толщина слоя, по которому “течет ток”  $j_w$  ( $m_b$  – магнитная постоянная,  $A$  – высота слоя). Так как заряды на обеих границах F-слоя противоположны по знаку, в системе “текут” два тока в противоположных направлениях (определяемых направлением вращения и знаком  $D$ ). В центре (на оси вращения Земли) аксиальных круговых “токов” магнитная индукция:  $B = B_G - B_F$ , где  $B_G = m_b j_w S_X / 2R_G$ , а  $B_F = m_b j_w S_X / 2R_F$ . Подставляя соответствующие значения  $j_w = w R_G / D$  (во втором случае вместо  $R_G$  используем  $R_F$ ), получаем, что  $B = 0$ . Однако, это совсем не так для точек, внешних относительно токовых колец. Например, величина индукции на экваторе (горизонтальная компонента поля):

$$B = m_b j_w S_X / h - m_b j_w S_X / (h + \Delta R) \gg m_b w S_X \Delta R R_3 / h^2 D,$$

где  $h = R_3 - R_F$ ,  $R_3$  – земной радиус. Подставляя  $\Delta R$  из формулы (6.1), получаем:

$$B^* = (m_b e_o w / R_3) \times S_X E_R. \quad (6.2)$$

Величина  $B^*$  определяется  $E_R$  и площадью, занимаемой “током”:  $B^* \approx 10^{-28} E_R S_X$ . Полагая величину  $S_X$  порядка  $10^9$  м<sup>2</sup> и учитывая, что поле  $E_R$  не может принимать сколь угодно больших значений, получим, что магнитное поле, возникающее от вращения ДЭС, значительно ( $k_o \gg 1$ ) меньше требуемого (геомагнитное поле на экваторе  $B \approx 3 \times 10^{-5}$  Тл,  $k_o$

– необходимый коэффициент усиления поля). Этой оценкой подтверждается вывод, к которому приходили и другие авторы, о невозможности обеспечить генерацию геомагнитного поля только за счет разделения зарядов в ДЭС и его суточного вращения.

Обратим внимание на то, что ток  $j_w S_X$ , создает магнитное поле  $B_o$  в районе противоположного слоя -  $d$ . Здесь же действует радиальное поле  $E_R$  и течет ток  $I_R$ , направленные нормально к полю  $B_o$ . Совместное влияние  $B_o$  и тока  $j_R$  может привести к возникновению холловского тока, направленного точно так же, как ток вращающихся зарядов  $j_w$ . Таким образом, возможно усиление этого тока за счет эффекта Холла.

Оценим величину индукции  $B_o$ , которая возбуждается в окрестности одной “обкладки” толщиной  $d$  “током”  $j_w S_X$ , текущим вдоль другой “обкладки” конденсатора. Величину  $B_o$  можно выразить аналогично предыдущему:

$$B_o = (1/2\pi)m_b j_w S_X / \Delta R = (1/2\pi)m_b w S_X R_G / D \Delta R. \quad (6.3)$$

Направления и величины  $B_o$  в окрестности “токов”  $j_w$  одинаковы. Это связано с тем, что направление “тока” определяется направлением вращения Земли и полярностью “постоянной Холла”  $D$ .

Наличие электрических зарядов ( $D$ ), радиального электрического поля ( $E_R$ ), тока ( $I_R$ ) и ортогонального к нему магнитного поля ( $B_o$ ) вызывает появление “холловских” напряжения  $U_X = D(B_o I_R / A)$  и электрического поля ( $E_X = U_X / 2\pi R_G$ ), а так же “холловского” тока ( $j_X$ ):

$$E_X = D [B_o j_R], \quad (6.4)$$

$$j_X = S_X E_X, \quad (6.5)$$

где  $S_X$  – “холловская” проводимость,  $j_R = I_R / S_R$ ,  $S_R = 2\pi R_G A$ . Причем, как следует из нашей модели, “холловские” токи текут в противоположных направлениях, в  $\delta$ -слоях, в которых сосредоточены электрические заряды противоположных знаков. Для генерации поля требуемой величины в нашей модели необходимо обеспечить эффект усиления тока  $j_w$  в  $k_o$  раз. Оценим возможную величину  $k$  ( $k = j_X / j_w$ ). Подставим (6.4) в (6.5):

$$j_X = S_X D [B_o j_R].$$

Выразим  $B_o$  через  $j_w$ , а  $j_R$  через  $E_R$ :

$$B_o = m_b S_X j_w / 2\pi \Delta R, \quad (6.6)$$

$$j_R = S_R \Delta R / e_o D. \quad (6.7)$$

Подставляем полученные выражения в формулу для  $k$ :

$$k = (m_b / 2\pi e_o) S_X S_R S_X. \quad (6.8)$$

Эффект усиления тока за счет эффекта Холла ограничивается величинами проводимостей  $S_X$ ,  $S_R$ . Для получения магнитного поля (индукции) необходимой величины, должно выполняться очевидное условие:  $k \geq k_o$ . Заметим, что величина коэффициента усиления  $k_o$  не может быть сколь угодно большой, т.к. он показывает насколько скорость дрейфа холловского тока больше скорости суточного вращения зарядов. Скорость дрейфа не может быть очень большой, что и ограничивает величину  $k_o$ .

Оценим величины  $S_X$  и  $S_R$ . Совершенно ясно, что модель имеет смысл только в том случае, если одна из них очень большая ( $S_X$ ), близкая к проводимости металла, другая ( $S_R$ ) – очень маленькая, соответствующая проводимости диэлектрика. (Действительно, поляризация вещества и образование ДЭС возможно только в диэлектрике). Определим электрические характеристики нашей системы генерации геомагнитного поля. Амплитуда “холловского” тока  $I_X$  и напряжения  $U_X$  могут быть оценены, исходя из ограничения на величину мощности поддержания (диссипации) геомагнитного поля  $P_X = 10^{12}$  Вт. Оценим величину  $I_X$ , полагая, что в F-слое текут два тока в противоположных направлениях, а величина индукции  $B$  в районе экватора ( $B \approx 30$  мкТл) равна:

$$B = m_b I (1/h - 1/(h + \Delta R)) \approx m_b I \Delta R / h^2. \quad (6.9)$$

Из (6.9) величина тока:  $I_X \approx 10^{10}$  А, значения  $U_X$ ,  $E_X$ , и  $S_X$  приведены в Таблице 6.1.

Аналогичным образом можно оценить электрические характеристики системы радиальных токов и напряжений. По-видимому, мощность этой системы должна быть

несколько больше холловской, т.к. эффект Холла (если именно он является причиной возникновения  $I_X$ ) является вторичным, но она не должна быть больше, чем мощность теплового потока  $P_R = 10^{13}$  Вт (Примем КПД преобразования тепловой энергии в энергию магнитного поля примерно 10%). Ориентировочные значения величин  $E_R$ ,  $U_R$ ,  $I_R$  и  $S_R$  так же приведены в этой таблице.

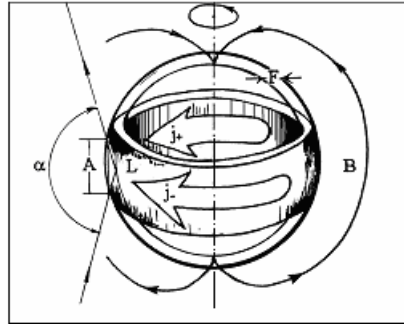


Рис. 6-4. Анизотропия внутреннего ядра. Схема токовых колец. Обозначения в тексте.

В нашей модели, “токи” текут в противоположных направлениях не по всей поверхности внутреннего ядра, а сосредоточены в двух цилиндрах, радиусом  $R_G$  и  $(R_G + DR)$ ; высотой  $A$  и толщиной стенки  $\delta$ , в экваториальной области. Это следует из нашей модели, т.к. в оценках мы принимали, что  $j_w$  и, соответственно,  $B^*$ , являются функциями  $R_G$ . Если рассмотреть нашу модель применительно к более высоким широтам, то вместо  $R_G$  необходимо подставить  $R_G \cos j$ . Это означает, что на полюсах, где  $\varphi = 90^\circ$ , наша модель заведомо “не работает” и вся наша “токовая” система “стягивается” в тонкие цилиндрические кольца ( $\delta < A$ ), расположенные на экваторе (рис. 6-4).

Приведем окончательную формулу для индукции  $B$  дипольной части геомагнитного поля:

$$B = (m_b^2/e_o) (S_X S_R w/R) (\Delta R S_X^2/D). \quad (6.10)$$

Заменяя  $DR/R_X$  из (6.1), получаем для  $B$ :

$$B = m_b^2 (S_X S_R w/R) E_R S_X^2 = k_o B^* . \quad (6.11)$$

В формуле (6.11)  $(S_X S_R w/R)$  характеризует медленно изменяющиеся параметры (здесь  $R \gg h$  – земной радиус). Наибольший интерес представляет  $(\Delta R S_X^2/D)$ . Действительно, если материал внутреннего газообразного ядра “выработался” и  $R_G = 0$ , то и  $\Delta R = 0$ , и  $B = 0$ . Параметры  $\Delta R$  и  $S_X$  могут оказаться неодинаковыми вдоль поверхности G-ядра, что может “обеспечить” искажение формы поля  $B$  - относительно поля осе симметричного, дипольного. Концентрация зарядов и полярность ДЭС определяет величину и полярность  $E_R$  (6.1). Изменение полярности радиального электрического поля  $E_R$  приводит к смене полярности  $B$ , т.е. к инверсии. Плотность разделенных в ДЭС зарядов, связанная с величиной  $D$ , контролирует изменение величины дипольной компоненты поля  $B$ . Вполне возможно, что наблюдаемое в течение последних 100 лет уменьшение величины  $B$ , со скоростью 5% за 100 лет, обязано этому эффекту. Полученная нами зависимость  $B$  от скорости вращения позволяет объяснить отсутствие магнитного поля на Венере (если его там никогда не было). Наличие внутреннего ядра на больших спутниках, даже весьма небольшого и функционировавшего весьма непродолжительное (по геологическим масштабам) время, привело к генерации в их недрах магнитного поля. Тот факт, что на Луне магнитное поле существовало в течение 700 млн. лет и исчезло 3,8 млрд. лет тому назад, подтверждает нашу модель.

*Модель ионосферного динамо.* Электрическую модель генерации МПЗ, изложенную выше, можно, в определенном смысле, считать гальвано магнитной схемой, типа Холловского динамо. Заметим, что, если оставаться в рамках нашей модели, то это не единственная, возможная схема генерации. В качестве альтернативной модели - 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.

Таблица 6.1

Электрические параметры модели: система холловских (1), радиальных токов и напряжений (2); ионосферы (3) и атмосферы (4).

	1(хол. токи)	2 (рад. токи)	3 (ионос. токи)	4 (атм. токи)
I (A)	$10^{10}$	$10^5$	$10^5$	$10^3$
P (Вт)	$10^{12}$	$10^{13}$	$10^8$	$10^9$
E (В/м)	$10^{-5}$	$10^3 - 10^8$	$10^{-3}$	$0.1 - 10^5$
U (В)	$10^2$	$10^8$	$10^3$	$10^6$
j (A/м <sup>2</sup> )	10	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-12}$
$\sigma$ (Ом м) <sup>-1</sup>	$10^6$	$10^{-9}$	$10^{-2}$	$10^{-14}$
S (м <sup>2</sup> )	$10^9$	$10^{11}$	$10^{10}$	$10^{14}$

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:

$$m \, d\mathbf{V}/dt = e\mathbf{E} + e \mathbf{V} \times \mathbf{B} - m\mathbf{n}(\mathbf{V} - \mathbf{U}). \quad (6.12)$$

Здесь  $\mathbf{V}$  – скорость заряженной частицы,  $\mathbf{U}$  – скорость нейтральной атмосферы. Приравняв  $m\mathbf{v}(\mathbf{V} - \mathbf{U})$  силе Лоренца  $e \mathbf{V} \times \mathbf{B}$ , можно определить скорость  $\mathbf{V}$ . Вектор  $\mathbf{U}$ , направленный поперек линий магнитного поля, индуцирует поле  $\mathbf{U} \times \mathbf{B}$ . Это наведенное поле вызывает электрический ток  $\mathbf{s} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B}$ , где  $\sigma$  - 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) -  $\sigma_0$ ; поперечная (Педерсена) -  $\sigma_1$ ; Холла -  $\sigma_2$ ; Каулинга -  $\sigma_3 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)/\sigma_1$ .

Ток, возникающий за счет ветра, может не удовлетворять условию:  $\text{div } j = 0$ . В любой точке, где  $\text{div } j \neq 0$ , происходит накопление электрических зарядов, и ионосфера становится электрически поляризованной. Поляризационное электростатическое поле -  $\nabla\Phi$  ( $\Phi$  – электрический потенциал) возрастает до тех пор, пока токи не станут горизонтальными и не дивергентными. Соответствующая этим условиям проводимость слоя  $\sigma'$  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  $\mathbf{E}_t$ . Ток определяется следующим образом:

$$\mathbf{j} = \mathbf{s}' \mathbf{E}_t = \mathbf{s}' \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B} - \nabla\Phi). \quad (6.13)$$

Этот ток течет в области экватора, в восточном направлении, образуя т.н. экваториальную токовую струю. В твердой, проводящей оболочке Земли наводится токовая струя противоположного направления. «Если бы Земля была идеальным проводником, а усложнения из-за горизонтальных вариаций поля и кривизны Земли можно было бы

пренебречь, то токи в ионосфере и на поверхности Земли были бы равны по величине и противоположны по знаку» (Ришбет, Гарриот, 1975, стр. 229). Природа этой струи имеет индукционный характер и обязана выполнению известного в физике правила Ленца.

*Динамо F-слоя.* 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 процессах 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  $E$ : 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  $\delta$ -слоях вблизи G-ядра и E-ядра. В первой модели, это холловские токи, во второй – индукционные, связанные с гидродинамическим переносом со скоростью  $U$ . Вероятнее всего, что в этих схемах мы рассматриваем одну и ту же модель генерации геомагнитного поля.

Сделаем несколько замечаний. Мы показали, что возможна, в принципе, генерация геомагнитного поля без включения в схему тороидального поля и дифференциального вращения внешнего ядра, необходимого для возникновения этого поля. По всей видимости, этих явлений в действительности не существует. Иначе, мы обязаны были бы обнаружить следы тороидального поля на поверхности Земли при измерении поля на геомагнитных обсерваториях.

Кроме этого, проведенный в последние годы анализ сейсмических данных по splitting функциям показал, что, по всей видимости, нет и дифференциального вращения ядра. По крайней мере, его не наблюдается в той области значений, которая используется при построении традиционной схемы магнитного динамо. Очевидно, что вблизи поверхности внутреннего ядра существует гидродинамический перенос. По всей видимости, именно это явление принято считать супервращением внутреннего ядра.

Продолжая аналогию между процессами, происходящими в атмосфере и F-слое, стоит отметить, что и в атмосфере обнаружено явление супервращения верхней атмосферы Земли (Матора, 2000)

У оппонентов нашей модели может возникнуть возражение, связанное с доказательством теоремы Каулинга (1959), относительно невозможности генерации поля симметричным относительно оси движением. Каулинг полагал, что для генерации дипольного поля необходимо симметричное круговое вращение проводящей жидкости. Однако в области жидкости, полагал Каулинг, поле равно нулю ( $H = 0$ ) и, следовательно, равна нулю сила  $m [v \times H]$ , приводящая жидкость в движение. В нашей модели принципиально наличие симметричного движения (симметричных токов), однако возражение Каулинга, - силы не имеет, так как система двухконтурная и начальное поле одного контура является затравочным для другого. И последнее замечание. Рассмотренные выше модели генерации поля (как и модель горячей Земли) не следует рассматривать как законченную теорию геомагнетизма. В книге, которую Вы держите в руках, это принципиально новое направление в теории геомагнетизма - только обозначено.

*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  $A$  и толщиной  $\delta$ , каждый) в противоположных направлениях (рис. 6-4). Первый “проводник” находится вблизи границы с внутренним ядром, второй - на границе с внешним. Как известно, цилиндрическая анизотропия обнаружена на границе внутреннего ядра. Скорость P-волн распространяющихся внутри цилиндра немного превышает скорость волн вне его. Рассмотрим, может ли наличие области генерации геомагнитного поля в виде цилиндрической структуры привести к увеличению скорости P-волн.

Обратимся к правой части рис. 6-2, откуда можно выявить, что возрастание скорости P-волн на 10 % примерно соответствует возрастанию температуры на 20 %. Нашу задачу можно переформулировать таким образом: Может ли цилиндрическая токовая диссипативная структура привести к локальному нагреву вещества требуемой величины. Как известно (Кузнецов, 1998-а), тепловой поток Земли  $Q$  составляет примерно  $3 \times 10^{13}$  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  $\zeta$  коэффициент, показывающий ту часть мощности, которая пошла на дополнительный

нагрев ( $\Delta T$ ) части поверхности внутреннего ядра ( $\zeta < 1$ ). Из наших рассуждений следует:  $\Delta T/T = 0.02 - 0.03$ ;  $T \sim Q/4\pi R^2$ ;  $\Delta T \sim zP/2\pi RA$ . Здесь  $R$  - радиус внутреннего ядра. Подставим полученное:

$$\Delta T/T = (2zP/Q) \times R/A. \quad (6.14)$$

Полагая коэффициент  $\zeta$  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  $\Delta p$ , вызванного влиянием магнитного поля на проводящую среду:

$$\Delta p = m_b H^2 / 8\pi,$$

где  $m_b$  - магнитная постоянная,  $H$  - напряженность магнитного поля (А/м):  $H = I/d$ ,  $I$  - ток,  $d$  - толщина слоя, в котором магнитное поле может вызвать дополнительное давление  $\Delta p$ . Для того, чтобы скорость Р-волн увеличилась на 1 %, дополнительное давление должно быть порядка  $10^9$  Н/м<sup>2</sup>. В этом случае толщина слоя  $d$  ( $d = [8\pi\Delta p/m_b I^2]^{1/2}$ ) оказывается порядка сотни метров, что значительно меньше, чем толщина  $d$  “проводника” (рис. 6-4) 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. 6-4). Если бы цилиндрической анизотропии не было, то тот же луч распространялся вдоль по линии  $L$ , представляющей собой угол  $150^\circ$ . Можно составить прямоугольный треугольник, одной из сторон которого является  $A/2$ , а гипотенузой –  $L/2$ . Угол у основания треугольника  $\alpha = 150/2 = 75^\circ$ . Будем считать, что Р-волна проходит расстояние  $A/2$ , быстрее чем  $L/2$ , на одну секунду. Положим, что скорость этой волны порядка 10 км/с, или, иначе,  $L/2 - A/2 = 10$  км, а  $A/L = \sin \alpha$ . Отсюда высота цилиндра  $A \approx 500$  км.

*Латеральная анизотропия.* Выше мы отмечали, что методами travel time и splitting-функций обнаружена латеральная анизотропия внутреннего ядра. Она меньше цилиндрической, но, тем не менее, представляет несомненный интерес в плане понимания внутреннего устройства Земли и взаимосвязи её оболочек. Как было сказано, области внутреннего ядра, проецируемые на Тихий и Атлантический океаны - “медленные”. Области ядра, на которые проектируются материки, - более “быстрые”, скорости распространения Р-волн в этих регионах выше, чем в “медленных”. Если обратиться к рис. 6-2, можно видеть, что в непосредственной близости от границы внутреннего ядра повышение скорости волн соответствует уменьшению радиуса ядра, т.к.  $v_p$  возрастает к центру Земли:  $v_p \sim 1/R$ . Аналогичная ситуация наблюдается и на границе ядро-мантия. Оказывает ли влияние магнитное поле на латеральную анизотропию внутреннего ядра, или возможно ли их взаимное влияние? Чтобы ответить на эти вопросы, построим развертку амплитуды Н-компоненты геомагнитного поля по долготе в плоскости экватора.

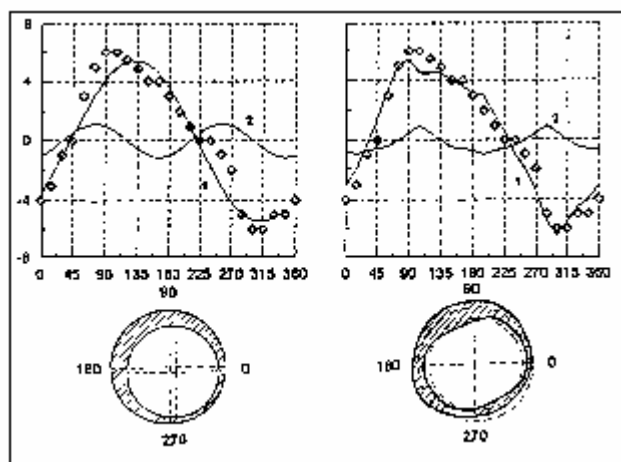


Рис. 6-5. Связь анизотропии внутреннего ядра и морфологии геомагнитного поля. Точки – переменная часть  $H$  компоненты в плоскости экватора. 1 – первая и 2 – вторая гармоники. На рис. а (слева) - разложение по  $\sin$ -функциям; б (справа) – по собственным функциям. Внизу: сечение F-слоя.

Воспользуемся данными о стандартном геомагнитном поле. Переменная часть величины  $H$ -компоненты (в микротеслах - мкТл), измеренная в плоскости экватора представлена на рис. 6-5-а и 6-5-б точками. Среднее значение  $H$ -компоненты на экваторе составляет примерно 32 мкТл. Полученную функцию  $H(j)$  можно разложить на две гармоники: первую и вторую (рис. 6-5-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 ( $\Delta H$ ), что и наблюдается в действительности. Так как максимум вариации  $H$ -компоненты приходится примерно на  $(120-135)^\circ\text{E}$ , то для реализации этого явления, внутренний круг следует сместить в противоположную сторону, - к  $300^\circ\text{E}$ . 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. 6-5-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  $H(j)$ , 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. 6-5-а, достаточно их несколько деформировать. В результате, на рис. 6-5-б мы получим сечение F-слоя в плоскости экватора, которое наилучшим образом описывает морфологию  $H$ -компоненты геомагнитного поля. Таким образом, оказывается, что обнаруженное явление латеральной анизотропии внутреннего ядра играет значительную роль в формировании морфологии геомагнитного поля. Иначе, структура оболочки внутреннего ядра оказывается хорошо связанной с морфологией горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Отметим ещё одно удивительное совпадение. Для получения соответствия модели реальному полю, пришлось сместить внутреннее кольцо



токовой системы (рис. 6-5-а) в направлении к  $300^\circ\text{E}$ . Надо сказать, что для наилучшего описания анизотропии внутреннего ядра, К.С.Creager, так же как и мы, сместил центр анизотропии в сторону  $300^\circ\text{E}$ .

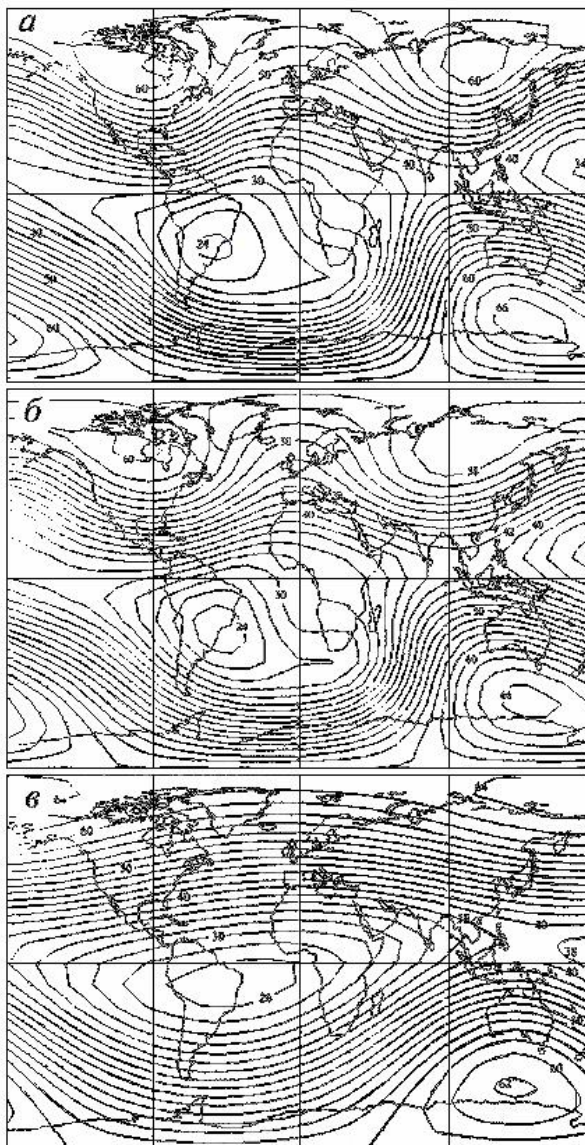


Рис. 6-6. Модуль интенсивности (в нТл) геомагнитного поля - *а*; модуль интенсивности поля, рассчитанный для системы дифференциальных токовых колец и 4-х радиальных диполей, соответствующих глобальным магнитным аномалиям - *б*; модуль интенсивности дифференциального токового кольца без радиальных диполей – *в* (Ботвиновский, 2000).

На рис. 6-6-б и 6-6-в приведены примеры расчета модуля геомагнитного поля. Дифференциальное токовое кольцо было смещено относительно оси вращения на угол порядка  $10^\circ$ . Радиальные диполи были размещены в местах расположения магнитных аномалий на радиусе шара, равном радиусу внутреннего ядра. Этот рисунок показывает, что токовая схема, принимаемая в нашей модели генерации геомагнитного поля, позволяет получить морфологию источника, соответствующую реальному полю Земли, изображенному на рис. 6-1 и 6-6-а.

### VI. 3. Магнитные аномалии, джерки, инверсии и фокусы векового хода.

*Аномалии.* На карте полного вектора МПЗ ( $F$ ) хорошо различимы (см. рис. 6-1, 6-6) 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 (Вернов и др. 1961). В областях этих ГМА наблюдалось резкое увеличение энергии и плотности потока частиц. Сотрудники группы академика С.Н. 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 (Oyama, Schlegel, 1984), и на космической станции с телескопом Хаббл (Pinto et al., 1992), 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 (Pinto et al., 1992). Как следует из этой работы, 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 (Petrova, 1990). Хорошо известно, что в момент инверсии магнитные полюсы движутся вдоль траекторий, приближающихся к ГМА (Constable, 1992; Clement, 1991; Tric et al., 1991; Kuznetsov, 1999).

*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 6-1 и рис. 6-7) с максимальной скоростью изменения общей интенсивности поля -200 нТл/год; его координаты  $0^\circ$ ,  $40^\circ$  W.
- Цейлонский ФВХ (№ 11): + 100 нТл/год,  $10^\circ$ N,  $80^\circ$ E.
- Индонезийский ФВХ (№ 9): - 40 нТл/год,  $15^\circ$ S,  $110^\circ$ E.
- Тихоокеанский ФВХ (№ 10): + 60 нТл/год,  $15^\circ$ S,  $100^\circ$ W.

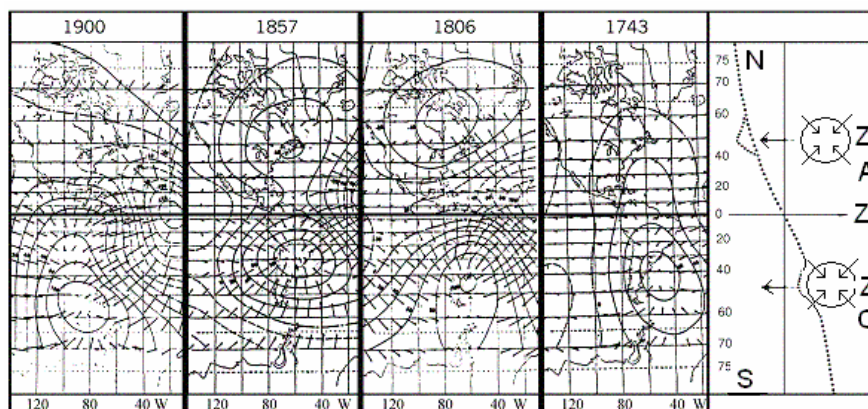


Рис. 6-7. Слева - фокусы векового хода (ФВХ) в различные эпохи. Показана динамика бифуркации (1743) и направления дрейфа (1857, 1900) ФВХ № 5 (Yukutake, Tachinaka, 1968). Справа, модель ФВХ: точки - модуль геомагнитного поля. В северном полушарии ФВХ – антициклон (А), в южном, – циклон (С). Стрелки в круге - линии тока.

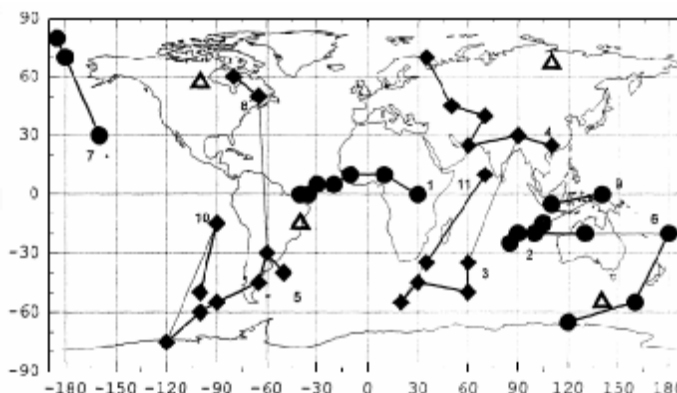


Рис. 6-8. Карта дрейфа фокусов векового хода с 1743 по 1985 г.г. по данным Yukutake и Tachinaka (1968). Треугольники - ГМА. Номера ФВХ приведены на Схеме 1.

Анализ аналогичных карт, построенных для более ранних лет, показал, что ФВХ представляют собой области, дрейфующие по поверхности Земли. ФВХ, как правило, зарождаются на экваторе и либо дрейфуют вдоль него в западном направлении (см. схему 6-1 и рис. 6-7, 6-8), либо, так же дрейфуя к западу, перемещаются при этом к полюсам и, постепенно уменьшая свою интенсивность, распадаются (Yukutake, Tachinaka, 1968). В частности, хорошо известен т.н. Каспийский ФВХ, который дрейфовал по территории России и распался на полярном Урале (Почтарев, 1978).

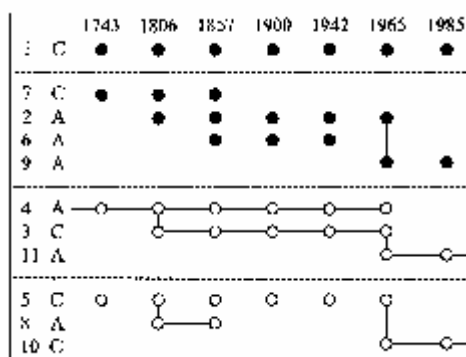


Схема 6-1. Эволюция фокусов векового хода. (С-циклоны; А-антициклоны).

ФВХ происходившие за последние 250 лет по картам, приведенным в (Yukutake, Tachinaka, 1968), изображены на схеме 6-1. 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.

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 (Кузнецов, 1995). 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 рисунках 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).

*Инверсии.* Инверсия геомагнитного поля была обнаружена в 1906 году Брюнесом при палеомагнитных исследованиях в лаве из Центрального массива во Франции (Джекобс, 1979). 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 (Тюленева, 1988). 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 (Петрова, Сперантова, 1986). Важным параметром является время инверсии, или, что, то же самое, средняя скорость дрейфа магнитного полюса, т.к. длина его пути известна. Общепринято, что время обращения составляет в среднем от 1000 до 10000 лет, хотя есть оценки и в сто тысяч лет (Паркинсон, 1986). Однако есть и совсем другие оценки, к примеру, обратимся к работе (Вадковский и др. 1980), 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 (Clement, 2004) 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.

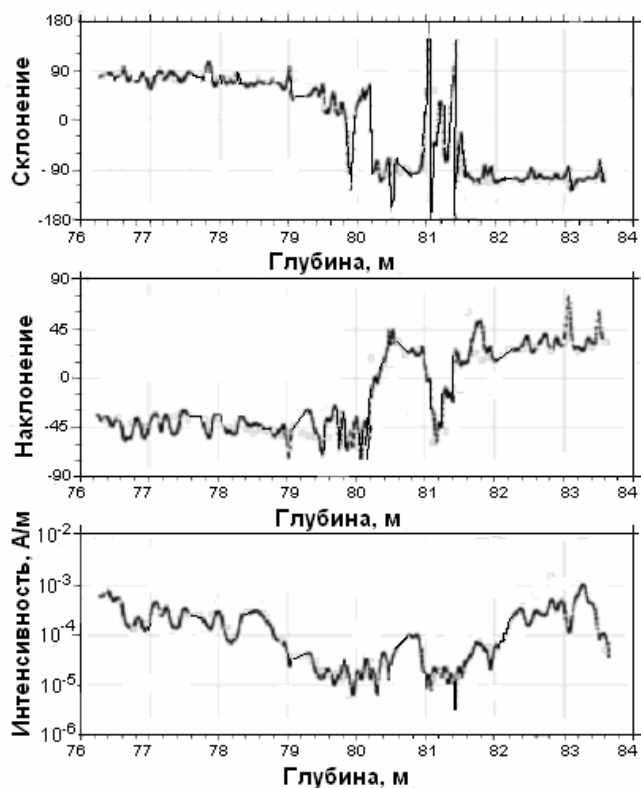


Рис. 6-9. Изменение параметров геомагнитного поля в период инверсии Брюнес-Матуяма: склонения, наклонения и полного модуля поля, в зависимости от глубины осадков (т.е. текущего времени) для Южной Атлантики (Yamazaki, Oda, 2001).

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. 6-9, на котором приведены данные (Yamazaki, Oda, 2001), 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, по данным (Yamazaki, Oda, 2001), 7 тыс. лет. Рис. 6-9 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. 6-9, 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

Таблица 6-2. Инверсии и экскурсы.

(Petrova, 1990; McDougall, et al., 1992; Mc Fadden, Merril, 1995; YANG Taibao, et al., 2004).

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 - 1.060 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

Интересный анализ характера инверсий выполнен Рузмайкиным и Трубихиным (1992). 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 (см. рис. 3-б). В течение этого периода поле несколько раз меняло полярность на очень короткие периоды времени и возвращалось затем к прежней полярности. Такие кратковременные события, в отличие от инверсий, принято называть экскурсами.

*Экскурсы.* Периоды современной (положительной) полярности поля (N) и периоды отрицательной полярности (R), длительность которых составляет порядка одного млн. лет, прерываются короткими изменениями поля, называемыми экскурсами. Разделение в значительной степени условно. По всей видимости, природа этих явлений едина.

Обсуждая проблему экскурсов, Петрова и Поспелова (1992) отмечают три важных момента:

- теории динамо не могут объяснить таких резких и кратковременных изменений поля, как экскурсы;
- экскурс, как и инверсия, - это глобальное явление;
- экскурсы происходят во время цикла понижения магнитного момента Земли.

Последнее заключение подтверждается недавно опубликованными данными о поведении магнитного поля Земли в течение последних 800 тыс. лет (Guyodo, Valet, 1999), где авторы показали, что экскурсы происходят в ситуации, когда дипольный момент опускается ниже критической отметки в  $4 \times 10^{22}$  А м<sup>2</sup>.

*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 (Courtilot et al., 1978), в которой авторы обратили внимание на поведение вековой вариации Y-компоненты МПЗ в Европе в 1969-70 гг. (см. рис. 6-10). Необычность поведения поля выражалась в том, что ряд среднегодовых значений  $Y(t)$ , начиная с 40-х годов и до конца 60-х, для каждой обсерватории, хорошо описывался параболой, а затем наблюдалось резкое расхождение наблюдаемых данных и модели. Введение второй параболы для данных после события 1960-70 гг. устраняло это расхождение. Именно это явление и получило название джерк. Начиная с этой работы, было выполнено много исследований, в которых аналогичная методика применялась как для оценки джерка 1969-70 г.г., так и для выделения аналогичных джерков в другие эпохи (Alexandrescu et al., 1996). Для обнаружения джерка авторы строят график зависимости первой производной компоненты геомагнитного поля от времени. Как правило, эта зависимость выглядит как наклонная прямая. Если в какой-то момент времени, эту прямую нельзя продолжить, а следует построить другую, под другим углом, то это событие и есть джерк (рис. 6-11). 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.

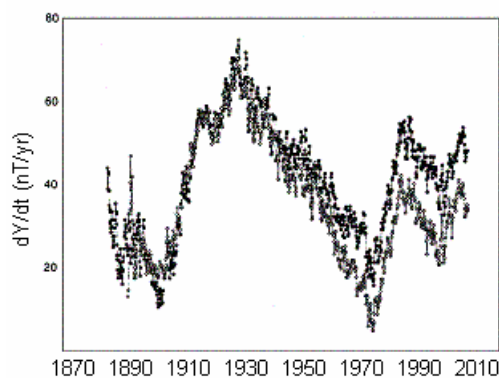


Рис. 6-10. Вековые вариации восточной компоненты геомагнитного поля ( $dY/dt$ ). Резкие изменения производной по данным обсерватории Niemegek, с 1883 по 2000 гг., - джерки (Mandea et al., 2000).

Известны и хорошо изучены джерки (De Michelis, et al., 1998), произошедшие практически на всей территории Земли, но с различной интенсивностью в: 1969-1970, 1979-1980, 1989-1992 годах. В (Mandea et al., 2000) делается предположение о том, что в 1999 г. возможно начался новый джерк и прогнозируется появление следующего, - ранее, чем через 10 лет (рис. 6-10, рис 6-15). Этот рисунок показывает, что «размах» колебаний

величины производной Y-компоненты и их длительность со временем уменьшаются. (Как было показано в Главе III, подобная зависимость проявляется, например, во временном ходе температуры поверхности Земли).

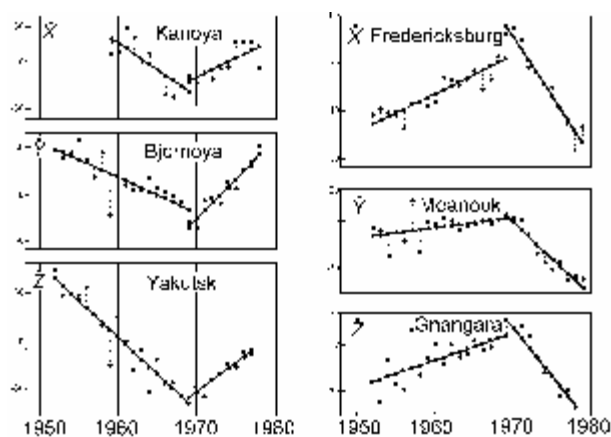


Рис. 6-11 Джерки 1969-70 г.г. по данным обсерваторий (Madden, Le Mouel, 1982).

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 (Madden, Le Mouel, 1982) (см. рис. 6-12). 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. 6-12). 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.

#### *Физические модели пространственных и временных особенностей геомагнитного поля.*

**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 теплоперенос, 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 (Кузнецов, 1995).

Разность температуры на F-слое, это (по нашей модели) разность между температурными кривыми спинодали и бинодали. (Это температура вещества, находящегося вблизи критической точки. Как отмечалось, спинодалью называется кривая, показывающая границу термодинамической устойчивости жидкости, бинодаль – кривая



существования двух фаз жидкость-пар. Область между спинопалью и бинопалью - метастабильное перегретое состояние вещества. В нашей модели, бинопаль соответствует температуре на границе E-ядра и F-слоя, спинопаль - температуре на границе F-слоя и G-ядра).

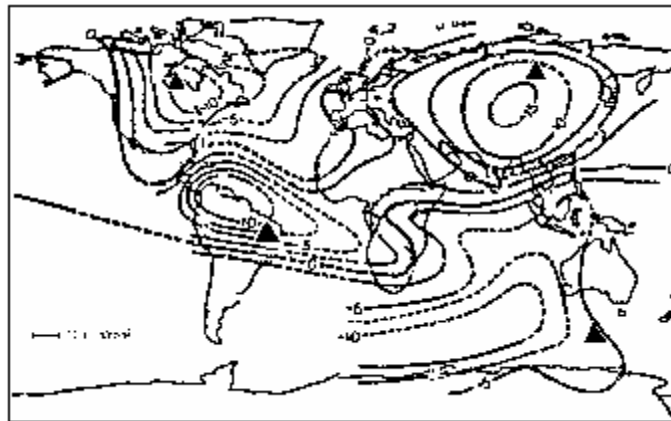


Рис. 6-12. Распределение интенсивностей джерка-1969 (Madden, Le Mouel, 1982). Треугольники – ГМА.

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:

$$Ra = gb l^3 \Delta T / h \zeta \quad (6.15)$$

$g$  - величина ускорения силы тяжести,  $b$  - коэффициент объемного расширения,  $l$  - толщина F-слоя,  $\Delta T$  - перепад температуры на слое,  $h$  - вязкость вещества,  $\zeta$  - температуропроводность; значительно больше критического, что означает возможность протекания конвекции в F-слое. Температура вещества F-слоя вблизи границы с внутренним ядром выше, чем у границы с внешним. При конвекции в некоторых областях F-слоя вещество будет опускаться, в других - подниматься. В таком слое возможна турбулентная конвекция, в отличие от стационарной конвекции во внешнем ядре.

Предположим, что в трех областях F-слоя "холодное" вещество опускается в направлении к G-ядру, а в одной – поднимается, вынося при этом тепло из F-слоя. Наверняка существуют и другие области, в которых происходит нечто подобное, но там процессы происходят значительно менее интенсивно, чем в этих четырех, которые явно выделяются на фоне остальных. Будем считать, что эти выделенные области соответствуют глобальным магнитным аномалиям, причем, первые три, это: Канадская, Сибирская и Бразильская аномалии, а четвертая (где происходит подъем вещества) - Южная ГМА. Вещество F-слоя, обладающее достаточно высокой проводимостью, способно захватить с собой "вмороженную" в него силовую линию дипольной части МПЗ и увлечь ее за собой при вихревом движении проводящего вещества поперек слоя. Нисходящий поток проводящего вещества в Северном полушарии за счет влияния кориолисовых сил начинает вращаться по часовой стрелке (аналогично антициклону в атмосфере и океане). Захваченное потоком магнитное поле вращается с ним со скоростью  $v$ , генерируя при этом магнитную индукцию  $B_A$ , иначе, поле аномалии, которая (по модели) не стационарна ( $\nabla B / \nabla t \neq 0$ ).

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.  $\alpha$ -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 вращенного магнитного поля  $B_t$ :  $j = s[E + aB]$ . 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 вращенное поле  $B_t$  (см. рис. 6-13).

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

$$\partial B / \partial t = \text{rot}(v \wedge B) + h_M \nabla^2 B. \quad (6.16)$$

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  $\text{rot}(v \wedge B) = 0$ , 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  $h_M$  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  $h_M$  равна:

$$h_M = (ms)^{-1} = 1-10 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Скорость потока можно оценить, приравняв единице величину магнитного Рейнольдса:

$$Re = \nu L / h_M.$$

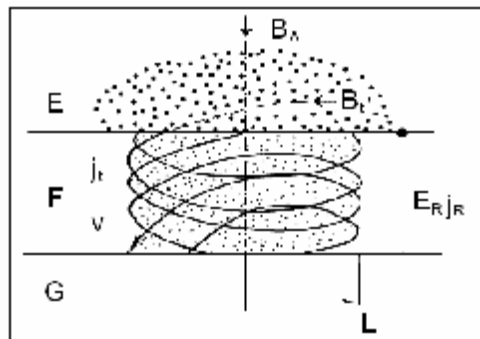


Рис. 6-13. Схема генерации магнитного поля глобальной аномалии как вихря Россби в тонком F-слое. Описание в тексте.

Величина  $\nu$  оказывается порядка  $10^{-4}$  м/с (3 км/год). (Сравниваем полученную оценку  $\nu$  со скоростью западного переноса, полученную нами по скорости дрейфа ФВХ  $\approx 20$  км/год). Необходимо оценить степень влияния магнитных сил на величину и направление скорости  $\nu$ . Обычно оценка степени влияния, т.е. оказывает ли магнитное поле влияние на гидродинамику, или она остается пуазейлевой, состоит в определении числа Гартмана  $G$ :

$$G = BL(s/rh)^{1/2}, \quad (6.17)$$

где  $r$  - плотность среды, а  $n$  - кинематическая вязкость (примем  $h \approx 10^6 - 10^8$  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  $t = L^2/h \approx 10$  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 (Clement, 2004) 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.

*Аналогия с циклонами и антициклонами.* Спиральное движение потока в области генерации ГМА можно уподобить близким, по сути, циклоническим явлениям, происходящим в атмосфере и океане. В этом плане ГМА: Канадская, Сибирская и Южная - антициклоны, а Бразильская ГМА - циклон. Здесь можно проследить несколько аналогий. Во-первых, по направлению вращения потока, во-вторых, по увеличению поля, как аналог атмосферного вихря. В области атмосферных антициклонов растет давление, в области антициклонов - магнитных аномалий, - возрастает величина магнитного поля. Приведем ещё одну интересную аналогию из области астрофизики. В атмосферах Юпитера и Сатурна сравнительно недавно обнаружены стационарные вихри (вихрь «Большое Красное Пятно» на Юпитере известен более 300 лет), причем, и на *Юпитере*, и на *Сатурне* длительное время устойчиво существуют *по три антициклона и одному циклону*. Эта циклон-антициклонная асимметрия не нашла однозначного объяснения (Незлин, Снежкин, 1990).

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  $a$ , и изменение проводимости  $S$ , 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. 6-3

Вихри Юпитера		Вихри Сатурна		ГМА		
Большое красное пятно	22° S	Большая Берта	5° N	Сибирская	67° N	A
Малое красное пятно	19° N	Коричневое пятно	42° N	Канадская	58° N	A
Коричневый овал	14° N	Ультрафиолетовое пятно	24° N	Бразильская	15° S	C
Белый овал	34° S	Пятно Анны	55° S	Антарктическая	55° S	A

В атмосферах больших планет замечена т.н. циклон - антициклонная асимметрия: циклонов всегда много меньше, чем антициклонов. Это связано с тем, что антициклоны (А), это солитоны, в то время как циклоны (С), - нет. Однако, если «рождается» пара циклон-антициклон, то они оба могут быть солитонами (Незлин, Снежкин. 1990). 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 6-3 и рис. 6-14).

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 (то же вихрей Россби) можно наблюдать, если обратиться к схеме 6-1 и рис. 6-14. Вихри Россби являются продуктами самоорганизации структуры, возникающей в жидком, вращающемся, подогреваемом снизу слое. На Юпитере и Сатурне влияние Солнца на динамику их атмосфер, - 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.

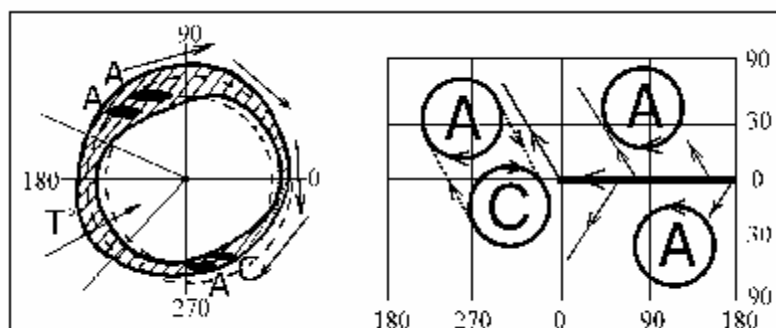


Рис. 6-14. Модель глобальных магнитных аномалий как циклонов и антициклонов. Слева проекция вихрей на F-слой, стрелками показано направление гидродинамического переноса. Стрела поперек слоя – температурный градиент. Выделенная область соответствует Тихому океану. Справа размещение антициклонов («А», и пара «А-С» - солитоны). Линия вдоль экватора – гидродинамический перенос, ответвления показывают направления «рингов» (ФВХ).

*Модель 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  $\sim 100$  тыс. лет. Что же касается джерков, то в литературе по геомагнитному полю отсутствуют даже попытки найти объяснение таким явлениям. Как будет показано ниже, явление возникновения джерков 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 намёка 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, «работа» системы поддержания температуры в F-слое.**

Согласно нашей модели, ГМА представляют собой области, в которых происходит конвергенция потока, реализуется спиральное движение потока и т.д. Именно здесь, в основном, «работает» механизм выравнивания температуры F-слоя. Эту роль выполняет механизм конвекции. Режим регулирования температуры может изменяться по мере того, как температура среды будет приближаться к температуре, при которой происходит смена режима конвекции. Очевидно, что такие изменения наиболее резко будут проявляться именно в областях конвергенции потока, т.е. в областях генерации ГМА. Представим себе, что в F-слое, по мере конвективного теплового регулирования, была достигнута оптимальная температура  $T_o$ . Предположим, что система терморегулирования, поддерживающая эту температуру в интервале  $T_o \pm \Delta T$ , не линейна. Закон изменения температуры может иметь вид:  $T^2 \sim kt$ , что вполне допустимо. Скорость изменения температуры оказывается в этом случае:  $dT/dt \sim t^{-1/2}$ . Затем, в момент времени  $t$  ( $T = T_o + \Delta T$ ) в системе меняется знак производной и температура начинает уменьшаться, иначе, происходит уменьшение скорости:  $d^2T/dt^2$  (рис. 6-15). 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 в (Valet, Meunadler; 1993) зависимость «броска» (jump) величины  $B$  ( $\cdot 10^{22}$  А м<sup>2</sup>) 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. Становится понятной пространственная взаимосвязь джерков с ГМА.

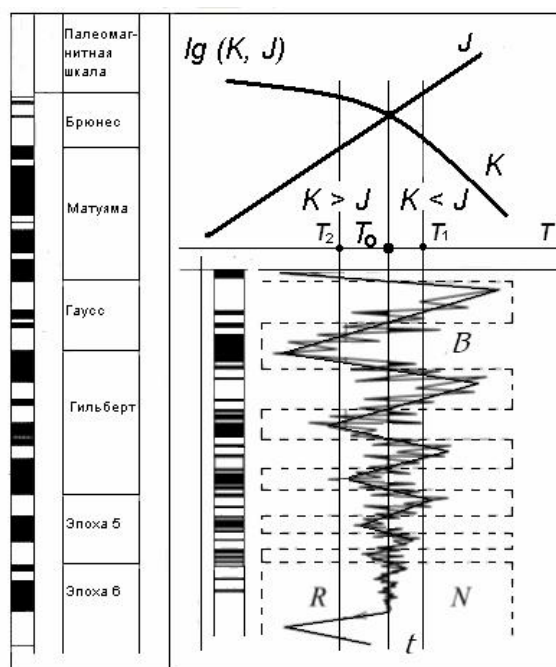


Рис. 6-15. Слева - палеомагнитная шкала. Справа - наша модель изменений полярности поля. Зависимость явлений, связанных с «работой» фазового перехода во времени и их отражение в геомагнитном поле.

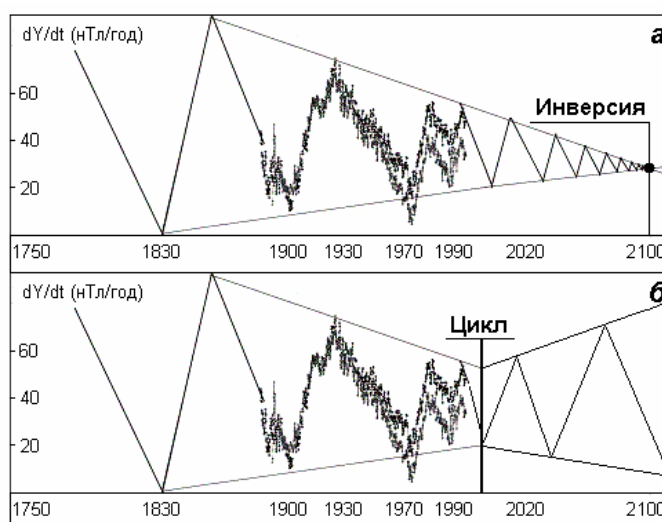


Рис. 6-16. Изменение частоты джерков со временем (прогноз). Выход системы на стационарное состояние и начало инверсии – а. Уменьшение частоты джерков после 2000 и цикличность – б.

*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 (Незлин, Снежкин, 1990).

Перенос сведений о синоптических вихрях на ситуацию с ФВХ позволяет оценить ряд гидродинамических параметров среды (Кузнецов, 1995). 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  $\approx$  1 км. Эти предположения позволяют оценить величину вязкости вещества F-слоя. Она оказывается порядка  $10^6 - 10^7$  Пуаз, что неплохо согласуется с общепринятыми представлениями о вязкости вещества земного ядра. Привязка ФВХ - циклонов (см. рис 6-8 и схему 6-1) к экватору обязана, по всей видимости, причине, о которой шла речь выше – не геострофичностью переноса в области экватора. Кроме этого, возможно, как следует из нашего объяснения явления цилиндрической анизотропии, зона экватора оказывается немного «горячее» за счет диссипативных процессов, связанных с генерацией геомагнитного поля.

#### VI. 4. Движение магнитных полюсов.

*Северный магнитный полюс.* Инструментальное определение координат положения северного магнитного полюса (СМП) было начато капитаном Россом в 1831 г, когда он оценил координаты СМП:  $70^\circ 5' N$  и  $96^\circ 46' W$ . В течение последующих 70 лет измерений положения СМП не проводилось. В 1904 году во время экспедиции Амундсена были определены координаты СМП:  $70^\circ 30' N$  и  $95^\circ 30' W$ . Оказалось, что северный магнитный полюс за последующие за этим наблюдением 70 лет, переместился по направлению к Северному географическому полюсу, в точку, отстоящую от него всего на 50 км: (см. рис. 6-17). Этап современных наблюдений положений СМП начинается с измерений, проведенных канадским магнитологом П. Серсоном (Serson, 1981) в 1948 г. С тех пор примерно раз в 10 лет наблюдения за дрейфом СМП ведутся сотрудниками канадской обсерватории Crescent (Newitt, Nablett; 1986); (Newitt, Barton, 1996); (Newitt et al. 2002). Измерения положения СМП 1999 г. показали, что скорость дрейфа СМП по сравнению с 1994 г увеличилась в 1.5 раза за последние 5 лет и достигла значения в 26 км/год. В (Newitt et al., 2002) сообщается о совместном (Natural Resources Canada и Bureau de Recherches Geologiques et Minières, France) измерении положения СМП в мае 1999 и, повторно, в мае 2001. Авторы, участники этих экспедиций (Newitt et al., 2002) определили положение СМП и оценили скорость современного дрейфа его выше 40 км/год.

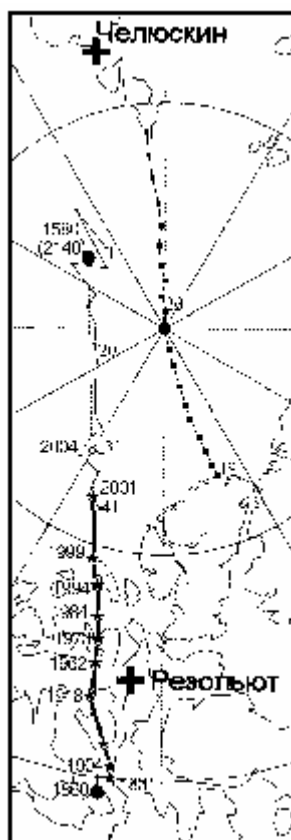


Рис. 6-17. Карта дрейфа северного магнитного полюса (Newitt, Niblett, 1986). Линия с точками (пункты наблюдений) – путь лыжной экспедиции: СССР - Северный полюс – Канада, 1988 (Weber et al., 1990). Линия из точек наш прогноз положений СМП. Ломаная линия с точками – положения виртуальных магнитных полюсов по данным измерений (Кузнецов и др., 1990).

Анализируя эффект увеличения скорости дрейфа СМП, обнаруженный в течение последних 30 лет наблюдений, авторы (Newitt et al., 2002) высказывают предположение, что ускорение полюса каким-то образом связано с явлением Jerk-1969 и следующими за ним джерками. Возможно, авторы правы, и действительно это явление связано с дрейфом полюса и даже оказало какое-то влияние на ускорение его дрейфа, однако, прежде чем обсуждать это предположение, обратимся к данным, характеризующим направление и скорость дрейфа СМП за значительно больший период времени, чем последние 30 лет его ускорения.

Определение местоположения северного магнитного полюса (СМП), проведенное в 1994 году, показало, что полюс за прошедшие 10 лет не изменил направления своего движения. Этому направлению СМП следует, по крайней мере, 90 лет (см. рис. 6-17). Средняя скорость дрейфа в течение этого периода времени - немного возросла, она достигла 15 км/год, против 11 км/ год, в предыдущие 11 лет (Newitt, Niblett, 1986; Newitt, Barton, 1996).

Обратим внимание на то, как происходил дрейф СМП в течение последних 100 лет и, особенно, в самое последнее время. Рисунок 6-17 показывает направление дрейфа СМП, которое отмечено звездочками, причем около каждой приведен год измерения его положения. Видно, что СМП дрейфует вдоль линии, практически соединяющей две обсерватории Резольют Бей и Мыс Челюскин. В большем масштабе, эта линия соединяет две глобальных магнитных аномалии, одна из них расположена в Канаде, а другая, - в Сибири (рис. 6-18). Рисунок 6-17 показывает, что направление дрейфа СМП совпадает с местоположением виртуальных магнитных полюсов (ВМП), определенных во время совместной Канадско-Российской лыжной экспедиции 1988 г. Перед началом этой



экспедиции нами был сделан предварительный прогноз положений ВМП. Наш прогноз базировался на известных измерениях компонент магнитного поля в Арктике (Кузнецов и др., 1990). Вычисленные по прогнозу координаты ВМП практически совпали с координатами, измеренными на значительной части пути экспедиции. Очевидно, что характер дрейфа СМП не случаен. Этот факт оставляет надежду понять природу его дрейфа.

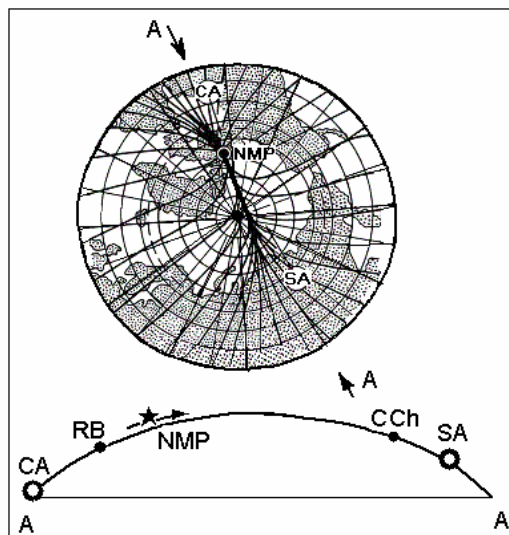


Рис. 6-18. Структура магнитных силовых линий в Арктике (Норе, 1959). На схеме: CA, SA - ГМА, RB, CCh – обсерватории.

ГМА, инверсии, экскурсы, джерки и ФВХ, это “особые точки” геомагнетизма, в которых это явление проявляется наиболее ярко. Мы уже упоминали, что такие “проявления” должны логично “вписываться” в общую концепцию. К таким особым точкам с полной уверенностью можно отнести магнитные полюса и их дрейф. Нельзя сказать, чтобы движение СМП, как и южного магнитного полюса (ЮМП), вызывало бы повышенный интерес у магнитологов. По-видимому, отсутствие интереса оправдывалось тем, что в модели магнитного динамо не существовало ни одной правдоподобной идеи, связанной с дрейфом полюсов. Первым, кто высказал мысль о возможной связи дрейфа СМП с глобальными магнитными аномалиями (ГМА) Канадской (CA) и Сибирской (SA), был канадский магнитолог Р. Хоуп (Норе, 1959). В своей статье он изобразил магнитные силовые линии в Арктике, которые как бы сжимались в районе дрейфа СМП в некий “жгут” (см. рис. 6-18). Хоуп считал, что СМП перемещается по линии, соединяющей обе аномалии. Идеи Хоупа не нашли должного внимания среди магнитологов и были забыты.

Двадцать лет назад автором предложена модель, согласно которой движение СМП определялось влиянием трех (а не двух, как у Хоупа) независимых друг от друга источников магнитного поля (Кузнецов, 1984). Два из них это ГМА, а третий (или точнее, первый) - это источник основного (дипольного) поля Земли. Основное отличие этой модели от общепринятых представлений о магнитном поле Земли заключалось в том, что ГМА представлялись не недипольной частью, как это обычно принято, а достаточно интенсивными источниками, квазинезависимыми от основного поля (Кузнецов, 1990). Интенсивность источников ГМА оказывается сравнимой с интенсивностью источника основного поля. Компьютерное моделирование магнитного поля в Арктике, как суммы независимых источников, дает результат, весьма схожий реальной ситуацией (рис. 6-6).

Разработанная модель позволяет делать прогноз положения СМП в зависимости от интенсивностей источников поля ГМА. При этом полагается, что интенсивность дипольного источника постоянна. На основе этой модели и интерполяции интенсивности магнитного поля в районе ГМА к 1994 году (по данным полярных магнитных

обсерваторий) был составлен прогноз местоположения СМП-1994. Прогнозируемое положение СМП практически совпало с определением его по результатам наблюдений во время экспедиции к СМП в 1994 году (Кузнецов, 1996).

*Прогноз положений СМП.* Систематические наблюдения за склонением и наклонением начинаются примерно с 1540 года. Наиболее полные данные известны для Лондона на обсерватории в Хартленде (координаты: 51° 00' N, 355° 31' E), после перевода ее из Гринвича и Абингера. На рисунке 6-19 представлены сглаженные результаты наблюдений за I и D, опубликованные впервые Бауэром для Лондона и Бостона (Bauer, 1895) и впоследствии повторенные в нескольких монографиях по геомагнетизму. Взглянув на этот рисунок, можно видеть, что, по крайней мере, в течение 450 лет наша модель движения СМП не противоречит реально наблюдаемой ситуации. Более того, анализируя результаты наблюдений склонения и наклонения в Лондоне и Бостоне (для Бостона данные наблюдений, так как они заканчивались 1900 годом, редуцированы по результатам наблюдений обсерватории в Оттаве), можно получить информацию о том, как в действительности перемещался СМП в течение последних 450 лет. Если СМП двигался по эллипсу, как это показано на рисунке 6-19, то вполне возможно, что определение местоположения СМП, сделанное Дж. Россом, было ошибочное, и в действительности СМП в 1831 году находился восточнее примерно на 100 км. Если мы правильно восстановили дрейф СМП за этот период времени, то он перемещался в полном соответствии с нашей моделью. Что же касается возможной ошибки Джеймса Росса, то при существовавшем в то время техническом уровне измерений и отсутствии контроля за временными вариациями магнитного поля, это вполне допустимо. Можно добавить еще один аргумент в пользу того, что Росс ошибся. Анализ данных по магнитному полю в период с 1550 по 1990 г.г. показывает плавный характер его изменения в 1830-1900 гг., что должно было бы быть не так, если бы Росс не ошибся. Действительно, СМП дрейфовал, начиная с 1904 года с более или менее постоянной скоростью (примерно 10 км/год). В то же время как за 70 с лишним предыдущих лет (1831-1904) он "прошел" всего 50 км. Нам представляется, что наша модель движения СМП, когда он сначала дрейфовал к югу, а затем (в 1860 году) изменил направление дрейфа и стал двигаться к северу, подкрепленная данными по дрейфу ВМП, более логична, чем тот его путь, который изображен на рис. 6-17, 6-18. Таким образом, дрейф СМП можно представить как периодическое, колебательное движение.

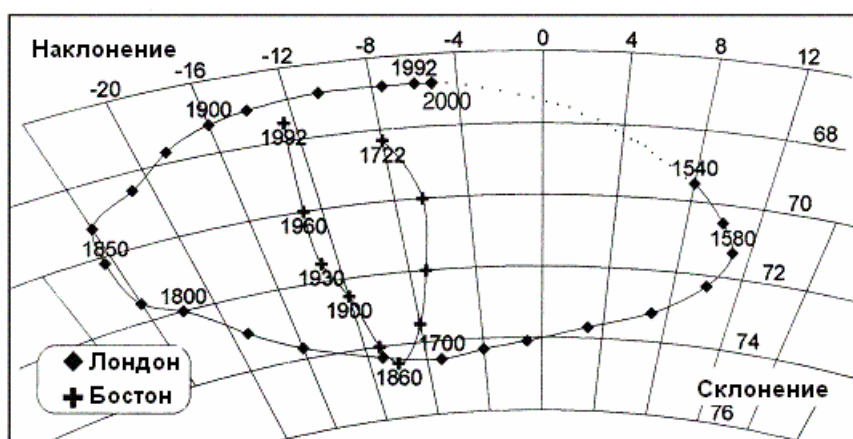


Рис. 6-19. Склонение и наклонение на обсерваториях Лондона и Бостона (Бауэр, 1895).

Обратимся к рисунку 6-20, иллюстрирующему нашу модель дрейфа СМП, на которой основан прогноз его местоположений. При обсуждении модели дрейфа магнитных полюсов будем пользоваться нижеследующим определением. Магнитный полюс - условная точка на земной поверхности, в которой равна нулю горизонтальная

компонента магнитного поля Земли. Если по какой-то причине в двух точках [1] и [2], где горизонтальные компоненты магнитного поля Земли ( $H$ -компоненты) имеют противоположные направления, их величина меняется, - положение точки, где эти величины уравниваются друг друга ( $H = 0$ ), - меняется (см. рис. 6-20-б). При этом магнитный полюс перемещается между этими точками. Можно ли предсказать, в какой точке окажется магнитный полюс в будущем? По-видимому, можно, если в магнитном поле Земли, по крайней мере, в районе полюса, не наблюдается резких неоднородностей: как пространственных, так и временных (к которым, в частности, относятся и джерки).

Магнитные обсерватории ведут регулярное наблюдение за вариацией величин компонент магнитного поля Земли. Наиболее близки к СМП две обсерватории: Резольют Бей в Канаде и Мыс Челюскин – в России (рис. 6-18). Контролируя величины  $H$ -компонент на этих обсерваториях при условии, что характер их изменения вполне логичен, можно предсказать местоположение СМП в будущем. Этот прием использовался при прогнозе положения СМП в 1994 (Кузнецов, 1996). На рис. 6-20-а показаны переменные во времени (1973 – 2000 г.г.) составляющие  $H$ -компонент, измеренные на этих обсерваториях  $H_1(t)$  и  $H_2(t)$ , а также их разность  $\Delta H = H_1(t) - H_2(t)$ . Вектора  $H$ -компонент на этих обсерваториях направлены навстречу друг другу. К примеру, значения  $H$ -компонент на этих обсерваториях: Резольют-Бей (1989)  $H_1 = 1041$  нТл; Мыс Челюскин (1990)  $H_2 = 3160$  нТл.

Для упрощения модели примем, что в 1984 г. разность между их величинами равна нулю:  $H_1 - H_2 = 0$ , и в дальнейшем будем рассматривать только переменную часть этих величин. Для удобства представления, разность между переменными составляющими величин  $H$ -компонент (кривая 3):  $\Delta H = H_1 - H_2 + k$ , где  $k = -400$  нТл.

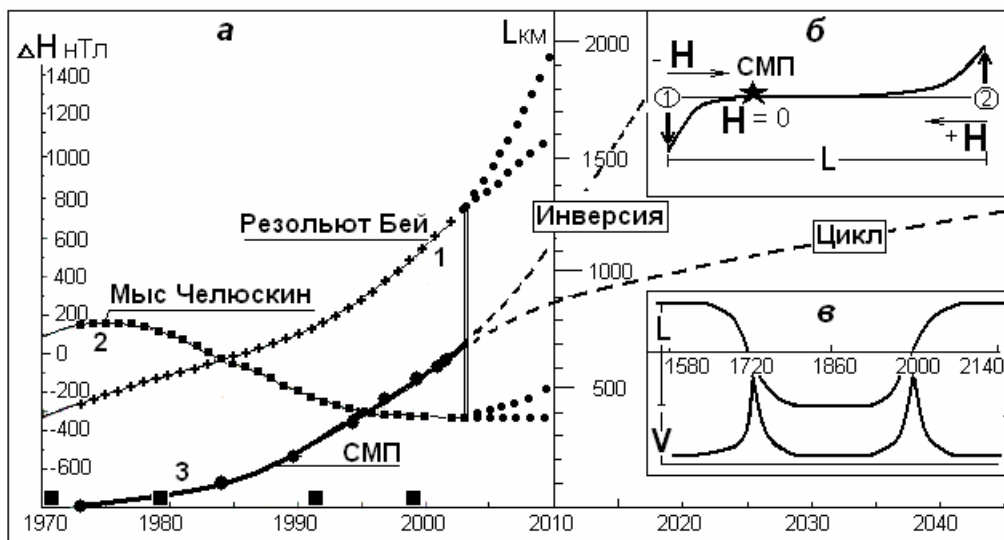


Рис. 6-20-а. Вариации  $H$  компоненты: 1 - на станции Резольют Бей; 2 - на станции Мыс Челюскин. 3 - разность между величинами этих компонент ( $\Delta H$ ) – положения СМП по шкале ( $L$  км, относительно 1973 г, где  $L = 0$ ). Черные квадраты на шкале времени - джерки [Mandea et al., 2000].

Рис. 6-20-б. Схема дрейфа СМП (звездочка) между двумя квазиисточниками поля 1 и 2.

Рис. 6-20-в. Циклический характер дрейфа СМП -  $L(t)$ , вариации скорости дрейфа СМП -  $V$  ( $V = dL/dt$ ) в интервале 1580 – 2140 гг.

Предположим, что путь, проходящий СМП  $L(t)$ , линейно связан с  $\Delta H(t)$ :  $L(t) \sim \Delta H(t)$ . Рассмотрим линейный участок дрейфа СМП (рис. 6-17), примем:  $L = 0$ , для СМП-1973. Принятые предположения позволяют получить зависимость:  $L(t)$ (км) – кривая 3 на рис. 6-20-а. Этот рисунок показывает, что существуют две возможности поведения  $H$ -компонент,

регистрируемых на обсерваториях Мыс Челюскин и Резольют Бей. Последние наблюдения на этих обсерваториях известны до 2004 г и отмечены на рисунке двойной чертой. Последние измерения положения СМП проведены в 2001. Если, к примеру, в будущем, величина  $H$ -компоненты в районе обсерватории Мыс Челюскин  $H_2(t)$  начнет возрастать, а на обсерватории Резольют Бей  $H_1(t)$  – уменьшаться, то, в принципе, может оказаться возможной ситуация, когда скорости увеличения  $H$ -компонент на обеих обсерваториях окажутся равными и  $\Delta H = 0$ . В такой ситуации полюс остановится и может начать двигаться в обратном направлении. Существует вероятность того, что это произойдет именно в точке 2140 (рис. 6-20-в). В этом случае дрейф СМП имеет колебательный характер. Если этого не произойдет и  $H_2(t)$  будет продолжать уменьшаться, а  $H_1(t)$  – возрастать, СМП может «проскочить» точку 1580 (2140) (рис. 6-17), и устремиться навстречу с ЮМП. В этом случае существует вероятность того, что на Земле началась инверсия, либо очередной экскурс.

Результаты измерений величин  $H$ -компонент на полярных обсерваториях, проведенные в последние годы, вплоть до 2004 г, показывают, что однозначно выбрать сценарий развития событий, связанных с дрейфом СМП, в 2005 году нет возможности. Данных обсерватории мыс Челюскин за 2001 и 2002 гг. нет, однако, они получены за 2003 и 2004. Если данные 2003, 2004 подтвердятся, это означает дальнейшее уменьшение  $H$ -компоненты в Сибири и, соответственно, ускорение дрейфа северного магнитного полюса. Если же события будут развиваться по другому сценарию, то скорость дрейфа СМП начнет убывать. Если скорость дрейфа СМП будет продолжать возрастать, то он «проскочит» точку 2140 и будет дальше двигаться с ускорением по направлению к обсерватории Мыс Челюскин. В принципе, возможно и дальнейшее движение СМП - по Восточному полушарию уже на юг, навстречу южному магнитному полюсу, который, так же как северный, - изменил направление своего дрейфа в 1860 г и, правда, с небольшим замедлением, - дрейфует к северу, в направлении к магнитной аномалии. В течение ближайших 2-3 лет (относительно 2005), ситуация должна проясниться. Заметим, что именно на это время планируется проведение долговременных наблюдений дрейфа магнитных (СМП и ЮМП) полюсов в рамках программы Международного Полярного года 2007-2008.

Вернемся к нашей модели дрейфа СМП. Изменение расстояния  $L$  дрейфа СМП в течение времени  $t$ , начиная с 1860 г, и до последнего измерения в 2001, определим формулой:  $L = kt^2$ , где  $k$  меняется от 5 в начале 1900 г. до 6 к началу 2000, а время  $t = 0.1(T - 1860)$ , где  $T$  – текущий год. Формула позволяет прогнозировать положение СМП, предполагая, что и в дальнейшем он не будет менять направление дрейфа. Иначе, делается прогноз на дрейф СМП в момент инверсии. В этом случае СМП пересечет меридиан  $180^\circ$  и перейдет в восточное полушарие примерно в 2040 г., а достигнет положения ЮМП примерно в 2400 г. и т.д.

В другом варианте, рис. 6-20-в показывает, что СМП может «замкнуть» временной 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. Анализируя этот рисунок, видно, что в наше время (~ 2000 г) скорость дрейфа ( $V$ ) в этом случае должна быть максимальной, а в дальнейшем, – она должна уменьшаться, причем, таким образом, чтобы СМП в 2140 остановился, развернулся и стал дрейфовать в обратном направлении. Таким образом, можно видеть, что в течение последних 450 лет наблюдается определенная логика в характере дрейфа ВСМП.

*Может ли существовать связь между джерками и дрейфом магнитных полюсов?* Для того чтобы ответить на этот вопрос, представим скорость дрейфа магнитного полюса как:

$$V = dL/dt = (dH/dt) / (dH/dL), \quad (6.18)$$

где  $dH/dt$  суммарное изменение величины горизонтальной компоненты геомагнитного поля в районе магнитного полюса. Для СМП и ЮМП эта величина составляет  $\approx 40$

нТл/год. Пространственные градиенты  $H$ -компоненты геомагнитного поля ( $dH/dL$ ) в районах дрейфа полюсов значительно различаются:  $dH/dL$  в районе СМП  $\approx 1$  нТл/км; в районе ЮМП  $\approx 10$  нТл/км. Подстановка в (6-18) пространственных и временных градиентов поля  $H$ -компоненты (Паркинсон, 1986) показывает их совпадение с измеренными скоростями дрейфа магнитных полюсов. Как отмечалось, современные скорости дрейфа: СМП  $\approx 40$  км/год, ЮМП  $\approx 4$  км/год.

Зависимость  $dY/dt$  ( $dD/dt$ ) (Mandea et al., 2000) показывает, что по мере того, как амплитуда  $dY/dt$  с течением времени уменьшается, частота проявления джерков ( $w$ ) (величина обратная интервалу времени между событиями, когда  $d^2Y/dt^2 = 0$ ) – возрастает. Причём это происходит таким образом, что произведение  $Y \cdot w$ , ( $dY/dt \times w$ ) остается примерно постоянным. Подобный процесс можно описать уравнением колебаний с мягкой упругой силой (уравнением для осциллятора с затуханием) (Берже и др. 1991):

$$m(d^2x/dt^2) + j(dx/dt) + f(x) = F \cos wt. \quad (6.19)$$

Первый компонент левой части уравнения (6.19) характеризует силу инерции. Второй, – силу сопротивления (затухания), третий, – восстанавливающую (упругую) силу. После знака равенства, справа, в уравнении (6.19) – внешняя, возмущающая сила. Если она равна нулю ( $F \cos wt = 0$ ), то уравнение (6.19) характеризует затухающие колебания. Например, уравнение:

$$m(d^2x/dt^2) + j(dx/dt) + f(x) = 0 \quad (6.20)$$

описывает движение маятника при наличии сил сопротивления. Не вдаваясь пока в физику джерков и физику генерации геомагнитного поля, вместо (6.20) применим уравнение Ван дер Поля (Уиттекер, Ватсон, 1963):

$$d^2Y/dt^2 - g[1 - Y^2/Y_o^2] dY/dt + w^2Y = 0, \quad (6.21)$$

здесь  $Y_o$  – исходная амплитуда,  $\gamma$  – коэффициент затухания,  $w$  – частота,  $w^2Y$  – упругая сила. Уравнение (6.21) характеризует поведение осциллятора с вынуждающей силой, в котором колебания с малой амплитудой усиливаются, а колебания с большой амплитудой – затухают. Решение этого уравнения:

$$Y(t) = Y_o \exp(-gt/2) \cos(wt + j),$$

при соответствующем подборе коэффициентов может с хорошей точностью описать зависимость  $dY/dt$  от времени, полученную из наблюдений. Учет упругой силы в (6.21) соответствует экспериментально наблюдаемой зависимости:  $w^2 \sim 1/Y$ .

В рассматриваемом случае фазовый портрет уравнения (6.21) соответствует сходящейся спирали:  $\gamma > 0$ . Механическим эквивалентом такой системы может быть модель, в которой шарик совершает колебательные движения в сферическом объеме, в нижней части которого имеется отверстие, размером чуть больше диаметра шарика. Когда шарик приходит в равновесие и успокаивается ( $dY/dt = 0$ ), он проваливается в дырку (происходит бифуркация) и попадает в другой объем, аналогичный первому и т.д. Процесс повторяется при условии несовместимости отверстий этих объемов. Шарик, попадая в нижний объем, теряет часть своей потенциальной энергии.

Рассмотрим процесс возникновения джерков в контексте поведения геомагнитного поля в момент времени, предшествующий инверсии. Можно ли связать частоту образования джерков с бифуркацией, возникающей после установления в системе неустойчивого равновесия, с одной стороны. И, с другой, – попытаться выявить феноменологию экспериментально наблюдаемой связи увеличения скорости дрейфа СМП и увеличения частоты джерков  $w$ :  $V \sim dH/dt \sim w$ . Как следует из наших рассуждений,  $w^2 \sim 1/Y$ , однако, если скорость  $V$  однозначно (по модели) связана с  $dH/dt$ , то в геомагнетизме связь между  $dH/dt$  и  $dY/dt$  неоднозначна, следовательно, нет и прямой связи между  $V$  и  $w$ .

Зададимся вопросом, как долго может продолжаться ускорение СМП в случае инверсии? Скорость дрейфа магнитного полюса:  $V = dL/dt$ , где  $L = k t^2$ , или  $V \sim t$ , т.е. скорость дрейфа СМП, согласно (6.18), будет и дальше возрастать со временем. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока градиент  $dH/dL$  будет оставаться малым, что

характерно для полярной области. Как только градиент  $dH/dL$  возрастет, а именно так и должно произойти по мере приближения СМП к одной из магнитных аномалий, скорость СМП – уменьшится (т.к.  $V \sim dL/dH$ ).

*Предварительное обсуждение.* Автор комментария (Campbell, 2003) к работам (Newitt et al. 2002; Barton, 2002) ставит под сомнение целесообразность самой идеи регистрации дрейфа магнитных полюсов. В качестве аргумента он приводит математическую модель описания геомагнитного поля в виде диполя, смещенного относительно центра Земли. По мнению автора, в такой ситуации вертикальность вектора поля и равенство нулю горизонтальной компоненты, ничего не означает, а является лишь следствием смещения оси генерации поля относительно оси вращения Земли. Авторы (Barton, Newitt, 2003) возражают против такого подхода, объясняя Кэмпбеллу (Campbell, 2003) то, что реальная физическая модель геомагнитного поля не может быть подменена математической моделью. Предлагаемый Кэмпбеллом пример математического описания поля далеко не единственный. Например, можно сослаться на цикл работ Олдриджа (Alldridge, 1987), в которых он описывает геомагнитное поле не путем разложения его в спектр, как Кэмпбелл, а путем подбора неограниченного количества радиальных диполей. В этом случае, как и в первом, математическая модель ни в коей мере не объясняет природу реального геомагнитного поля. Как известно, в любой реальной модели генерации геомагнитного поля само магнитное поле является следствием протекания электрического тока (или перемещения проводящей жидкости с вмороженным в неё магнитным полем) по проводящему токовому кольцу. В этом плане идеи Олдриджа значительно ближе, по сути, к физической модели геомагнитного поля, чем разложение поля в ряд Гаусса.

Олдридж путем оптимизации расположения токовых колец пришел к заключению, что их самое оптимальное положение соответствует границе внутреннего ядра. Этот вывод согласуется с идеей генерации геомагнитного поля на границе внутреннего ядра (в F-слое), следующее из нашей модели горячей Земли. В этой модели дипольный источник представляет собой дифференциальное токовое кольцо, латеральные неоднородности которого точно соответствуют выявленной латеральной анизотропии внутреннего ядра. Заметим, что результаты исследования анизотропии внутреннего ядра опровергают возможность размещения реального источника поля в виде смещенного диполя.

Дрейф магнитных полюсов (направление и скорость дрейфа) - является одной из важнейших характеристик геомагнетизма. Это тем более важно, что направления дрейфа и скорости палеомагнитных полюсов в периоды спокойного поля (Tarling, Abdeldayem, 1996) существенно различаются по сравнению с направлениями и скоростями современных магнитных полюсов.

Мы отмечали выше, что важную роль в движении полюсов в момент инверсии играют ГМА. Эти аномалии в гидродинамической модели, являясь вихрями Россби, они переносят тепло в F-слое между внутренним и внешним ядром, где, согласно модели, происходят фазовые переходы первого рода. Температура фазового перехода при заданном давлении величина постоянная, а термодинамическая система стремится поддержать её на заданном уровне. Если принять эту идею, то оказывается, что явления, - получившие в геомагнетизме название джерки, представляют собой маркированные магнитным полем вариации температуры при релаксации системы к температуре фазового перехода. Увеличение частоты джерков и уменьшение их амплитуды означает выход системы на неустойчивую асимптоту, при которой происходит смена режима – бифуркация. В такой модели ускорение полюсов и увеличение частоты джерков может характеризовать, том числе и начало инверсии, или очередного экскурса (см. рис. 6-16). Однако имеющиеся в нашем распоряжении данные по джеркам и дрейфу магнитных

поллюсов не дают оснований для того, чтобы определенно ответить, началась ли в настоящее время инверсия или нет.

*Южный магнитный полюс.* Модель дрейфа южного магнитного полюса (ЮМП) аналогична модели дрейфа СМП. Как и раньше, рассматриваемые в модели источники будем представлять диполями. Допустим, что мы имеем два диполя интенсивностью  $A$  и  $B$ , находящихся на расстоянии  $x$  (в географических градусах) один от другого (рис. 6-21). Наша задача состоит в том, чтобы найти расстояние  $k$  (внутри отрезка  $x$ ), показывающее положение МП. Условие равенства нулю горизонтальных компонент источников можно записать в следующем виде (Кузнецов, 1998-б):

$$A \cos(\pi/2 + k) + B \cos\{\pi/2 + (x - k)\} = 0. \quad (6.22)$$

Решение уравнения (6.22):  $c \operatorname{tg} k = (A/B + \cos x)/\sin x$ . Если:  $A = B$ , то:  $k = x/2$ ; если  $A = 0$ , то:  $k = x$ ; если  $B = 0$ , то:  $k = 0$ . Так как  $x \ll \pi/2$  (т.е. источники расположены один относительно другого ближе, чем 90 географических градусов), то для представления наших функций вместо тригонометрических кривых можно использовать наклонные прямые, пересекающие горизонтальную ось в точках расположения источников  $A$  и  $B$ . Представим себе, что источник  $A$  соответствует аномалии, а  $B$  - дипольному основному полю. Если их интенсивности равны, то местоположение МП:  $k = x/2$ . Допустим, что  $A$  не меняется со временем, а  $B$  - уменьшается. Уменьшение интенсивности источника дипольного поля вызовет смещение МП влево. В точках 1, А и 2, в результате этого уменьшения,  $H$ -компонента поля уменьшится. Уменьшится она и в точке 5, а в точках 3 и 4 - увеличится. В точке В, как следует из нашей схемы, величина  $H$ -компоненты останется без изменения. Допустим, что ЮМП действительно дрейфует в направлении от дипольного источника (интенсивность которого, как известно, убывает со скоростью 5% за 100 лет), к глобальной магнитной Антарктической (Южной) аномалии. Тогда, в этом регионе должна наблюдаться выявленная нами особенность: уменьшение величины  $H$ -компоненты "левее" и "правее" МП, увеличение ее в области, примыкающей к МП и отсутствие вариации  $H$ -компоненты в районе положения дипольного, основного поля.

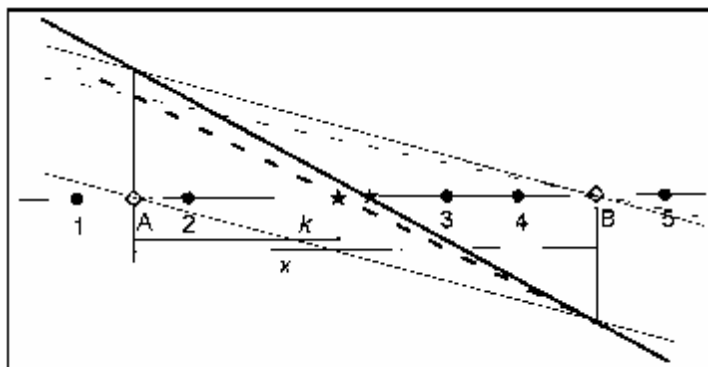


Рис. 6-21 Схема дрейфа южного магнитного полюса (ЮМП).  $H$ -компоненты поля изображены прямыми. А и В – источники поля, 1 – 5 – точки наблюдений. Звездочка – ЮМП.

С целью проверки этого предположения, были исследованы временные зависимости  $H$ -компонент на 16 магнитных обсерваториях, расположенных в Австралии, Новой Зеландии, Антарктиде и на островах, ближайших к этим материкам, приведенные в (Головков и др. 1993). Перечень обсерваторий, их географические координаты и характер зависимости величины  $H$ -компоненты:  $\uparrow$  - возрастает,  $\downarrow$  - убывает,  $o$  - не меняется, представлены в Таблице 6.4. Рисунок 6-22 показывает пространственное распределение характера изменения величины  $H$ -компоненты поля. Проецируя данные обсерваторий на  $140^\circ$  Е меридиан, легко видеть, что область, в которой  $H$ -компонента возрастает,

соответствует примерно  $65^{\circ} - 85^{\circ} S$ . В районе  $85^{\circ} - 90^{\circ} S$  величина  $H$ -компоненты поля постоянна. В других районах:  $< 65^{\circ}$  и  $> 90^{\circ}$  (см. рис. 6-21) - поле уменьшается. Замеченная особенность поведения  $H$ -компоненты поля в пространстве и во времени подтверждает нашу модель. (Знак " $> 90^{\circ}$ " надо понимать условно, т.к. широты, большей, чем  $90^{\circ}$ , - быть не может).

Таблица 6.4

		Lat. 00° 00'	Long. 000° 00'	↑ o ↓
1	Toolangi	37 32	145 28	↓
2	Gnangara	31 47	115 57	↓
3	Amberli	43 09	172 43	↓
4	Macquarie	54 30	158 57	↓
5	Dumont d'Urville	66 40	140 00	↓
6	Мирный	66 33	93 01	↑
7	Scott Base	77 51	166 47	↑
8	Восток	78 27	106 52	↑
9	Casey	66 17	110 32	↑
10	South Pole	90 00	346 41	↑
11	Orcadas	60 44	315 13	↓
12	Argentine Island	65 15	295 45	↓
13	Syowa Base	69 02	39 36	o
14	Sanae	70 19	357 40	↓
15	Hallett Station	72 18	170 14	↑
16	Byrd Station	79 59	240 00	↑

Как следует из рис. 6-23-а, координаты ЮМП надежно измерены начиная примерно с 1965 г. Известно, что полюс находился непосредственно в районе обсерватории Dumont d'Urville в 1959 г., когда  $X$ -компонента была равна нулю. Можно ли сказать что-либо определенное о траектории дрейфа ЮМП раньше (до 1959 г). Насколько она соответствует нашей модели? Находился ли ЮМП в 1909 г действительно там, где он был определен Маусоном? Знание данных австралийских обсерваторий и особенно, обсерватории Toolangi, начавшей работать примерно в 1860 г, позволяет ответить на эти вопросы. Для этого воспользуемся данными обсерваторий (с 1 по 9 из Таблицы 6.4) для оценки поведения во времени виртуальных магнитных полюсов (ВМП).

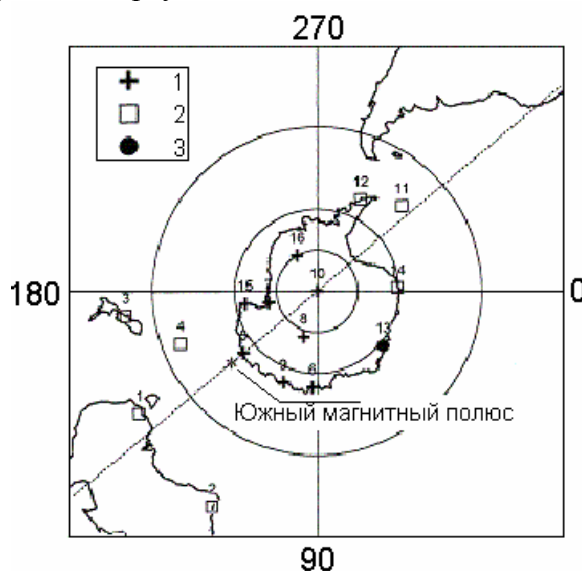


Рис. 6-22. Расположение магнитных обсерваторий в районе ЮМП, 1 – в которых  $H$ -компонента поля возрастает со временем, 2 – убывает, 3 – не меняется.



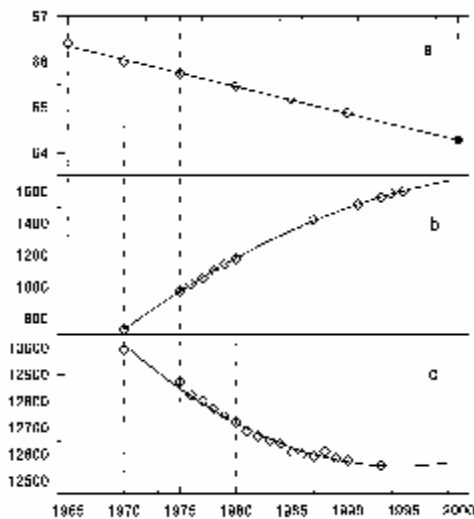


Рис. 6-23. Прогноз положения широты ЮМП - **a**, изменение во времени интенсивности *H*-компоненты на обсерваториях Dumont d'Urville - **b** и Macquarie - **c**, показывают плавный ход этого параметра.

Изменение координат ВМП в течение периода работы обсерваторий изображено на рисунке 6-24. Здесь же приведен дрейф ЮМП с 1965 по 1990 г.г. Из рис. 6-24 видно, что и ВМП, и ЮМП движутся вдоль меридианов на север. На рисунке отдельной звездочкой с координатами  $72^{\circ} S$  и  $155^{\circ} E$  изображено положение ЮМП определенное в 1909 г. во время экспедиции Шеклтона (Маусон). Из рисунка видно, что виртуальные полюса явно группируются в две области. Одна, тяготеющая к  $120^{\circ}$ -меридиану, принадлежит к обсерваториям Новой Зеландии и Австралии (1-4 на рисунке и в таблице 6.4). Другая группа ВМП, расположенная вблизи  $150^{\circ}$ -меридиана, показывает ВМП обсерваторий Антарктиды (6-9 табл. 6.4). Виртуальные полюса, определенные по данным обсерватории Дюмон д'Юрвиль, располагаются вблизи ЮМП.

Рисунок 6-24 демонстрирует, что ЮМП находится примерно посередине между этими областями, отстоя от каждой на  $8.5^{\circ}$ . Из анализа характера движения австралийских и новозеландских ВМП следует, что примерно в 1920 г. произошло изменение направления движения ЮМП. Южный полюс отклонился от первоначального направления дрейфа к востоку на 2-3 градуса, а затем вернулся к прежнему, северному направлению дрейфа вдоль меридиана.

Хорошее совпадение между направлением и величинами скоростей дрейфа ЮМП и ВМП дает основание путем простого геометрического преобразования получить возможный путь дрейфа ЮМП (см. вставку внизу на рис. 6-24) начиная с 1860 года (года начала работы обсерватории Туланги). Такое "восстановление" пути дрейфа ЮМП представляется автору вполне обоснованным. Однако в этом случае оказывается, что измерение положения ЮМП, выполненное участниками экспедиции Э. Шеклтона в 1909 (отдельная звездочка на рисунке) году, отстоит от определенного нами положения ЮМП в 1910 г. примерно на 500 км. Могли ли авторы этого определения так ошибиться? В пользу этого и справедливости нашей оценки, приведем еще один достаточно важный на наш взгляд аргумент. Если бы южный магнитный полюс действительно находился в 1909 году там, где его обнаружил профессор Моусон, то скорость его дрейфа за 50 лет (с 1909 по 1960) была бы не 6 км/год (как сейчас), а примерно в 2 - 3 раза быстрее. Такое "ускорение" движения ЮМП обязательно нашло бы отражение в данных магнитных обсерваторий Австралии и Новой Зеландии, чего реально не наблюдается.

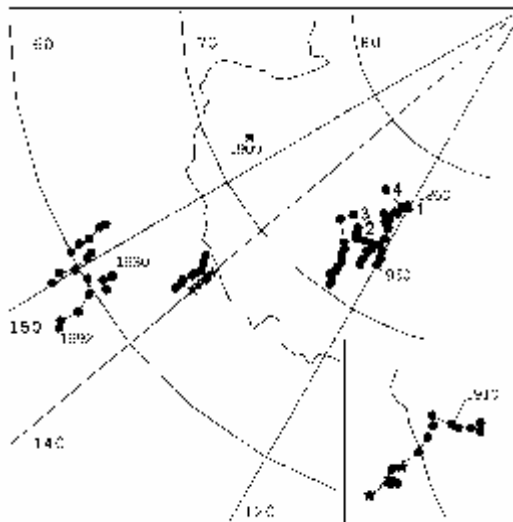


Рис. 6-24. Изменение координат ЮМП (с 1965 по 1990 г.г.) и ВМП в течение периода работы обсерваторий (1-9 на рис. и в табл. 2). Звездочка с координатами 72° S и 155° E - положение ЮМП, определенное в 1909 г. во время экспедиции Шеклтона.

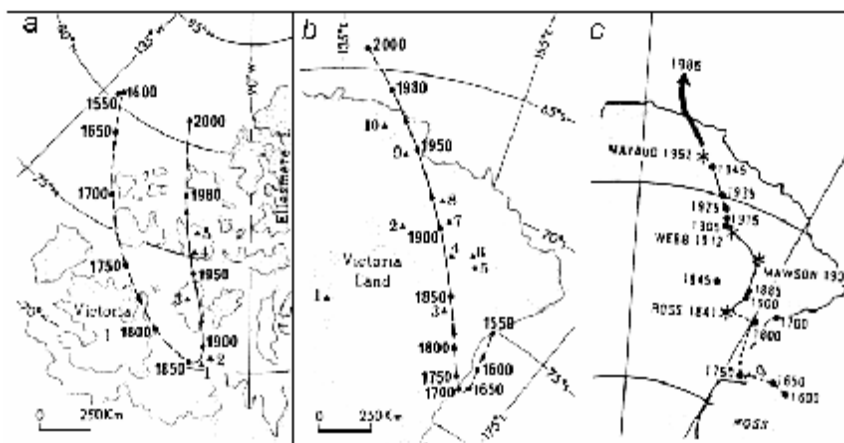


Рис. 6-25. Дрейф СМП – а, ЮМП - б (Dawson, Newitt, 1982) и ЮМП - с (Barton et al., 1986).

Картина дрейфа ЮМП, отличающаяся от нашей, представлена в работе (Barton et al., 1986), где авторы пытаются совместить данные по современному дрейфу ЮМП с прошлыми измерениями (рис. 6-25-в). Подобная картина дрейфа ЮМП (рис. 6-25-б) приведена в работе (Dawson, Newitt; 1982).

Попытаемся восстановить характер дрейфа ЮМП, по крайней мере, за последние 100 лет. Воспользуемся для этого данными обсерватории Туланги и предположим, что изменение величины  $H$ -компоненты прямо связано с величиной и направлением скорости дрейфа ЮМП ( $v_{др} \sim dH/dt$ ). Известно, что в 1860 г. скорость дрейфа полюса уменьшалась до нуля, а в 1920-30 г.г. она даже меняла знак. Эти факты не противоречат нашей модели, наоборот, находят в ней простое объяснение. Для этого достаточно того, чтобы по какой-либо причине изменился характер вариации величины одного (или обоих) источников поля: аномалии, либо основного поля. Ход зависимости скорости дрейфа ЮМП показывает, что наша оценка местоположения ЮМП-99, сделанная выше, правильна. По-видимому, Бартон и Ньюитт, восстанавливая картину дрейфа ЮМП, были не совсем точны.

В заключение оценим географическое положение источников: дипольного (ДИ) и ГМА. Очевидно, что они близки к 140° E-меридиану. Из нашей модели следует, что ДИ

должен находиться в области, где Н-компонента не меняется. Это происходит примерно на  $85^\circ - 90^\circ S$ . “Выберем” координату ДИ =  $85^\circ S$ . Как оценить положение источника ГМА? Воспользуемся правилом, согласно которому магнитное поле двух источников выглядит как от одного, если их интенсивности различаются меньше чем в 0.67, а их эпицентры отстоят друг от друга меньше чем на  $40^\circ$  (Knapp, 1955).

Аномалия “Южный полюс” обычно представляется как следствие одного источника - ДИ. По нашей модели она “обязана” аддитивному сложению интенсивностей двух источников: ДИ и ГМА. Согласно модели, интенсивности обоих источников соизмеримы. Все это дает основание предположить, что расстояние между ними может оказаться порядка  $35^\circ$  (т. е.  $< 40^\circ$ ). В этом случае положение источника ГМА будет соответствовать примерно  $50^\circ S$ . В настоящее время ЮМП дрейфует в районе  $65^\circ$ . Это может говорить, в рамках наших предположений и оценок, о том, что интенсивности ДИ/ГМА соотносятся как 0.75 или, примерно, 30 и 37 мкТл, соответственно.

*О несимметрии положений магнитных полюсов.* Отметим еще один достаточно важный результат, который, возможно, будет использоваться при построении общей теории земного магнетизма. Речь идет о том, что в наших моделях дрейфа магнитных полюсов, мы произвольно определяли местоположение точек, как в Арктике, так и Антарктике, в которых диполь основного поля пересекает земную поверхность. В Арктике его координаты  $70^\circ$  с.ш. и  $90^\circ$  з.д., а координаты в Антарктике:  $85^\circ$  ю.ш. и  $140^\circ$  в.д. Во-первых, эти координаты значительно расходятся с координатами геомагнитных полюсов. Во-вторых, оба определенных нами диполя не параллельны друг другу. Они как бы “притянуты” к той области ядра (или внутреннего ядра) на которую проектируется область, занятая Тихим океаном. Эта область имеет ряд особенностей в магнитном поле Земли. Одна из них, по Паркинсону (1986), состоит, например, в том, что этот регион практически не посещают фокусы векового хода. Уместно заметить, что Ф. Стейси в своей известной книге (1972) отмечал, что физический диполь вовсе не обязан быть точно равен диполю математическому.

Модель динамо, по всей видимости, не может решить эту проблему. Использование идеи дифференциального токового кольца, с незначительно смещенными (на  $1 - 2^\circ$  в плоскости экватора) одно относительно другого кольцами, решает эти проблемы элементарно (рисунки: 6-4, 6-5, 6-6).

*Дрейф полюсов в момент инверсии.* Как мы отмечали выше, полюса дрейфуют в момент инверсии по вполне определенным траекториям. Выяснилось, что в момент инверсии виртуальные геомагнитные полюса (ВГП) движутся не по случайным траекториям, а совсем наоборот, направления их дрейфа вполне однозначны. Выделяются всего две трассы дрейфа ВГП. Одна из них “проходит” через Центральную Азию и Австралию, другая, через обе Америки (см. рис. 6-26). Обе трассы сравнительно близки к  $90^\circ$ -меридиану в западном и восточном полушариях (Constable, 1992). Многие работы посвящены исследованиям направлений дрейфа ВГП: (Clement, 1991; Tric et al. 1991; Koci, 1990; Gubbins, Coe, 1993; Gubbins, 1993; Gubbins, Sarson, 1994; Jackson, 1992; McFadden, 1992; McFadden et al., 1993; Hollerbach, Jones, 1993; Constable, 1993). В других рассматриваются возможные модели дрейфа, естественно, исходя из концепции динамо механизма генерации магнитного поля Земли: (Gubbins, Coe, 1993; Gubbins, 1993; Jackson, 1992; McFadden, 1992; McFadden et al., 1993; Hollerbach, Jones, 1993). Поток статей на эту тему не прекращается и количество предлагаемых моделей возрастает. Недавно вышла в свет вторая редакция книги (Jacobs, 1994), целиком посвященной этой проблеме. Это означает только то, что проблема интересует научное сообщество и не находит пока “разумного” решения. Коснемся этой проблемы чуть подробнее.

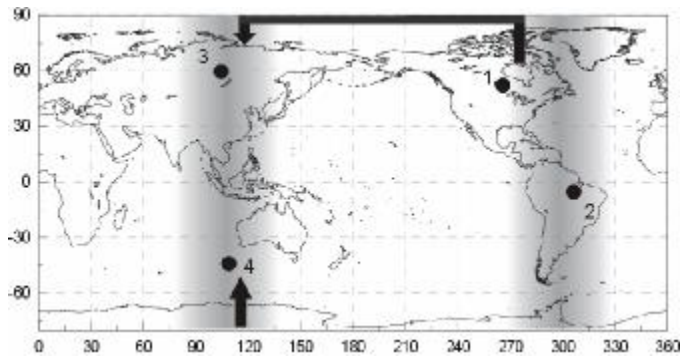


Рис. 6-26. Пути дрейфа магнитного полюса во время инверсий (Constable, 1992; Kuznetsov, 1999), 1-4 ГМА.

Клемент показал, что распределение трасс ВГП по земному шару в момент смены полярности МПЗ между эпохами Matuyama-Brunhes (Clement, 1991) обладает определенной симметрией. Автор обнаружил, что ВГП разбросаны по всему земному шару, однако, наибольшее количество их определений в момент инверсии Matuyama-Brunhes приходится на "полосу"  $60^\circ \text{ W} \pm 30^\circ$ , при этом антиподальная часть ВГП занимает "коридор" вдоль  $110^\circ \text{ E} (\pm 30^\circ)$ . В работе (Tric et al. 1991) изучалось распределение траекторий дрейфа ВГП в течение инверсии Upper-Olduvai. Авторы выделили два случая смены полярности МПЗ с обратной на нормальную ( $R \rightarrow N$ ) и при обратной перемене ( $N \rightarrow R$ ). ВГП двигались только по Американским континентам. Авторы полагают, что ВГП в данном случае "предпочитали" Америку по сравнению с Азией и Австралией. Автор (Коси, 1990) зафиксировал интересную особенность дрейфа ВГП в момент инверсии, происходящей после экскурса Jaramillo. Виртуальный полюс дрейфовал из южного полушария в северное от  $90^\circ \text{ S}$  до  $20^\circ \text{ S}$ , затем его "трасса" прервалась и ВГП "обнаружился" в северном полушарии на широте  $40^\circ \text{ N}$  и дальше двигался к северу вдоль  $90^\circ \text{ E}$ -меридиана. Ряд авторов (Clement, 1991; Tric et al. 1991; Gubbins, Coe, 1993) полагают, что ВГП в момент ( $N \rightarrow R$ ) дрейфуют по Азии-Австралии, а в момент ( $R \rightarrow N$ ) вдоль Американских континентов.

Проблема дрейфа ВГП в момент инверсии рассматривалась в статьях (Fuller et al., 1996; Mc Fadden, Merrill, 1995; Gubbins, Sarson, 1994), опубликованных в самое последнее время. Авторы этих работ, анализируя все предшествующие попытки (основанные на использовании модели магнитного динамо) найти объяснение особенностям дрейфа ВГП, приходят к заключению, что пока это явление все еще остается загадочным (Fuller et al., 1996). Рассмотрим, как эта проблема решается в рамках нашей модели дрейфа магнитных полюсов.

В первом приближении МПЗ дипольно. Магнитные силовые линии "выходят" из ЮМП и "входят" в СМП. Будем считать, что в нашей двумерной модели величина поля вдоль силовой магнитной линии положительна, если линия направлена по часовой стрелке и отрицательна, если - против. Совместим (Kuznetsov, 1999) начало отсчета двумерного поля ( $0^\circ$ ) с южным географическим полюсом, тогда на северном будет  $180^\circ$  и т.д. Если бы географические и магнитные полюса совпадали, то МПЗ представляло бы собой синусоиду с началом на ЮМП. Это не так, и поэтому "магнитная" синусоида сдвинута примерно на  $20^\circ$ . Реальное магнитное поле значительно отличается от идеализированного. Рисунок 6-27-а показывает распределение интенсивности Н-компоненты МПЗ вдоль  $90^\circ$ -меридиана в восточном и западном полушариях. Здесь же проведена «сдвинутая» синусоида, которая обозначает собой дипольную часть МПЗ. Рисунок 6-27-б показывает недипольную часть МПЗ. Как следует из нашей модели, недипольная часть поля определяется наличием источников поля ГМА, поэтому, задача сводится к представлению

недипольной части МПЗ, как суммы полей источников аномалий. Рисунок 6-27-с демонстрирует такую возможность.

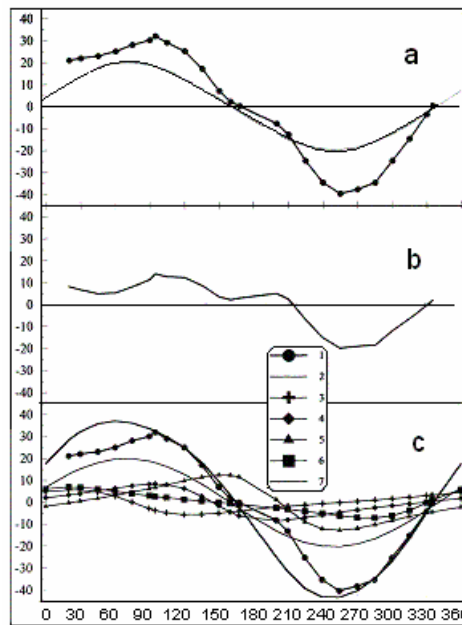


Рис. 6-27. (а) Н-компонента геомагнитного поля вдоль  $90^\circ$  меридиана. Синусоида, смещенная на запад на  $20^\circ$ . Разность между этими кривыми -(b). Кривые, показывающие изменение интенсивности источников поля (с): 1) Н-компонента геомагнитного поля, 2) дипольная компонента поля, 3), 4), 5), 6) - Бразильская, Канадская, Сибирская и Антарктическая ГМА (соответственно), 7) - сумма источников: дипольного и 4-х ГМА (Kuznetsov, 1999).

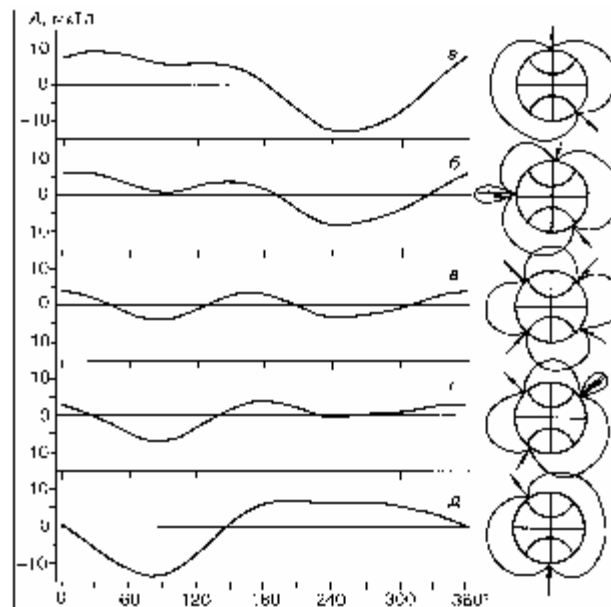


Рис. 6-28. Схема дрейфа полюсов. Величина А увеличивает свое значение от - 10 до - 30 мкТл: а) А = - 10 мкТл; б) А = - 15 мкТл; в) А = - 20 мкТл; г) А = - 23 мкТл; д) А = - 30 мкТл (Kuznetsov, 1999).

Обозначим источники: А для основного (дипольного) поля, В - поля Бразильской аномалии, С - Канадской, D - Сибирской и Е - поля Антарктической аномалии. Полагаем, что все аномалии размещаются на одном меридиане. Начало координат относим к

Южному полюсу. Как известно, эпицентр Бразильской аномалии располагается на широте  $15^\circ S$ . В наших координатах это соответствует:  $x_1 = 75^\circ$ , для Канадской аномалии (С)  $x_2 = 145^\circ$ , для Сибирской (D)  $x_3 = 203^\circ$ , и, наконец, Антарктическая (Е) находится на координате  $x_4 = 330^\circ$ . Дипольный источник (А) несколько смещен относительно географического нуля и соответствует  $340^\circ$  ( $x_0 = -20^\circ$ ). Углы  $\alpha$ , при которых Н-компоненты МПЗ равны нулю ( $H = 0$ ), определяют положения магнитных полюсов. В нашей системе координат:  $\alpha_1 = 168^\circ$  для Северного магнитного полюса и  $\alpha_2 = 335^\circ$  для Южного.

Запишем уравнение для Н-компоненты МПЗ, как суммы дипольного источника и источников четырех аномалий:

$$H = A \sin(a + x_0) - B \sin(a - x_1) k_1 - C \sin(a - x_2) k_2 - D \sin(a - x_3) k_3 - E \sin(a - x_4) k_4, \quad (6.23)$$

здесь  $k_i = [1 - 0.2 \cos(a - k_i)]/[1 - 0.4 \cos(a - k_i)]^{5/2}$ , ( $i = 1, 2, 3, 4$ ).

Приравнявая нулю выражение (6.23), получаем два решения, определяющие положения магнитных полюсов  $a_1$  и  $a_2$ .

Сумма кривых, описывающих интенсивность Н-компоненты МПЗ, наилучшим образом совпадает с наблюдаемым распределением горизонтальной компоненты МПЗ вдоль  $90^\circ$ -градусного меридиана, если интенсивности источников присвоить значения:  $A = 20$  мкТл,  $B = 4$  мкТл,  $C = 6$  мкТл,  $D = 9$  мкТл и  $E = 4$  мкТл. Эта ситуация отражена на рис. 6-27-с. Заметные расхождения между экспериментальной и расчетной кривыми наблюдаются на углах  $30^\circ$ - $90^\circ$  и  $180^\circ$ - $240^\circ$

*Обсуждение модели дрейфа в момент инверсии.* Ключевая идея нашей модели заключается в том, что в момент, когда  $A = 0$ , МПЗ равно суммарному полю ГМА, а МП должен указывать на эпицентр ближайшей глобальной магнитной аномалии. Действительно, как показано в (Petrova, 1990), виртуальные полюса, зарегистрированные в Сибири в период инверсии Matuama-Brunhes, ориентированы на глобальную магнитную аномалию. Этот факт подтверждает справедливость нашей модели, из которой следует, что в момент, когда  $A = 0$ , СМП мог бы находиться либо в точке с координатой  $160^\circ$  (КМА), либо  $210^\circ$ . ЮМП в этот момент находился в точке  $330^\circ$ , т.е. тоже в области влияния АМА. Этот рисунок показывает, что в этот момент ( $A = 0$ ) МПЗ может иметь два МП в районах северных ГМА.

Момент времени, в течение которого сохраняется  $A = 0$ , по-видимому, не столь велик, и весь предшествующий ему период, когда  $A \rightarrow 0$ , не оказывал существенного влияния на дрейф МП. Собственно смена положений полюсов начинается в тот момент, когда начинается увеличение  $A$  обратного знака ( $-A$ ). Рис. 6-28 демонстрирует “картину” дрейфа полюсов, следующую из нашей модели. Здесь величина  $A$  постепенно увеличивает свое значение от  $-10$  до  $-30$  мкТл. Появление даже небольшой по величине (порядка  $10$  мкТл) дипольной части МПЗ обратного знака, однозначно “устанавливает” наличие всего двух МП (см. рис. 6-28-а). Положение (на нашей шкале) СМП соответствует  $180^\circ$ , а ЮМП  $330^\circ$ . Дальнейшее возрастание  $A$  приводит не только к тому, что МП начинают перемещаться в пространстве, но и к возникновению новых МП ( $A = -15$  мкТл, рис. 6-28-б). Этот рисунок фиксирует факт “рождения” (угол примерно  $90^\circ$ ) пары “новых” полюсов. При дальнейшем увеличении  $A$ , “новые” полюса начинают “разъезжаться”, в то время как “прежние” МП сближаются (рис. 6-28-в,  $A = -20$  мкТл). Магнитное поле в этом случае становится квадрупольным. (Обратим внимание на то, что возможность проявления квадрупольного характера магнитного поля Земли в момент инверсии была отмечена в работе (Fuller et al., 1996), где, правда, не было объяснено, каким образом могла бы возникнуть подобная структура поля). Два “прежних” полюса продолжают сближаться и, в конечном счете, взаимно уничтожаются - аннигилируют (см. рис. 6-28-г, где  $A = -23$  мкТл, угол аннигиляции  $\approx 240^\circ$ ). На рис. 6-28-д величина дипольной компоненты

достигает  $A = -30$  мкТл, магнитное поле приобретает явно выраженный дипольный характер, при этом магнитные полюса занимают положения: ЮМП  $\approx 0^\circ$  и СМП  $\approx 150^\circ$ .

В нашей модели ВГП перемещаются по обоим полушариям. Наличие такого явления, как взаимное уничтожение полюсов объясняет “загадочное” исчезновение ВГП в процессе его дрейфа. Здесь рассмотрен только один тип инверсии:  $N \rightarrow R$ . Модель базируется на использовании “остаточного” поля присущего ГМА. Мы не можем проверить, каким будет поле аномалий при обратной полярности дипольной части МПЗ. Поэтому, модель не в состоянии так же подробно рассмотреть движение ВГП в обратном направлении. В этой связи, модель не может ответить на вопрос: всегда ли дрейф полюсов занимает оба полушария, или есть ситуация, когда полюса меняются местами только по трассе, в одном полушарии?

Необходимо затронуть еще один момент в модели, касающийся не совсем удовлетворительной подгонки суммарного поля ГМА к реальному полю Земли на углах  $30^\circ - 90^\circ$  и  $180^\circ - 240^\circ$  (рис. 6-27-с). Заметим, что в первом случае, это область влияния БМА, во втором - СМА. Возможная причина состоит в том, что мы, в модели, использовали представление ГМА как радиального диполя. Если представить аномалию в виде наклоненного диполя, можно подогнать поле с лучшей точностью. Однако это не должно принципиально изменить ни нашей модели, ни приведенных выше результатов.

Возникает вопрос: как часто в истории Земли повторялось это явление? Оказывается, все инверсии и экскурсы, которые происходили в течение, по крайней мере, последних 12 млн. лет обладают этой особенностью - полюса дрейфуют по траекториям вдоль  $90^\circ$  - меридианов. О чем это может говорить?

- о том, что структура магнитного поля примерно совпадает с современной морфологией поля;

- магнитные аномалии, это очень “долгоживущие” образования;

- наша модель влияния ГМА на движение магнитных полюсов справедлива, по крайней мере, в течение последних 12 млн. лет.

*Что такое “истинный дрейф полюса” и началась ли инверсия?* Когда идет речь о перемещении палеомагнитных полюсов, то нельзя не затронуть еще одного, не совсем ясного вопроса. Мы отмечали, что скорости дрейфа магнитных полюсов в наши дни составляют до 40 км/год. Однако ряд публикаций говорит о значительно меньших скоростях перемещения полюсов (речь идет о т.н. TPW - true polar wander) в геологическом прошлом: от 0 до 5 см/год (Fuller, Weeks, 1992; Courtillot, Besse, 1987). Расхождение очень велико. Это может означать, что Земля «переживает» сейчас не совсем обычную геологическую историю – инверсию или экскурс.

Известно, что во время инверсии магнитные полюса движутся не только по определенным траекториям (надо сказать, что сейчас наблюдаются именно такие направления дрейфа полюсов), но и с большими скоростями “чем обычно”. Тогда получается так, что на Земле началась очередная инверсия (смена полярности) ее магнитного поля? Не будем торопиться с ответом. Выше мы отмечали, что если  $H$  компонента в Сибири будет продолжать уменьшаться (что, по-видимому, не так), а в Канаде возрастет, то скорость дрейфа СМП будет увеличиваться и он, возможно “проскочит” вторую “точку поворота”, в которой он находился в 1580 г. (Первая “точка поворота” СМП - 1860 г.). Если проскочит, то вполне вероятно то, что начнется инверсия, если нет, - то СМП остановится в этой точке и пойдет на следующий круг.

## VI. 5. Местоположение источника генерации геомагнитного поля.

В нашей модели дипольный источник геомагнитного поля и источник поля ГМА расположены в F-слое. Источник поля по динамо-модели находится на границе ядромантия, т.е. значительно “выше” нашего. Кроме принципиальных различий между нашей и динамо моделями по физике явления, когда определить правоту той или иной гипотезы

подчас весьма трудно, есть некий параметр, по которому можно судить о правомерности той или иной модели. Этот параметр - глубина расположения источника (в долях земного радиуса  $R$ ). Оценить его можно на основании имеющихся данных о структуре геомагнитного поля. Ниже рассмотрим несколько способов оценки размера источника генерации магнитного поля Земли.

*Компьютерная модель.* Компьютерная модель движения северного магнитного полюса позволяет проиллюстрировать справедливость нашей оценки глубины расположения источника ГМА. В модели мы помещали диполи, характеризующие основной источник и источники поля ГМА, на глубину  $x = 0.2 R$ . Результат подтверждается циклом работ Олдриджа (Allredge, Hurwitz, 1964; Allredge, Stearns, 1969; Allredge, 1980; Allredge, 1987), согласно которым наиболее оптимальное местоположение диполей типа токовых колец (current-loop) соответствует границе внешнего и внутреннего ядра (Peddie, Zunde, 1987).

*Оценка по размеру диполя.* Размер области генерации магнитного поля Земли оценивался Жижимовым (1988) на основе анализа сферических коэффициентов. В этой работе он полагал, что разложение поля по сферическим функциям на поверхности Земли и разложение этого поля по малому параметру, - отношению размера источника к расстоянию до него, эквивалентны. Зная величину малого параметра, можно оценить характерный размер источника, если предположить, что источник генерирует лишь самые низшие мультиполи в виде магнитных зарядов, диполей и квадруполей. При моделировании на четных и нечетных гармониках разложения геомагнитного поля получался один однозначный результат: глубина генерации магнитного поля оказывалась равной  $0.2 R$ .

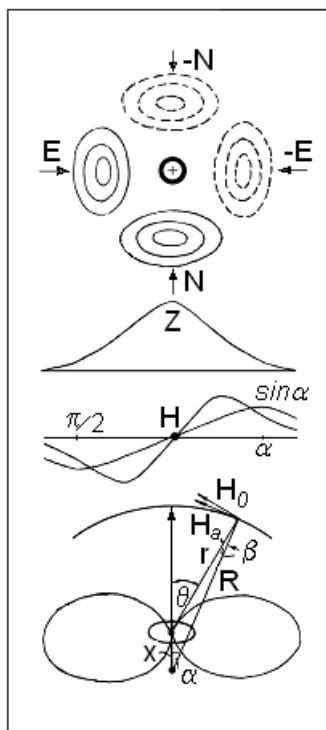


Рис. 6-29. Оценка размера источника генерации поля магнитных аномалий.

*Оценка по расстоянию между ВГП.* В работе (Кузнецов и др. 1987), посвященной недипольности источника геомагнитного поля, исследовалась зависимость расстояний между различными ВГП и точками, в которых они определялись. Если бы все ВГП



попадали в одну точку, то расстояние между ними было бы равно нулю. Если бы расстояния между парами ВГП оказались равными расстояниям между этими же парами точек их определения, то это показывало бы на отсутствие дипольного характера поля. В таком случае, ни о какой дипольности поля нельзя вести речь, т.к. наклон такой прямой был бы равен  $45^\circ$ . В действительности этот угол значительно меньше, что говорит о дипольности геомагнитного поля. Если расстояние между точками определения ВГП принять равным величине земного радиуса, то расстояние между самими ВГП оказывается  $0.2 R$ . Это еще раз подтверждает справедливость нашей оценки.

*Оценка по пространственному размеру аномалий.* ГМА в нашей модели представляется магнитным диполем. Известно, что если это центральный диполь (его центр на оси вращения Земли), то компоненты его:

$$Z = (2m/4\pi) \times \cos q/r^3 ; H = (m/4\pi) \times \sin q/r^3, \quad (6.24)$$

где  $m$  дипольный момент, а угол  $\theta$  между точкой на земной поверхности, куда "смотрит" диполь и где  $Z = \max$  и точкой, в которой мы хотим определить значения поля диполя (см. рис. 6-29). Из этого рисунка следует, что на картах  $E$ - и  $N$ -компонент геомагнитного поля мы должны наблюдать максимумы и минимумы этих компонент, отстоящих от центра диполя. (Надо сказать, что такие максимумы и минимумы на картах действительно есть). Если нам удастся оценить расстояния (в географических градусах) от центра диполя до максимумов этих компонент, то мы могли бы оценить глубину, на которой происходит генерация ГМА. Нас интересует величина угла  $q$ , однако, для оценки величины  $x$  (см. рис. 6-29), мы обязаны пользоваться величиной угла  $a$  (в географических градусах). Заметим, что зависимости координат поля диполя ГМА не совпадает с формой центрального диполя. Получим эти зависимости, приравняв радиус Земли единице ( $R = 1$ ), полагая, что:

$$H_q = \sin q/r^3 = \max.$$

и учитывая очевидную зависимость:  $\sin q = \sin a/r$ , получаем:

$$H_q = \sin a/r^4.$$

Угол между векторами  $H_a$  и  $H_q$  обозначим как:  $b$  ( $b = q - a$ ), тогда величина  $H_q$  должна быть умножена на:  $\cos b = (1 - x \cos a)/r$ .

В результате получаем:

$$H_a = \sin a(1 - x \cos a)/r^5, r = (1 + x^2 - 2x \cos a)^{1/2}. \quad (6.25)$$

Определив по картам  $E$ - и  $N$ -компонент магнитного поля Земли величины углов  $\alpha$  для ГМА и современных ФВХ, получаем среднее значение величины  $x$ . Она оказывается равной:  $x = 0.2 (\pm 0.1) R$ .

*Моделирование с помощью магнитных диполей и токовых контуров.* При моделировании использовался итерационный демпфированный метод Ньютона-Гаусса для минимизации целевой функции. В качестве целевой функции использован усредненный по поверхности Земли квадрат остаточного поля - разности между модельным и наблюдаемым (Ботвиновский, 2000). Показано, что наиболее оптимальный генератор представляет собой дифференциальную токовую структуру с небольшим расстоянием между круговыми контурами. Получено, что главная (доминирующая) часть магнитного момента Земли создаётся в объёме, непосредственно окружающем внутреннее ядро.

## VI. 6. Обсуждение модели.

Предложенную модель генерации магнитного поля Земли можно рассматривать как некоторую попытку разработки модели, альтернативной магнитному динамо. Ее основная идея состоит в согласовании модели генерации МПЗ с моделью "горячей" Земли, с одной стороны, а с другой, в согласовании между собой в одной непротиворечивой модели самых различных сторон явлений, связанных с геомагнетизмом и магнетизмом других планет. В этой модели была сделана попытка, рассмотреть в едином контексте

такие явления как: генерация основного поля и его инверсии; наличие магнитных аномалий, джерков и фокусов векового хода, движение магнитных полюсов в наше время и в геологическом прошлом.

В модели, по мнению автора, удачно решены некоторые вопросы:

- Наличие фазового перехода в F-слое определяет источник энергии теплового потока, движений материков и плит, магнитного поля Земли.
- Смена режима работы фазового перехода автоматически приводит к изменению геодинамического режима Земли и перемене полярности (инверсии) ее магнитного поля.
- Суточное вращение разделенных на толщину F-слоя электрических зарядов, образовавшихся при фазовом переходе, обеспечивает появление "затравочного" магнитного поля  $B_o$ , которое, усиливаясь, преобразуется в МПЗ.
- Полярность электрического поля  $E_R$  изменяется с изменением режима работы фазового перехода. Это приводит к смене направления магнитного поля  $B_o$  и смене полярности МПЗ.
- Постоянство магнитного поля Земли во времени определяется в модели постоянством  $pT$ -параметров в области фазового перехода, которые являются достаточно стабильными.
- Относительная независимость от основного поля Земли источника магнитного поля ГМА. Модель, в которой реализуется независимое изменение поля ГМА, позволила найти объяснение современному дрейфу магнитных полюсов и их дрейфу в геологическом прошлом.
- Представление ФВХ как гидродинамические вихри Россби, у которых западный дрейф определяется кориолисовыми силами, позволило найти простое объяснение западному дрейфу не применяя идеи «прокручивания» ядра относительно мантии, как в модели холодной Земли.
- Модель джерков, как результат изменения режима авторегулирования температуры в области генерации ГМА хорошо «вписалась» в термодинамику горячей модели. Явление джерков широко дискутируется в литературе, причем даже существует точка зрения, что это скорее магнитосферные процессы.
- Модель открывает путь к объяснению особенностей магнитных полей планет, Луны и спутников больших планет.

Возникает вопрос о том, имеются ли какие-нибудь особенности на Земле, которые можно истолковать в поддержку нашей модели? Так как наша модель определяет конкретное положение области генерации - границу между внутренним и внешним ядром (F-слой), то вопрос должен касаться именно этой области. В самое последнее время, именно на границе внутреннего ядра была обнаружена цилиндрическая анизотропия акустических свойств (Кузнецов и др., 1989; Кузнецов, 1997), расположенная вдоль оси вращения. Эти результаты находятся в соответствии с нашей моделью генерации геомагнитного поля.

## VI. 7. Магнитное поле планет и спутников.

Продвижение в изучении магнитных полей планет и спутников достигнуто благодаря успехам космической технологии. Начало исследованиям было положено измерениями магнитного поля Луны, проведенными космическим аппаратом Луна-2 (Долгинов, 1982). За минувшие годы были измерены магнитные поля планет: Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, и спутников: Луны, Ио, Ганимеда и Титана. Поразительным открытием в этом цикле работ было обнаружение следов магнитного поля на спутниках планет-гигантов. Похоже, завершился более чем двадцатилетний спор между нашими (Долгинов, 1982) и американскими (Russell, 1993) магнитологами о том, имеется ли на Марсе дипольное поле, или оно только осталось в горных породах. Последнюю "точку" в этом споре поставил американский космический аппарат "Марс-Глобал-Сервейер", который вышел на орбиту вокруг Марса в сентябре 1997 г. и получил

убедительные данные о существовании в марсианской коре остаточной намагниченности - “вмороженной” памяти о когда-то существовавшем магнитном поле.

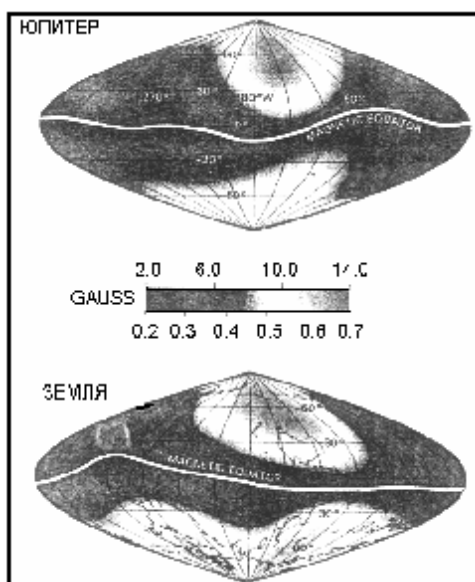


Рис. 6-30. Морфология магнитного поля Юпитера и Земли (Connerney, 1993).

К сожалению, такой ясности нет с магнитным полем Венеры, не удастся обнаружить каких-либо убедительных данных о результатах его измерения. То, что на Венере нет дипольного поля не вызывает сомнений, но было ли оно раньше? Ответ на этот вопрос весьма интересен в контексте нашей модели. Если его никогда не было, значит можно оценить минимально допустимую величину поля  $B_0$ , которое в значительной степени определяется скоростью вращения планеты. Тем интереснее, что Меркурий, который вращается всего в четыре раза быстрее Венеры, дипольным полем обладает. Если нет дипольного поля, но есть палеополе, то не происходит ли сейчас на Венере инверсия?

Одна из последних сенсаций в области изучения магнитного поля спутников, это обнаружение магнитного поля на спутниках Юпитера во время посещения его окрестностей космической станцией Galileo. Особую дискуссию вызвало наличие магнитного поля на Ганимеде (Stevenson, 1997; Cray, Bagenal, 1998). В этом плане обсуждались две возможности: Первая, это намагничивание горных пород Ганимеда магнитным полем Юпитера в более ранние времена, когда Ганимед был значительно ближе к Юпитеру, чем в настоящее время и, вторая возможность, это динамо в ядре Ганимеда. Однако, по данным о плотности ядра, на Ганимеде не может быть жидкого железного ядра, а оценки намагниченности пород от магнитного поля Юпитера дают только 5% от требуемой величины палеополя Ганимеда. Магнитологи высказывают и такие «фантастические» идеи относительно возможности генерации дипольного магнитного поля на Ганимеде в настоящее время. В любом случае, современные модели геомагнетизма не находят однозначного ответа на вопрос о магнитном поле на Ганимеде. Заметим, что эта задача очень близка и настолько же неразрешима, как и проблема генерации магнитного поля Луны, активно обсуждаемая учеными 20 и более лет тому назад (Runcorn, 1975).

Выше мы упоминали о том, что морфология геомагнитного поля весьма напоминает магнитное поле Юпитера. В этом можно убедиться, взглянув на рисунок 6-30 (Connerney, 1993). Для достижения большего эффекта, картина земного поля перевернута и вверху находится Южный полюс, а интенсивность поля Юпитера примерно в 10 раз выше, чем у Земли, однако общность этих проекций поразительна. Трудно себе представить, что Природа “выбрала” различные способы и механизмы для достижения

таких похожих результатов. Еще раз хочется обратиться к Ньютону и вспомнить, что “Природа проста и не роскошествует излишними причинами вещей”. В этом плане рассмотрим те данные о магнитных полях планет и спутников, которые известны на сегодня. Эти данные приведены в таблице 6.5 в первом столбце, во втором они же относительно геомагнитного поля. В третьем столбце приведены данные по скорости осевого вращения планет и спутников и их средний радиус. Эти данные потребуются нам для того, чтобы оценить, очень грубо, по порядку величин, возможное значение магнитного поля по нашей модели (н.м.).

Здесь необходимы пояснения. Дело в том, что по нашей модели величина дипольного поля:  $B = m_b^2 (S_X S_R w/R) E_R S_X^2$ . Положим, что электрические параметры токового контура для всех планет и спутников примерно одинаковы, а так же одинакова площадь  $S_X$ , занятая током, тогда мы можем записать:  $B \sim w/R$ , или:  $B \sim 1/TR$ .

Именно такая оценка относительного значения поля приведена в последнем столбце табл. 6.5. Это ориентировочная оценка, и к ней не надо относиться с особым доверием. Это связано с тем, что параметры:  $S_X$ ,  $S_R$ ,  $E_R$  и  $S_X$ , - могут быть различными у разных космических тел. Кроме этого, не совсем ясно, как сказывается величина  $w$ . Затем, нам неизвестны величины  $w$  и  $R$  планеты (спутника) в момент генерации дипольного поля и, наконец, мы не знаем, как могло бы происходить “старение” палеополя того или иного космического объекта. Поясним последнюю мысль на примере.

Таблица 6.5

Планета, спутник	$B$ , (Гс)	Поле, отн. Земли	$T$ , сутки	$R$ , км	Поле (модель)
Меркурий	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	59	2425	0.04
Венера	$< 310^{-5}$	0	243	6070	0.004
Земля	0,31	1	1	6378	1
Марс	$< 10^{-4}$	0	1	3395	2
Юпитер	4.2	10	0.4	71300	0.2
Сатурн	0.21	1	0.43	60100	0.25
Уран	0.25	1	0.7	24500	0.4
Луна	$< 10^{-5}$	0	27.3	1738	0.13
Ио	-	0	1.7	1810	2
Ганимед	-	0	7	2600	0.35

Все работы, посвященные интенсивности магнитного поля Земли в геологическом прошлом, показывают, что интенсивность поля раньше была в несколько раз выше и экспоненциально уменьшалась по мере приближения к настоящему времени. Чаще речь идет о виртуальном дипольном моменте  $p_m$  геомагнитного поля (Smith, 1967). Интенсивность земного поля в докембрии была примерно в 6 - 8 раз выше современного значения ( $R$  был примерно в два раза меньше, а  $T \sim R^2$ ). Как показано в Главе III, и качественно, и количественно, наша модель не противоречит экспериментальному факту уменьшения величины  $p_m$ .

В своих оценках мы, как правило, не учитывали эффект старения магнитных пород и, естественно, связанного с этим эффектом уменьшения интенсивности поля. Этот эффект действительно известен в палеомагнитологии. Оценим его возможную роль в оценке палеоинтенсивности поля. Положим, что процесс старения описывается экспонентой  $exp(-t/t_o)$ , где  $t$  - текущее время, а  $t_o$  - характерное время релаксации, в течение которого модуль палеополя уменьшается в 2.7 раза. Если принять  $t_o = 75$  млн. лет, то такая кривая неплохо описывает ход старения, следующий из нашей модели. Возникает вопрос: реально ли, чтобы интенсивность магнитного поля в течение такого срока уменьшилась бы в  $e$  раз? Если это правдоподобно, то можно считать, что мы нашли еще один аргумент в пользу нашей модели...

Обратимся к специалистам по плитной тектонике (Кокс, Харт, 1989), где авторы приводят температурную зависимость времени релаксации: При  $580^{\circ}\text{C}$  время релаксации зерен магнетита не превышает одной секунды, при  $560^{\circ}\text{C}$  оно возрастает до часа, а при комнатной температуре обычно достигает сотен миллионов лет и более. Таким образом, наше предположение можно считать подтвержденным. Возможно, такой подход позволяет по-новому “взглянуть” на данные по поведению магнитного поля в фанерозое. Понижение интенсивности поля в селуре и девоне (Палеомагнитология, 1982) может оказаться обязанным не собственно уменьшению величины магнитного поля Земли в эти периоды, а, например, увеличению скорости старения за счет более высоких температур, господствовавших на Земле в это время.

Эффект старения может найти объяснение тому, что реальные поля планет и спутников меньше, чем следующие из нашей оценки. Всё было бы “нормально”, если бы из нашей закономерности не “выбивался” Юпитер, со своим полем, которое оказывается большим, чем следует из наших оценок. По-видимому, если мы учтем, что величина  $S_X$  на Юпитере больше, а на Марсе, меньше чем на Земле, данные последнего столбца таблицы 6.5 окажутся намного ближе к реальным значениям величин поля.

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 холлового (или динамо) механизма, возникающего в области ФП под действием ортогональных  $E_R$  и  $B_o$ .
- Температура F-слоя за счет протекания процессов тепло и массопереноса поддерживается постоянной. В слое возникают: - стационарные вихри (глобальные магнитные аномалии), - вихри, движущиеся вдоль поверхности F-слоя в западном направлении (фокусы векового хода) (и те, и другие - вихри Россби), конвективные механизмы, приводящие к охлаждению или нагреву слоя, изменения режима ФП (переход от преимущества конденсации над испарением и наоборот) и т.п.
- Эти гидродинамические процессы происходят в хорошо проводящей двухфазной среде в “присутствии” дипольного поля. Возможны явления “вмораживания” поля в проводящую среду и “маркировки” этих процессов на земной поверхности, как известных явлений геомагнетизма, таких как глобальные магнитные аномалии, фокусы векового хода, джерки, экскурсы и инверсии.
- Модель генерации геомагнитного поля находит простое и естественное объяснение дрейфу магнитных полюсов.

### *Литература*

- Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Симоненко В.А., Фортов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. УФН. 1993. Т. 163. № 5. С. 1-34.
- Адушкин В.В., Ан В.А., Овчинников В.М., Краснощеков Д.Н. О скачке плотности на внутренней границе земного ядра по наблюдениям волн PkiKP на расстояниях  $6^{\circ}$ . ДАН. 1997. Т. 334. № 3. С.382-385.
- Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок и хаос. О детерминистском подходе к турбулентности. М.: Мир. 1991. 367 с.
- Ботвиновский В.В. Моделирование генератора главного магнитного поля Земли с помощью магнитных диполей и токовых контуров. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Новосибирск. 2000.

- Васильев Б.В. Термо-гиромагнитный эффект. Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. № 1. С. 47-50.
- Вадковский В.Н., Гурарий Г.З., Мамиконьян М.Р. Анализ процесса смены знака геомагнитного поля. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1980. № 7. С. 55-69.
- Вернов С.Н., Савенко И.А., Шеврин П.И. и др. Внешний радиационный пояс Земли на высоте 320 км. ДАН СССР. 1961. Т. 140. N. 4. С. 787-790.
- Головков В.П., Коломийцева Г.И., Коняшенко Л.П., Семенова Г.М. Каталог среднегодовых значений элементов геомагнитного поля на мировой сети магнитных обсерваторий. Выпуски XVI - XXX. 1983 - 1997. М.: ИЗМИРАН.
- Григорьев В.Н., Григорьева Е.В., Ростоцкий В.С. Бароэлектрический эффект и магнитные поля планет и звезд. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 4. С. 3-14.
- Григорьева Е.В. Магнитное поле, порождаемое зарядами в медленно вращающейся системе отсчета. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 10. С. 24-30.
- Джекобс Дж. Земное ядро. М.: Мир. 1979. 305 с.
- Долгинов Ш.Ш. Магнетизм планет. М.: 1982. 130 с. Итоги науки и техники. ВИНТИ. Серия: Исследования космического пространства. Т. 18.
- Жижимов О.Л. Оценка размера области генерации магнитного поля Земли. 1988. Новосибирск: Препринт ИГиГ № 13. 12 с.
- Каулинг Т. Магнитная гидродинамика. М.: ИЛ. 1959. 132 с.
- Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. М.: Мир. 1989. 427 с.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и солнечной системы (Модели образования и эволюции) 1984. Новосибирск: ИГГ. Вып. 639. 90 с.
- Кузнецов В.В., Павлова И.В., Семаков Н.Н. Оценка степени недипольности главного магнитного поля Земли. ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 4. С. 819-821.
- Кузнецов В.В., Доровский В.Н., Семаков Н.Н. и Котляр П.Е. Физика Земли. Новый взгляд на некоторые проблемы. Новосибирск: Наука, 1989. 128 с.
- Кузнецов В.В. Физика Земли и солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990. 217 с.
- Кузнецов В.В., Павлова И.В., Семаков Н.Н. Оценка положения виртуальных магнитных полюсов (По результатам советско-канадских измерений в Центральной Арктике). Геология и геофизика. 1990. Т. 31. № 2. С. 115-116.
- Кузнецов В.В. Фокусы векового хода как гидродинамические вихри Россби. ДАН. 1995. Т. 340. № 5. С. 685-687.
- Кузнецов В.В. Положение северного магнитного полюса в 1994 г. ДАН. 1996. Т. 348, N.3. С. 397- 399.
- Кузнецов В.В. Анизотропия свойств внутреннего ядра. УФН. 1997. Т. 167. № 9. С. 1001-1012.
- Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998-а. Т. 38. С. 166-172.
- Кузнецов В.В. Прогноз положения южного Магнитного Полюса на 1999 г. ДАН. 1998-б. Т. 361. № 2. С. 348-251.
- Матора И.М. Природа сверхвращения верхней атмосферы Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 2000. Т. 40. № 5. С. 139-142.
- Незлин М.В., Снежкин Е.Н. Вихри Россби и спиральные структуры. М.: Наука. 1990. 238с.
- Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 412 с.
- Паркер Е. Космические магнитные поля. М.: Мир. 1982. 608 с. (ч. I), 479 с. (ч. II).
- Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М. Мир.: 1986. 525 с.
- Петрова Г.Н., Сперантова И.Б. Напряженность поля во время инверсии. В сб. Тонкая структура геомагнитного поля. 1986. М.: ИЗМИРАН. С. 33-44.
- Петрова Г.Н., Пospelова Г.А. Экскурсы геомагнитного поля. Земля и Вселенная. 1992. № 3. С. 3 - 7.
- Почтарев В.И. О динамике каспийского центра вековых изменений магнитного поля Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 1978. Т. 10. N. 9. С. 183-185.

Рикитаки Т. Электромагнетизм и внутреннее строение Земли. Л.: Недра. 1968. 331 с.  
 Ришбет Г., Гарриот О.К. Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеоздат. 1975. 303 с.  
 Рузмайкин А.А., Трубихин В.Л. Статистика инверсий геомагнитного поля за последние 80 млн. лет. Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 166-170.  
 Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир. 1972. 342 с.  
 Тихомолов Е.М. Поддержание вихревых структур в подогреваемом слое жидкости. Письма ЖЭТФ. 1994. Т. 59 Вып. 3. С. 155-158.  
 Тюленева Г.С. Специфика магнетизма прямо и обратно намагниченных эффузивных горных пород. Автореферат дис. к.ф.-м.н. Л.: ЛОИЗМИРАН. 12 с.  
 Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж.Н. Курс современного анализа. Ч II.М.: Г.И. ФМ.Л. 1963.  
 Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. М.: Гостехиздат. 1949. 155с.  
 Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 345 с.  
 Эйхенвальд А.А. Электричество. М.Л.: ГИЗ. 1927. 758 с.  
 Яновский Б.М. Земной магнетизм. М.: ГИТТЛ. 1953. 591 с.

Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Moul J.-L., Saracco G. Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks. J. Geoph. Res. 1996. V. 101. N. B10. P. 21975-21994.  
 Alldredge L.R., Hurwitz L. Radial dipoles as the sources of the Earth's main magnetic field. J. Geophys. Res. 1964. V. 69. P. 2631- 2636.  
 Alldridge, L.R., Stearns C.O. Dipole model of the sources of the Earth's magnetic field. J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 6583-6593.  
 Alldridge, L.R. Circular current loops, magnetic dipoles and spherical harmonic analyses. J. Geomag. Geoelectr. 1980. V. 32. P. 357-364.  
 Alldridge, L.R. Current loops fitted to geomagnetic model spherical harmonic coefficients. J. Geomag. Geoelectr. 1987. V. 39. P. 271-296.  
 Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise. Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. N. 4. P. 381- 384.  
 Barton C.E., Hutchinson R., Quilty P., et al., Quest for the magnetic poles: relocation of the South magnetic pole at sea, 1986. Record Bureau of Mineral Resources, geology and geophysics. 1986. 20 p.  
 Barton C.E. Survey tracks current position of South Magnetic Pole. EOS. Trans. AGU. 2002 V. 83. P. 291.  
 Barton C.E., Newitt L.R. Reply of Campbell W.H. Comment on “ Survey tracks current position of South Magnetic Pole” and “Recent acceleration of the North Magnetic Pole linked to magnetic jerk” EOS. Trans. AGU. 2003. V. 84. P. 42.  
 Bauer L.A. Beitrage zur Kenntnis des Wesens der Sakular-variation des Erdmagnetismus. Dissert. Univ. Berlin. 1895.  
 Campbell W.H. Comment on “ Survey tracks current position of South Magnetic Pole” and “Recent acceleration of the North Magnetic Pole linked to magnetic jerk” EOS. Trans. AGU. 2003. V. 84. P. 42.  
 Cheng A.F., Paranicas C. Implications of Io's magnetic signature: Ferromagnetism? Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. N. 21. P. 2879-2882.  
 Clement B.M. Geographical distribution of transitional VGPs: evidence for non-zonal equatorial symmetry during the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal. Earth Planet. Sci. Lett. 1991. V. 104. P. 48-58.  
 Clement B.M. Dependence of the duration of geomagnetic polarity reversals on site latitude. Nature. 2004. V. 428. P. 637-640.  
 Connerney J.E.P. Magnetic fields of the outer planets. J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N. E10. P. 18659-18679.  
 Constable C. Link between geomagnetic reversal paths and secular variation of the field over the past 5 Myr. Nature. 1992. V. 358. P. 230-233.  
 Constable C. About turn for reversals. Nature. 1993. V. 361. P. 305-306.

- Courtillet V. et al., Sur une acceleration recente de la variation seculaire du champ magnetique terrestre. C.R. Acad. Sci. Paris. Ser. D. 1978. V. 287. P. 1095-1098.
- Courtillet V., Besse J. Magnetic field reversal, polar wander, and core-mantle coupling. Science. 1987. V. 237. P. 1140-1147.
- Crary F.J., Bagenal F. Remanent ferromagnetism and interior structure of Ganymede. J. Geophys. Res. 1998. V. 103. N. E 11. P. 25757-25773.
- Dawson E., Newitt L.R. The magnetic poles of the Earth. J. Geomag. Geoelectr. 1982. V. 34. P. 225-240.
- De Michelis P., Consolini G., Meloni A. Sign Singularity in the Secular Acceleration of the Geomagnetic Field. Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 5023-5026.
- Fuller M., Weeks R. Superplumes and superchrons. Nature. 1992. V. 356. P. 16-17.
- Fuller M., Laj C., Herrero-Bervera E. The reversal of the Earth's magnetic field. American Scientist. 1996. V. 84. P. 552-561.
- Gavoret J., Gibert D., Menvielle M., Le Mouel J.L. Long-term variations of the external and internal components of the Earth's magnetic field. J. Geophys. Res. 1986. V. 91. N. B5. P. 4787-4796.
- Gubbins D., Coe R.S. Longitudinally confined geomagnetic reversal parths from non-dipolar transition fields. Nature. 1993. V. 362. P. 51-53.
- Gubbins D. Influence of the inner core. Nature. 1993. V. 365. P. 20.
- Gubbins D., Sarson G. Geomagnetic field morphologies from a kinematic dynamo model. Nature. 1994. V. 368. P. 51-55.
- Guyodo Y., Valet J.-P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr. Nature. 1999. V. 399. P. 249-252.
- Hollerbach R., Jones C.A. Influence of the Earth's inner core geomagnetic fluctuations and reversals. Nature. 1993. V. 365. P. 541-543.
- Hope E.P. Geotectonics of the Arctic Ocean and the Great Arctic Magnetic Anomaly. J. Geophys. Res. 1959. V. 164. N. 4. P. 407-427.
- Inglis D.R. Theories of the Earth's magnetism. Rev. Mod. Phys. 1955. V.27. N. 2. P. 212-248.
- Jackson A. Still poles apart on reversals? Nature. 1992. V. 358. P. 194-195.
- Jacobs J.A. Reversals of the Earth's magnetic field. 1994. Cambridge Univ. Press. New York. 346 p.
- Knapp, D.G. The synthesis of external magnetic fields by means of radial internal dipoles. Annales de Geophysique. 1955. V. 11. P. 83-90.
- Koci A. Geomagnetic field at the time of reversals, Geomagnetic Field in Quaternary. Report KAPG, Potsdam:1980. P. 87-92.
- Kuznetsov V.V. A model of virtual geomagnetic pole motion during reversals. Phys. Earth Plan. Inter. 1999. V. 115. P. 173-179.
- Madden T., Le Mouel J.L. The recent secular variation and the motion at the core surface. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1982. V. A 306. P. 271-280.
- Mandea M., Bellander E., Le Mouel J.-L. A geomagnetic jerk for the end of the 20<sup>th</sup> century? Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 183. P. 369-373.
- McDougall, I.; Brown, F. H.; Cerling, T. E.; Hillhouse, J. W. A reappraisal of the geomagnetic polarity time scale to 4 Ma using data from the Turkana Basin, East Africa. Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. N. 23. P. 2349-2352.
- McFadden P.L. Reversal ideas up-ended. Nature. 1992. V. 356. P. 381.
- McFadden P.L., Barton C.E., Merrill R.T. Do virtual geomagnetic poles follow preferred parths during geomagnetic reversals? Nature. 1993. V. 361. P. 342-344.
- McFadden P.L., Merrill R.T. History of Earth's magnetic field and possible connections to core-mantle boundary processes. J. Geophys. Res. 1995. V. 100. N. B1. P. 307-316.
- Nevanlinna H. Some characteristics of the horizontal field variations around the geomagnetic jerk of 1970. J. Geophys. 1984. V. 55. N 1. P. 37-40.



- Newitt L.R., Niblett E.R. Relocation of the north magnetic dip pole. *Can. J. Earth Sci.* 1986. V. 23. P.1062-1067.
- Newitt L.R., Barton C.E. The position of the North Magnetic dip pole in 1994. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1996. V. 48. N. 2. P. 221-232.
- Newitt L.R., Manda M., McKee L.A., Orgeval J.J. Recent acceleration of the North Magnetic Pole linked to magnetic jerk. *EOS, Transactions AGU.* 2002. V. 83. P. 385.
- Oyama K.J., Schlegel K. Anomalous electron temperatures above the south american magnetic field anomaly. *Planet Space Sci.* 1984. V. 32. N.12. P. 1513-1522.
- Parker E.N. The occasional reversal of the geomagnetic field. *Astrophys. J.* 1969. V. 158. P. 815-827.
- Peddie N.W., Zunde A.K. A model of geomagnetic secular variation for 1980-1983. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1987. V. 48. P. 324-329.
- Petrova G.N. Displacement of VGP during reversals. *Geomagnetic field in Quaternary.* Potsdam. 1990. P. 37-42.
- Pinto O. Jr., Gonzalez W.D., Pinto R.C.A et al. The South Atlantic magnetic anomaly: three decades of research. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. V. 54. N. 9. P.1129-1134.
- Runcorn S.K. On the interpretation of lunar magnetism. *Phys. Earth Plan. Inter.* 1975. V. 10. P. 327-337.
- Russell C.T. Magnetic fields of the terrestrial planets. *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. N. E10. P. 18681-18695.
- Serson P.H. Tracking the north magnetic pole. *New Scientist.* 1981. June.
- Smith P.J. Intensity of the Earth's magnetic field in the geological past. *Nature.* 1967. V. 216. P. 989-990.
- Stevenson D.J. What might Ganymede tell us about Geodynamo? Abstracts 8<sup>th</sup> Scientific Assembly of IAGA with ACMA and STP Symposia. 1997. Uppsala. P. 7.
- Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a "small-circle" assessment of the Gondwanan polar-wander path. *Geophys. J. Int.* 1996. V. 125. P. 115-122.
- Tikhomolov E.M. Anomalous poleward drift of the solar magnetic field as a result of Rossby cyclone excitation. *Astronomy and Astrophysics.* 1995. V. 301. P. 277-281.
- Tikhomolov E.M. Short-scale convectional long-scale deformationally unstable Rossby wave in a rotating fluid layer heated from below. *Phys. Fluids.* 1996. V. 8. № 12. P. 3329-3337.
- Tric E., Laj C., Jehanno C., et al. High resolution record of the Upper Olduvai transition from Po Valley (Italy) sediments: support for dipolar transition geometry? *Phys. Earth Planet. Inter.* 1991. V. 65, P. 319-336.
- Van Horn H.M. Dense astrophysical plasmas. *Science.* 1991. V. 252. P. 384-389.
- Valet J.-P., Meynadler L. Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years. *Nature.* 1993. V. 366. P. 234-238.
- Vestine E.H. The Earth's core. *Trans. Am. Geophys. Union.* 1954. V. 35. P. 63-72.
- Weber R., Dexter L., Holloway Ch., Buxton M. Polar bridge an arctic odyssey. Key Porter Books Limited. Canada. Ontario. 1990.
- Wigner E.R. On the interaction of electron in metals. *Phys. Rev.* 1934. V. 46. P. 1002-1011.
- Yamazaki T., Oda H. A Brunhes-Matuyama polarity transition record from anoxic sediments in the South Atlantic (Ocean Drilling Program Hole 1082C). *Earth Planets Space.* 2001. V. 53. P. 817-827.
- YANG Taobao, YU Yongtao, LI Jijun et al. Paleomagnetic excursions recorded in Yanci Playa in Middle Hexi Corridor, NW China since the last interglacial. *J. of Mountain Science.* 2004. V. 1. N. 2. P. 128-142.
- Yukutake T., Tachinaka H. The non-dipole part of the Earth's magnetic field. *Bull. Earthquake Res. Inst.* 1968. N.46. P. 1027-1074.

## Глава VII. ГЕОДИНАМИКА ГОРЯЧЕЙ ЗЕМЛИ

Термин “геодинамика” приобрел в течение последних 40 лет особую популярность в науках о Земле в связи с созданием и интенсивным внедрением в эти науки плитной тектоники. В более широком плане, под геодинамикой подчас понимают движения в коре, мантии и ядре Земли. Иногда сюда же относят и ту область науки, которую Дж. Педлоски (1984) выделил в геофизическую гидродинамику. Реже, к геодинамике относят динамику ионосферы и магнитосферы.

В этой книге рассмотрены некоторые вопросы геодинамики, имеющие отношение к модели горячей, расширяющейся и пульсирующей Земли. Геологические и, естественно, геодинамические аспекты расширяющейся Земли изучены и подробно описаны в ряде статей и монографий. Следует выделить фундаментальные труды австралийского геолога профессора С.У. Кэри (Carey, 1976; Кэри, 1991).

Развиваемые в этой книге идеи относятся к области науки, называемой геофизической гидродинамикой. В этой главе рассмотрены ряд вопросов, которые, по сути, относятся к разделу физики «Гидродинамика». По-видимому, правильно было бы включить сюда и физику землетрясения, как раздел гидродинамики, изучающий физику ударных волн, в том числе и в твердом теле. Однако это нарушило бы целостность следующей главы, посвященной одному из крупнейших разделов физики Земли - сейсмичности.

Геодинамика (тектоника плит) занимает “ключевую” позицию в современной геологии, однако, именно здесь скопилось наибольшее количество неразрешенных вопросов, противоречий и парадоксов. Перечислим некоторые из них:

- Несоответствие степени сжатия современной Земли и скорости её вращения (показывающее отсутствие глобальной конвекции в мантии);
- Несоответствие между незначительным увеличением периметра Тихого океана и идей распада Пангеи – Гондваны, парадокс Мезервея, показывающий невозможность расположения Гондваны на Земле современного радиуса;
- Нестыковка палеомагнитных оценок положений полюсов, направлению дрейфа материков (отрицающая общепринятый в палеомагнитологии подход);
- Несоответствие фактических данных о Земле, её ядре, мантии, форме геоида и гравитационным аномалиям, идее конвекции в мантии и роли субдукции в этой конвекции и т.п.

В главе VII обсуждается попытка найти решение этих проблем в контексте модели горячей, расширяющейся Земли.

### VII. 1. Геодинамика внешнего ядра и фрактальный характер инверсий.

Информация о периодах инверсий неоднократно привлекала внимание исследователей, которых интересовал, в частности, такой вопрос: можно ли сказать что-либо определенное о характере эволюции Земли? Например, развивалась Земля случайным образом, или в природе ее эволюции заложены какие-то принципы? Надо сказать, что анализ данных по инверсиям (Харланд и др., 1985) приводил авторов к различным выводам: от полного отрицания каких-либо закономерностей, до выделения четкой периодичности. В течение последних примерно 80 млн. лет инверсии на Земле случались в среднем примерно 2-3 раза в миллион лет. В течение предыдущих 40 млн. лет (120 – 80) инверсий не было вовсе, а во время предыдущих 40 (от 160 до 120 млн. лет назад) - характер инверсий был примерно тот же, что и в течение последних 80 млн. лет (см. рис. 7-1). Период 120 - 80 млн. лет назад, в течение которого инверсий вообще не было, получил название меловой суперхрон. По некоторым данным, ещё ранее 160 млн. лет тому назад, тоже происходил суперхрон - юрский, еще раньше (250-300) - карбонский и т.п. В истории магнитного поля Земли суперхроны случались довольно регулярно, они перемежались периодами частых инверсий. Замечено, что длительность периодов суперхронов со временем постепенно увеличивалась таким образом, что последний из них был самым длинным.

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, определить и физику суперплюмов.

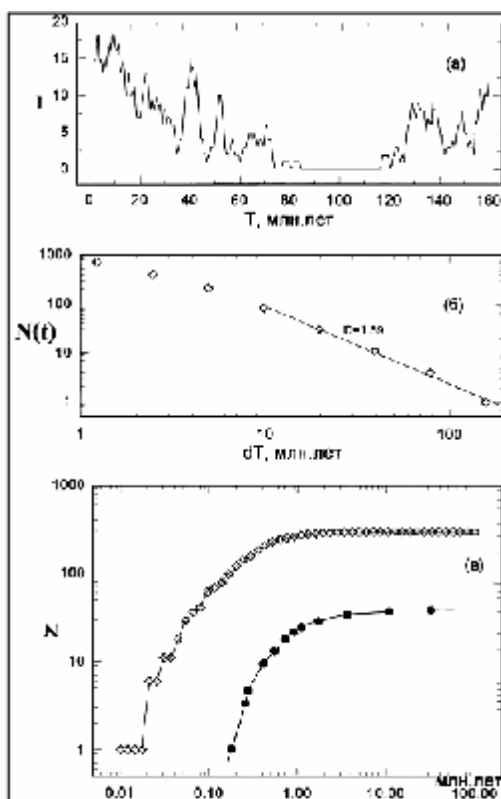


Рис. 7-1. Распределение количества инверсий  $I$ , произошедших в течение трех млн. лет, за  $T = 160$  млн. лет эволюции геомагнитного поля (Харланд, 1985) - (а); б - оценка величины клеточной фрактальной размерности ( $D = \lg N(t) / \lg dT$ ); в - распределение интервалов времени между инверсиями, меньшими, чем заданный ( $N$  - количество интервалов,  $T$  - продолжительность интервала). Верхняя кривая - по данным (Харланд, 1985), нижняя - по модели.

Результаты анализа частоты инверсий оказались противоречивы: от полного отрицания наличия периодичности А.А.Рузмайкиным и В.Л.Трубицыным (1992), до предложения А.Мазоуд и С. Лаж (1991) использовать цикл изменения частоты инверсий длительностью в 15 млн. лет, как количественный тест. Рузмайкин и Трубицын, анализируя статистику инверсий за последние 80 млн. лет по шкале Харланда и др. (1985), показали, что моменты обращений поля распределены по случайному (пуассоновскому) закону. Они специально выясняли такой вопрос: может ли в случайном процессе инверсий поля присутствовать периодичность? Оказывается, что появление пика в спектре мощности случайного процесса возможно, однако, по мнению авторов, это необязательно соответствует наличию какой-либо периодической составляющей (Рузмайкин и Трубицын, 1992). Иванов (1993) с целью поиска периодичности и самоподобия исследовал те же данные (за 160 млн. лет) и отметил, что идея масштабного

самоподобия палеомагнитной шкалы неосознанно заложена ее авторами (Mandelbrot, 1983; Turcote, 1989) во введенной ими терминологии, определяющей иерархию эпох поведения геомагнитного поля. Последовательно выделяются субхроны, хроны, суперхроны и гиперхроны; причем их продолжительность прогрессивно увеличивается. Иванов (1993) подводит некоторую количественную базу под идею самоподобия палеомагнитной шкалы. Он показывает, что на масштабах времени порядка 1 млн. лет множество инверсий геомагнитного поля можно рассматривать как поток независимых событий, аналогичный пуассоновскому процессу. На больших масштабах ситуация меняется и поток событий не является полностью случайным, а проявляет хорошо выраженное самоподобие. Такая характеристика свидетельствует, по мнению Иванова (1993), о том, что последовательность инверсий, оставаясь хаотической, не является полностью случайной (так называемый слабый хаос). Иванов (1996) рассмотрел мультифрактальные свойства множества обращений магнитного поля и оценил размерность аттрактора. Оценка автора фрактальной размерности инверсий показывает заметную кластеризацию событий во времени и наличие самоорганизации.

Mazaud и Laj (1991) анализировали различающиеся шкалы геомагнитных инверсий за последние 100 млн. лет и получили несколько отличающиеся один от другого результаты. Общим для всех трех шкал было то, что выявлялись характерные пики в спектре мощности: причем, для каждого спектра, - свой. Для разных шкал эти пики соответствовали периоду самоподобия в 14 - 16,5 млн. лет. Эти авторы полагают, что наличие пика в спектре мощности может служить своеобразным количественным тестом для других геофизических явлений. Mazaud и Laj не дают физической интерпретации полученного результата, однако, полагают, что это явление, скорее всего, связано с конвекцией жидкости в земном ядре, причем это движение находит свое отражение в процессах, происходящих в мантии, в частности, в нижней мантии, на границе ее с ядром. Принято считать, что замеченная периодичность, вероятно, контролируется длиннопериодными вариациями геодинамо.

*Постановка задачи.* На рис. 7-1 изображен ряд инверсий ( $I$ ) геомагнитного поля, случившихся за время последних 160 млн. лет (Харланд и др., 1985). Ниже, на этом рисунке, приведена оценка клеточной фрактальной размерности ряда периодов времени между инверсиями, полученная методом покрытий (Федер, 1991). Она выражается зависимостью:

$$N(d) = ad^D, \quad (7.1)$$

здесь  $d$  - имеет смысл длительности периода ( $dT$ ) между инверсиями,  $a \sim p(t)$  вероятность того, что произвольно выбранный интервал будет иметь продолжительность  $t$ , величина фрактальной размерности  $D = 1,59$ , а  $N(d)$  означает число интервалов. Зависимости подобного типа принято считать скейлинговыми соотношениями. В нашем случае, это выражение характеризует масштабную инвариантность процесса для продолжительностей интервалов одинаковой полярности поля (Иванов, 1996; Федер, 1991). Полученная зависимость показывает, что количество интервалов, например, длительностью в 10 млн. лет в три раза больше, чем периодов в 20 млн. лет и т.п. Это соотношение справедливо для периодов, больших одного млн. лет (Иванов, 1996). Еще ниже показан график количества интервалов  $N$  с длительностью (верхняя кривая), меньшей, чем соответствующий период, заданный по оси  $T$ , на которой длительность интервалов приведена в млн. лет.

Сформулируем задачу: необходимо обосновать возможный физический механизм, связанный с генерацией геомагнитного поля, в котором могли бы осуществиться, по крайней мере, две особенности. Во-первых, при генерации поля должны проявиться явления, приводящие к смене полярности поля и, во-вторых, количество периодов различных полярностей поля  $N(t)$  должно быть:

$$N(t) \sim t^D, \quad (7.2)$$

где  $D \approx 1,6$ . Примем во внимание то, что какова бы ни была модель генерации геомагнитного поля, она в любом случае оказывается тесно связанной с процессами, происходящими в жидкой части земного ядра. По всей видимости, именно здесь можно попытаться выявить искомые механизмы.

*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. 7.2). 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 Р-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 приходится 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.

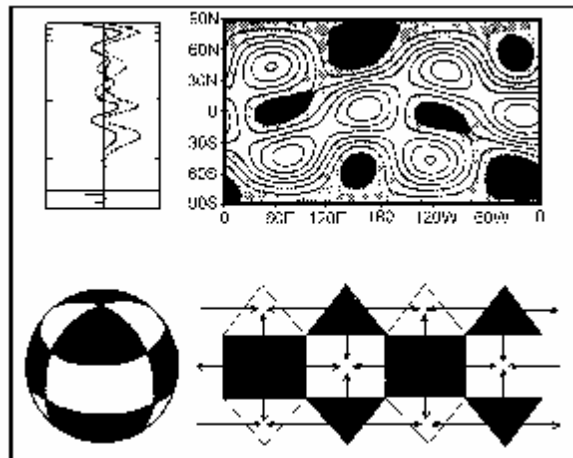


Рис. 7-2. Splitting-функция для моды  ${}_{11}S_4$ , слева - kernels-функция для  $s = 4$  (точки -  $V_p$ , сплошная - распределение плотности) (Giardini et al., 1988) - вверху. Внизу слева - сферическое колебание с тессеральной гармоникой  $P_4^3$ , справа - структура конвективных ячеек во внешнем 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  $P_4^3$ . Здесь обозначены степень гармоники  $j = 4$ , и ее порядок  $m = 3$ . На рис. 7-2 показана схема конвективного движения вещества в такой структуре, состоящей из 12 ячеек.

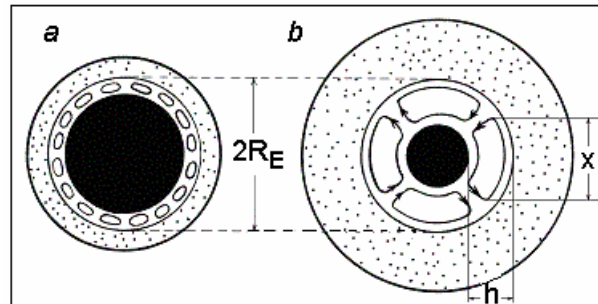


Рис. 7-3. Конвекция с образованием устойчивых ячеек Рэлея-Бенара на начальном этапе эволюции Земли (а). По мере увеличения толщины внешнего ядра  $h$  количество ячеек уменьшается (б).

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. 7-3), что обязано приводить к перестройке конвекции, т.к. горизонтальный линейный размер устойчивой конвективной ячейки  $x$  связан с ее высотой  $h(t)$  примерным соотношением:  $h \gg 0,5x$ . Возможно, эта пропорция определяется “золотым” сечением:  $x = 0,618$ ,  $h = 0,382$ . В любом случае, размеры устойчивой конвективной ячейки  $h$  и  $x$  взаимосвязаны.

Как известно, тепловая конвекция обладает фрактальной структурой, фрактальное подмножество меры конвективной ячейки определяется функцией  $f(x)$  (Федер, 1991), изображенной в правом нижнем углу рис. 7-4. Примем, что функция  $f(x)$  (характеризующая спектр сингулярностей процесса) имеет смысл устойчивости состояния конвективной ячейки: когда  $f(x) \approx 1$ , ячейка обладает наибольшей устойчивостью и, по мере уменьшения ее величины ( $f(x) < 1$ ), устойчивость ячейки уменьшается. Из рисунка видно, что функция  $f(x)$  асимметрична относительно параметра  $x$ : при  $x < x_0$ , функция убывает примерно в три раза быстрее, чем в случае  $x > x_0$ .

Ориентируем ось  $x$  вдоль экватора границы ядро-мантия. Построим вдоль этой оси графики функций  $f(x)$  для различных  $x_0$  (аналогичных изображенным в правом углу рис. 7-4), каждое значение которых:

$$x_{0j} = 2\pi R_E / j, \quad (7.3)$$

где  $x_{0j}$  - длина устойчивой конвективной ячейки,  $R_E$  - радиус внешнего ядра,  $j$  - количество конвективных ячеек вдоль экватора внешнего ядра (степень гармоники) и  $m$  - число ячеек вдоль меридиана (порядок гармоники). Примем одно из условий устойчивости конвекции:  $j = m$ . Еще одно условие устойчивости мы оговорили выше, оно касается отношения высоты конвективной ячейки к ее размеру по горизонтали:  $h \approx 0,5 x_0$ . На рис. 7-4, в координатах  $x-f(x)$  изображены значения  $f(x)$  для конвективных ячеек, у которых  $j$  принимает значения:  $j = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ , ( $x_{0j} = 11; 5,5; 3,6; 2,75; 2,2; \dots$  тыс. км). По оси ( $-y$ ) отложена толщина ядра  $h$  (тыс. км) =  $R_E - R_G$ , где  $R_G$  - радиус внутреннего ядра. Из рисунка следует, что для различных значений  $j$ , функции  $f(x)$  значительно между собой перекрываются. Это означает, что конвективная ячейка может оказаться устойчивой

в сравнительно малой области значений  $x$  (примерно в  $1/4$  от величины  $x_0$ , в его окрестности).

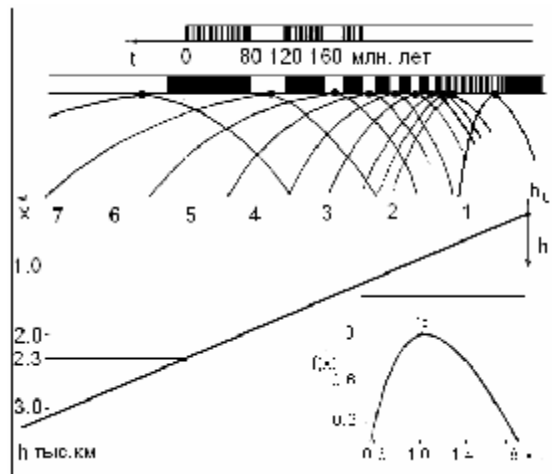


Рис. 7-4. Графики функций, характеризующих устойчивость конвективных ячеек с различными размерами  $x$ . Вверху - шкала инверсий (черные) и суперхронов (белые интервалы). Справа внизу - фрактальная мера конвективной ячейки  $f(x) = 1$ , ( $x_0 \approx 1$ ) (Федер, 1991).

Уточним предположения, о которых шла речь выше:

- В процессе эволюции Земли величина  $h$  возрастает.
- В определенные моменты времени происходит смена режима конвекции.
- Геомагнитное поле оказывается устойчивым в те моменты времени, когда устойчива конвекция, каков бы ни был механизм его генерации, и оно меняет свою полярность в те моменты, когда меняется режим конвекции. (Надо сказать, что наши допущения не совсем безосновательны, они подкрепляются развиваемыми в Главе VI идеями генерации геомагнитного поля).
- Допустим, что на “долю” устойчивой конвекции приходится примерно  $1/4$  от всей длины интервала ( $x_{oj} - x_{oj-2}$ ), в то время как на долю периода инверсий - оставшиеся  $3/4$ . Последнее предположение вызвано асимметрией функции  $f(x)$ .

Принятые предположения позволяют рассчитать ряд длин  $I_j = x_{oj} - x_{oj-2}$ . Каждое из полученных таким образом чисел составляет упорядоченное численное множество: 5,5; 3,6; 2,7; 2,2; 1,83; 1,57; 1,37; 1,22; 1,1; 1,0 и т.д. (в тыс. км). Каждое из этих  $I$  разбиваем на  $1/4$  и  $3/4$  (например, вместо 5,5 будем иметь: 4,1 и 1,4 и т.д.) и составляем новое множество. Числа этого множества имеют в нашей модели смысл длительностей режимов неустойчивой (периодов инверсий) и устойчивой (суперхронов) конвекции. (Это оказывается возможным при выполнении очевидного условия:  $t \sim I/v$ , где  $v$  скорость изменения  $h$  и, соответственно,  $x$  и  $I$ ).

С помощью метода покрытий, строим кривую (нижнюю на рис. 7-1-в), которая оказывается аналогичной верхней (построенной по данным каталога Харланда и др., 1985). Похожесть обеих кривых (рис. 7-1-в) говорит о том, что мы, возможно, правильно выбрали простую физическую модель, адекватно отражающую природу явления инверсий. Чтобы еще раз убедиться в этом, оценим величину фрактальной размерности полученного нами множества. Количество интервалов  $N(t)$  этого счетного множества аппроксимируется зависимостью:

$$N(t) \sim t^{-1,6}, \quad (7.5)$$

что является скейлинговым соотношением. Полученная фрактальная размерность  $D$  (степень при  $t$ ) совпадает с  $D$ , оцененной по данным каталога инверсий (см. рис 7-1-б). Это обстоятельство подкрепляет уверенность в том, что мы, возможно, нашли верный

механизм явлений, связывающих фрактальные свойства и масштабную инвариантность инверсий поля с изменением режима конвекции в ядре Земли.

Получим аналитическое выражение для  $D$ . Как следует из (7.1):

$$I_j = x_{0j} - x_{0(j-2)} \gg 2\pi R_E/j^2 \quad (7.6)$$

Количество интервалов:

$$N(t) = 2 \times 2\pi R_E/I = 2j^2, \quad (7.7)$$

длительность интервала  $t \gg I/v$  ( $v$  - скорость “плавления” ядра), что составляет часть от полной длительности процесса  $v_o = h/v$ , или, безразмерное время интервала  $t' = 2\pi R_E/h j^2$ , а т.к.  $2\pi R_E \approx 10 h$ , то  $t' \approx 10/j^2$ .

Хаусдорфова размерность:

$$D = \lim_{(t \rightarrow 0)} \ln N(t)/\ln(1/t') \approx \ln 2j^2/\ln j^2/10. \quad (7.8)$$

Если принять  $D = 1.6$ , то можно оценить число  $j$ :

$$(\ln 2 + \ln j^2)/(\ln j^2 - \ln 10) = 1.6$$

Величина  $j$  оказывается порядка  $j \approx 30$ , что соответствует  $x_o \approx 700$  км, а  $h \approx 350$ .

*Обсуждение модели.* Полученная нами зависимость:  $N(t) \sim t^{-1.6}$  связывает изменяющуюся в процессе эволюции Земли длину конвективных ячеек  $I$  с их числом  $j$  вдоль экватора ядра Земли. Линейные размеры ячеек изменяются во времени. Это дает нам возможность оценить порядок скорости “плавления” внутреннего ядра  $v = dh/dt$ , и сравнить его со скоростью “геологических” процессов.

В настоящее время величина  $h = 2,3$  тыс. км, инверсии геомагнитного поля продолжаются в течение примерно 80 млн. лет. Длительность предыдущего (мелового) суперхрона составляла 40 млн. лет. Следовательно, длительность периода частых инверсий должна быть примерно в 3 раза длиннее, т.е. 120 млн. лет. Отсюда следует, что на Земле инверсии магнитного поля могут продолжаться еще примерно 40 млн. лет. Затем должен начаться (см. рис. 7-4) очень длинный суперхрон, причем, он будет продолжаться практически все оставшееся время существования геомагнитного поля, которое, возможно, вообще прекратит свое существование в тот момент, когда внутреннее ядро полностью “расплавится”. (Возможно, такое явление уже произошло на Луне и Марсе). Используя рис. 7-4, можно прийти к выводу, что в течение “последних” 100 млн. лет величина  $h$  увеличилась примерно на 600 км, что соответствует скорости “плавления ядра”  $v = 0,6$  см/год. Надо сказать, что с точки зрения привычных для нас скоростей геологических процессов, эта оценка вполне правдоподобна ( $dx/dt \approx 1$  см/год).

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, внутреннее ядро может «перегреться» и даже «закипеть». При этом «пузыри пара» могут подниматься к границе ядро-мантия и быть причиной возникновения плюмов и суперплюмов. Эта, отмечаемая многими геологами, корреляция не противоречит нашей модели.

Обратим внимание на полученное нами скейлинговое соотношение, имея ввиду, что  $N(t)$  имеет смысл частоты  $w$ . Перейдем от:  $N(t) \sim t^{-1.6}$  к спектру мощности флуктуаций периодов обращений поля, и получим:  $S(w) \sim w^{-g}$ , где  $g > 1$ . Частотная зависимость вида  $S(w) \sim w^{-g}$  для спектра мощности известна в различных областях физики под наименованием  $(1/f)$  фликкер-шума. Ряд временных интервалов инверсий и суперхронов, по-видимому, можно уподобить фликкер-шуму, аналогично тому, как это было сделано, например, А.А. Бердыевым и В.А. Мухамедовым (1987), где ставился вопрос, не является



ли последовательность землетрясений, имеющая вид:  $N(e) \sim e^{-g}$  (закон Гутенберга-Рихтера), фликкер-шумом. Как показано Г.Н. Бочковым и Ю.Е. Кузовлевым (1983), фликкер ( $1/f$ ) - шум обычно сопровождает стационарно протекающие необратимые процессы, он является результатом флуктуаций диссипативной системы, находящейся в термодинамически неравновесном состоянии. Иногда он интерпретируется как свойство, присущее системе, обладающей широким набором времен релаксации  $t$ , суммирующихся с весом  $t^{-1}$ . Фликкер-шум принято считать универсальным свойством диссипативных систем переноса. Американцы (Bak et al., 1987) сделали попытку объяснить природу фликкер-шума, как следствие явления самоорганизации динамической системы. Идея самоорганизации тесно связана с разбиением изначально простой многоэлементной динамической диссипативной структуры на фракталы. Подобные идеи развиты Г. Хакеном (1980) в синергетике, основным базисом которой является использование уравнения самоорганизации Фоккера-Планка, в котором принципиальным является наличие в системе и взаимодействие в ней двух процессов: дрейфа и диффузии (перколяции). В этом плане, очевидно, что процесс “плавления” внутреннего ядра не может быть единственной причиной проявления Землей фрактальных свойств и кластеризации. По всей видимости, ему “отводится роль” дрейфового механизма. Как мы отмечаем, фрактальные свойства присущи конвекции, и в этом случае, явление перколяции может состоять в изменении её режима от более устойчивого ламинарного, к менее устойчивому, - турбулентному. Заметим, что подобные переходы характеризуют самоорганизующиеся фрактальные структуры (Климонтович, 1996). С другой стороны, известно, что интенсивность фликкер-шума возрастает в структурах, обладающих фрактальными свойствами. По-видимому, именно этим объясняется наличие  $1/f$ -зависимости в инверсиях геомагнитного поля. Причина рассматриваемых явлений, скорее всего, лежит в самом характере эволюции Земли, как диссипативной структуры, проявляющей, при изменении ее термодинамических характеристик, фрактальные и скейлинговые свойства.

## VII. 2. О чем говорят параметры фигуры Земли $e = 1/298$ , $C/Ma^2 = 0.333$ ?

*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  $e = 1/298$ ,  $C/Ma^2 = 0.333$  ничего не говорит о реальном распределении плотности в Земле.

Джеффрис полагал Землю гидростатичной, однако при этом должно было выполняться правило:  $1/H \gg 1/e$  [ $H = (C - A)/C$ ], где  $C$  и  $A = B$  - полярный и экваториальные моменты инерции Земли,  $e = 5/4 \cdot w^2 a^3 / GM$  - сжатие Земли,  $w$  - скорость её вращения,  $a$  - экваториальный,  $c$  - полярный радиусы Земли, величина, обратная сжатию:  $1/e = a/(a - c)$ . Условие гидростатичности современной Земли, вращающейся с периодом  $T = 24$  часа, выполняется при:  $1/e = 232$ . Как известно, у Земли:  $1/H = 305.5$ ,  $1/e = 297.8$  и  $1/H - 1/e = 7.8$ , 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  $1/e = 232$ , причем отметим, что первым вычислил это ещё Ньютон. Для  $T = 22$  часа, Эвернден подсчитал:  $1/e = 200$ . 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  $1/e$ , 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 Эверндена. 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 Эверндена.* 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  $1/e = 232$ , в то время как она имеет  $1/e = 298$ . 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  $1/e = 232$ , или сжатие Земли всегда было  $1/e = 298$ ? Согласно нашей модели, Земля расширяется. Если бы она не вращалась, то  $e = 0$ , а  $1/e = \infty$ . Если бы Земля была гидростатичной, то, как мы отмечали,  $1/e_g = 232$ , а она имеет:  $e_g > e > 0$ . 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. 3-9), когда началось энергичное формирование мантии. Предположим, что к этому моменту Земля была ещё “жидкой”, а жесткая мантия стала наращиваться позже. Этот момент соответствует:  $1/e = 100$  (при  $T = 16$  ч.). На рисунке 7-5 прямая 1 показывает зависимость  $1/e(T)$  для реальной Земли  $1/e = 298$  при  $T = 24$  ч. Прямая 2 вычислена по формуле Лэмба ( $1/e \sim T$ ) для гидростатичной Земли (Эвернден, 1997). Разность величин  $1/e$  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:  $a_1 = a_0 (1 + e_1/3)$ , а

“жесткой,  $a_2 = a_0 (1 + e_2/3)$ . Введем параметр  $d = (a_1 - a_2)/(a_1 - a_0) = 1 - e_2/e_1$ . Он характеризует изменение формы Земли по мере увеличения её размера. Если в начале процесса наращивания мантии  $d = 0$ , что говорит о гидростатичности Земли, то в конце процесса, у современной Земли,  $d = 0.22$  (22 %). Для абсолютно твердой сферы:  $d = 1$ . 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  $e = 1/298$  показывает, что Земля расширялась в течение своей эволюции, проходя все значения  $1/e$ . Степень негидростатичности современной Земли достигла примерно 22 %. Вернемся к вопросу: почему Земля стремится к гидростатическому равновесию с фигурой, с обратным сжатием  $1/e = 298$ , а не 232, как этого следовало бы ожидать?

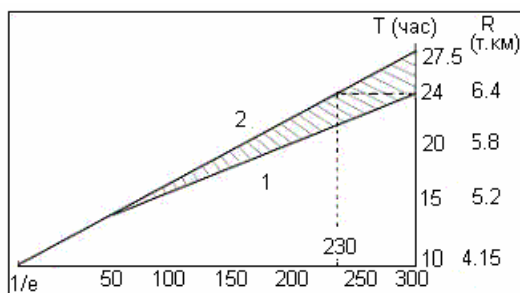


Рис. 7-5. Зависимость величины обратного сжатия  $1/e$  от длительности периода вращения Земли  $T$  для: 1 - реальной и 2 - гидростатичной Земли.

Отвечая на этот вопрос, обратимся к рис. 7-5, 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  $\omega$ , а  $dR/dt$ . В частности рис. 3.16 Главы III демонстрирует поразительную пространственную корреляцию акустических свойств внутреннего ядра и мантии, а так же высоты 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 меньше, чем внешние, именно это обстоятельство и объясняет, почему на Земле  $1/e = 298$ , а не 232.

### VII. 3. Расширяющаяся Земля и парадокс Мезервея.

Рассмотрим вопрос: имеются ли геологические данные, свидетельствующие в пользу расширения Земли? Будем пользоваться литературой, посвященной этому вопросу, не вдаваясь в обсуждение достоверности приводимых здесь геологических данных.

*Образование океанов.* Согласно нашей модели, основная масса океанов образовалась синхронно с кристаллизацией мантии, как сопутствующий процесс. Модель подтверждает рисунок 3-4 (глава III), согласно которому современные океаны возникли примерно 160 млн. лет назад. Возможна ли ситуация, чтобы океаны «перетекали» с места на место, как это следует из плитной тектоники? Для выяснения этого вопроса, обратимся к книге Е.М. Рудича (1984), где показано, что в течение последних 160 млн. лет объем Мирового океана значительно увеличился. Эти данные получены на основе анализа результатов

глубоководного бурения (более 500 скважин в течение 70 рейсов исследовательского судна «Гломар Челенджер») акватории Мирового океана, исследования разрезов, вскрытых океаническим бурением и оценки толщины океанических осадков.

В результате изучения акватории Мирового океана выяснилось, что имеются как общие черты для трех океанов (Тихого, Атлантического и Индийского), так и весьма существенные отличия Тихого океана от других. Расчеты, приведенные в книге Рудича, демонстрируют, что в течение «последних» 160 млн. лет объем впадины Мирового океана увеличился весьма значительно: по максимальной оценке на 580 млн. км<sup>3</sup>. (При глубине океана порядка 4 км, это составляет примерно 1/3 всей поверхности земного шара). Резкое увеличение впадины Мирового океана не сопровождалось сколько-нибудь существенным снижением его уровня. Рудич приходит к выводу, что увеличение впадины Мирового океана компенсировалось поступлением в гидросферу Земли воды из глубоких уровней планеты. Автор обращает внимание на то, что «... с позиций мобилистских концепций невозможно объяснить крупное приращение объема Мирового океана. Мобилистские гипотезы исключают возможность заметного изменения объема Мирового океана в течение последних 160 млн. лет» (Рудич, 1984, с. 232).

Рассмотрим, может ли найти объяснение этот факт с точки зрения модели горячей Земли. Обратим внимание на рис. 3-1 из которого следует, что, к примеру, 200 млн. лет тому назад объем океанов  $M_0$  составлял примерно 0.35 от объема современных океанов ( $M_0 = 0.35M$ , что подкрепляется данными Рудича), а земной радиус (по модели) составлял  $0.7R$  от современного радиуса Земли. Средняя глубина современных океанов  $h$ , которые занимают  $2/3$  (0.66) поверхности Земли  $S$ , равна  $4 \text{ км} = M/S = M/0.66R^2$  (опуская  $4\pi$ , которые потом сократятся). Массу современного океана можно выразить следующим образом:  $M = 0.66 hR^2$ , тогда масса палеоокеана (200 млн.лет)  $M_0 = 0.35 \cdot 0.66 hR^2$ . Радиус Земли 200 млн. лет тому назад  $R_0 = 0.7 R$ , а площадь  $S_0 = S \approx 0.5 R^2$ . Положим, что площадь материков остается без изменения в процессе эволюции Земли и она равна:  $S_{\text{мат}} = 1/3 R^2$ . Площадь поверхности океанов 200 млн. лет тому назад можно выразить:  $S_{\text{ок}} = 0.5 R^2 - 0.3 R^2 = 0.2 R^2$ . Тогда глубина древних океанов может быть оценена:  $h_0 = hM_0/0.2 R^2 = 0.35 \cdot 0.66 h/0.2 \approx h$ . Приведенная оценка показывает, что если считать, что уровень океана определяется его глубиной  $h$ , то, согласно нашей модели, уровень океана остается практически неизменным в ходе эволюции Земли, что и требовалось доказать.

Наша модель позволяет оценить величину  $h$  на начальном этапе эволюции Земли. Обратимся ещё раз к рис. 3-1, откуда следует, что 4 млрд. лет тому назад толщина мантии составляла всего 300 км, а радиус Земли, соответственно,  $0.6 R$ ,  $S_{\text{ок}} = 0.36 R^2 - 0.3R^2 = 0.06 R^2$ . Масса океана не превышала  $0.1 M$ ,  $h_0 = hM_0/0.06 R^2 = 1.6 h$  (6.5 км!). По-видимому, здесь такая оценка не совсем верна. Трудно представить, что мог образоваться такой глубокий океан, в то время как все материки были сушей. Поделим массу палеоокеана (4 млрд. лет) на всю поверхность Земли  $0.36 R^2$ , тогда  $h_0 = hM_0/0.36 R^2 = 0.28 h$ , или примерно 1 км. Таким образом, из модели горячей Земли следует, что большая часть материков находилась под водой, что соответствует геологическим данным.

*Глубоководные желоба.* Эти удивительные особенности строения океанического дна принято считать тем местом, где плита ныряет вглубь литосферы. Ранее предполагалось, что океанические осадки должны соскребаться в этом месте и заполнять желоба. Например, только в желобе Кермадек за последние 150 млн. лет должно было поглотиться 13 000 км литосферы (треть окружности Земли!). Можно себе представить, сколько здесь должно скопиться осадков. Как выяснилось, дно желобов, это обнаженные скальные породы без всяких осадков.

*Океан Япетус.* В тектонике плит принято считать, что примерно 600 млн. лет назад на Земле, на месте современной Северной Атлантики, возник океан шириной около 2-х тыс. км, названный Япетусом. Он отделял Северную Америку от Африки-Европы. Океан

сначала разрастался, а затем стал поглощаться в зоне субдукции. Это привело снова к сближению Африки и Европы с Северной Америкой. Несостоятельность этой гипотезы доказывает Кэри (1991). Он тщательно анализирует все геологические и палеомагнитные данные и приходит к выводу, что этого мифического океана никогда на Земле не было.

*Парадокс Мезервея.* Meservey (1969) показал, что только на расширяющейся Земле можно получить согласие между современной топологией материков и океанов, и палеомагнитными данными, такими как, дрейф магнитных полюсов и полосовые магнитные аномалии в океанах. “Соединение” материков в Гондвану, в которой Африка, Южная и Северная Америки, Австралия и Антарктида образуют единый праматерик, невозможно на земном шаре, имеющем радиус, равный современному.

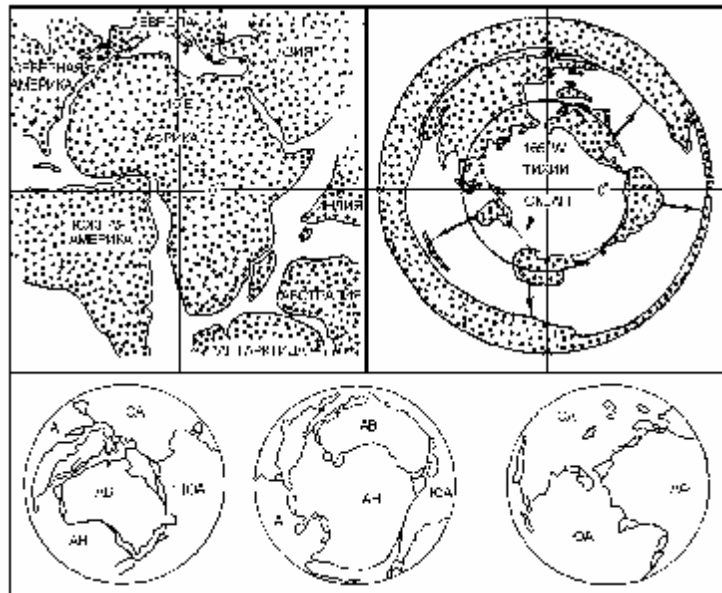


Рис. 7-6. Предполагаемое первоначальное расположение материков; экваториальная проекция периметра Тихого океана и направления дрейфа материков, необходимые для получения исходной картины (Meservey, 1969). Расположение материков на шаре с радиусом внешнего ядра.

Мезервей обратил внимание на то, что материки, расположенные по берегам Тихого океана, не могли 200 млн. лет тому назад находиться друг от друга на расстояниях, больших, чем в настоящее время (рис. 7-6). Для того чтобы образовать Гондвану (рис. 7-6-а), этим материкам пришлось бы двигаться вдоль по направлениям, показанным на рисунке 7-6-б, увеличив примерно вдвое площадь поверхности Тихого океана, что противоречит палеорекострукциям. Как показано многими авторами (Гораи, 1984; Кузнецов, 1990; Carey, 1976; Vogel, 1989), материки можно «уложить» один к другому практически без зазоров на шаре радиусом, точно равным радиусу внешнего ядра Земли (рис. 7-6-с). Для убедительного доказательства этого факта, доктор Фогель изготовил прозрачный глобус, внутри которого на шаре, эквивалентном шару внешнего ядра, располагались те же самые материки, что и на самом глобусе (Vogel, 1989). Глобус Фогеля демонстрирует, как изменялось положение материков, от начального, в момент образования Земли - до современного.

Парадокс Мезервея подтверждает нашу модель и оказывается непреодолимым препятствием для плитной тектоники. Геологические данные, имеющие отношение к геодинамике, в интерпретации противников плитной тектоники, скорее подтверждают нашу модель, чем ей противоречат. Наша модель с очевидностью решает проблему воды на Марсе и льда на Луне, привлекая к себе внимание научной общественности в

последнее время. Например, в декабре 1996 г. исследователи из НАСА сообщили, что ими получены свидетельства присутствия водяного льда в районе южного полюса Луны. Повторяем, что это остается неразрешимой загадкой для модели холодной Земли.

#### VII. 4. Парадокс в движении палеомагнитных полюсов.

*Данные.* Данные по местоположению виртуальных магнитных полюсов для различных материков и континентов, приводимые различными авторами для различных геологических эпох, довольно сильно различаются между собой. Различия настолько велики, что восстановление траекторий движения палеополюсов, а по ним - траекторий движения материков в геологическом прошлом, становится лишенным какого-либо смысла. Воспользуемся данными по дрейфу палеополюсов Северной и Южной Америки, Австралии и Африки за последние 240 млн. лет (Tarling, Abdeldayem, 1996). По-видимому, это наиболее достоверные данные. Наш выбор обосновывается тем, что профессор Д. Тарлинг является признанным специалистом по палеомагнетизму и автором известного учебника (Tarling, 1983).

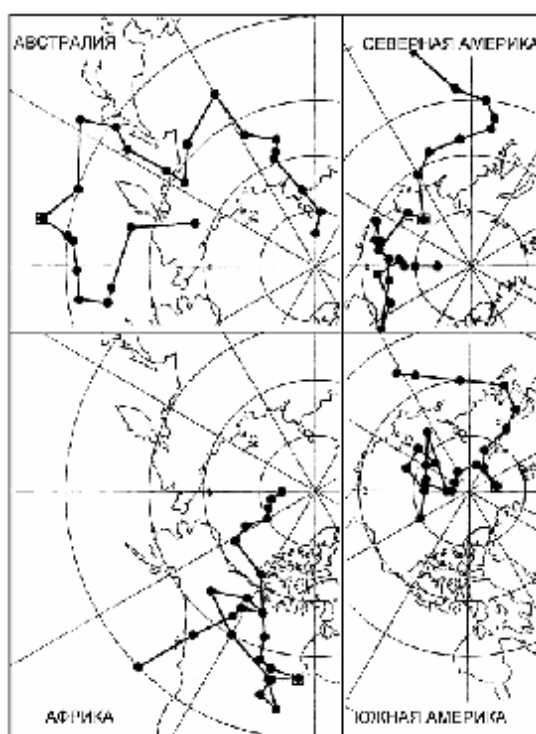


Рис. 7-7. Дрейф ВМП за (10 - 240) млн. лет определенных для Северной Америки, Африки, Австралии и Южной Америки. Прямоугольниками выделены “экскурсы-160” (Tarling, Abdeldayem; 1996).

На рис. 7-7 приведены траектории дрейфа палеомагнитных полюсов, определенных по данным, полученным с четырех континентов. Видно, что все зависимости обладают явным соответствием. Например, последние 60 млн. лет полюса дрейфовали по направлению к Северному полюсу практически вдоль меридианов. В более раннее время, характер движения полюсов был другим. Можно видеть, что здесь преобладающими направлениями дрейфа были долготные перемещения МП. На рис. 7-7 можно отметить одновременные (100, 200, 210 млн. лет назад) изменения характера дрейфа для всех четырех траекторий. Наиболее интересен резкий излом в точке, соответствующей 160 млн. лет тому назад. Это явление Тарлинг назвал “экскурсом - 160”, который характерен тем, что его “вектор” (см. рис. 7-7) обращен к тому континенту, где он фиксировался. В трех случаях из четырех (кроме Австралии) экскурс-160 имел направление в сторону

более высоких широт. Оценить по рисунку длительность «экскурса» не удалось, т.к. она примерно равна времени дискретизации (10 млн. лет).

Рассмотрим внимательнее направление дрейфа ВМП в течение последних 60 млн. лет, когда они дрейфовали в сторону более высоких широт и сравнительно немного отклонялись в долготном направлении. Наибольший интерес для нас представляют траектории дрейфа ВМП, определенные для Австралии и Южной Америки (рис. 7-8). В (Tarling, Abdeldayem, 1996) данные по дрейфу ВМП приводятся, начиная с 10 млн. лет назад. В принципе, мы можем продолжить эти траектории к современному моменту (0 млн. лет). Точка, в которой должны были бы наблюдаться ВМП, в настоящее время имеет координаты:  $86^{\circ}\text{N}$ ,  $185^{\circ}\text{E}$ . На этом же рисунке показано местоположение СМП-94 и видно направление его дрейфа. Продолжая траекторию дрейфа СМП, мы также «встретимся» с этой точкой. Возможно, это не случайное совпадение, и эта точка является магнитным полюсом современной эпохи.

Отметим, что направление дрейфа ВМП Южной Америки ориентировано в сторону «своего» материка (где производились наблюдения). Совсем не так ведет себя ВМП Австралии: он дрейфует, удаляясь от «своего» континента (см. рис. 7-8). Обе траектории дрейфа параллельны и скорости дрейфа этих материков примерно равны. Легко показать, что этот парадоксальный факт противоречит современным представлениям.

Для доказательства этого, на рисунке 7-9 изобразим окружность, - сечение Земли плоскостью, ориентированной вдоль  $120^{\circ}\text{E}$  -  $60^{\circ}\text{W}$  меридиана (см. рис. 7-8 и 7-10). Обозначим местоположение Южной Америки - точкой «А», Австралии - точкой «В», современное положение полюса (географического и магнитного) - точкой «N». Так как нам неизвестно местоположение точки, в которой производились измерения ВМП, отнесем ее к «центру» материков.

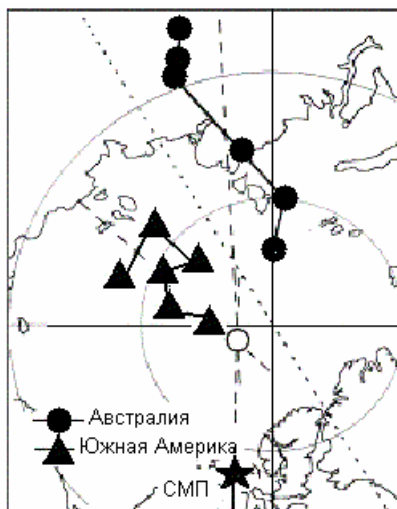


Рис. 7-8. Дрейф ВМП за последние 60 млн. лет. Звездочкой обозначено положение магнитного полюса 1994. Кружком обозначено положение ВМП при приведении траекторий дрейфа к современной эпохе.

Известно, что примерно 50 млн. лет тому назад Австралия отделилась от Антарктиды, 30 млн. лет тому назад она находилась примерно «на полпути» к современному положению (см. рис. 7-9). «Чуть позже» от Антарктиды отделилась Южная Америка. Оба материка дрейфовали на север (на нашей модели вверх рисунка). Австралия за 30 млн. лет продвинулась примерно на  $13^{\circ}$  (из точки В' в точку В), Южная Америка - примерно на  $7^{\circ}$  (из точки А' в точку А). Рисунок 7-8 показывает, что ВМП за это время переместился примерно на  $10^{\circ}$  [из точки N' в точку N]. Из рис. 7-9-а следует, что дрейф Австралии, по крайней мере, по направлению, «согласован» с перемещением магнитного полюса [перемещение материка из (·) В' → (·) В соответствует дрейфу МП из (·) N' → (·) N], в то время как движение Южной Америки находится в противоречии с ним [движение

материка из  $(\cdot)A' \rightarrow (\cdot)A \sim (\cdot)N' \leftarrow (\cdot)N$ ]. Углы  $OA'N_A$  и  $OAN'$ , а так же углы  $OB'N_B$  и  $OBN'$  должны быть равны, но при этом точки  $N_A$  и  $N_B$  не совпадают с  $(\cdot)N'$  (рис. 7-9-а). Полученный результат не находит объяснения с точки зрения тектоники плит, даже скорее, - ей противоречит.

*Модель.* Согласно модели “горячей” Земли, в процессе ее эволюции, радиус Земли возрастает, причем возрастание его происходит импульсно, а после каждого импульса расширения следует импульс сжатия. Таким образом, - эволюция “горячей” Земли происходит по “сценарию”, характерному для расширяющейся, пульсирующей Земли. За последние 50 млн. лет ее радиус увеличился примерно на 10 %. Надо сказать, что это весьма ориентировочная оценка. Дело в том, что теоретически оценить величину начального радиуса Земли, который заведомо был меньше современного, нет возможности. Модель “горячей” Земли представляется наиболее простой, изящной и самосогласованной в том случае, когда начальный радиус равен радиусу внешнего ядра. При этом оказывается, что Земля изначально была целиком покрыта материками, т.к. площадь поверхности материков точно равна площади поверхности внешнего ядра.

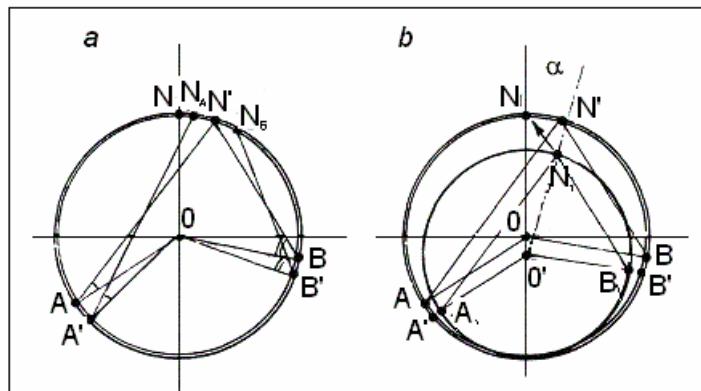


Рис. 7-9. Дрейф континентов и движение магнитных полюсов:

а - перемещение Южной Америки (А) и Австралии (В) и их совместного ВМП (N). (Точки: А, В и N - современное положение, точки: А', В' - 30 млн. лет назад).  $N_A$  и  $N_B$  - положения ВМП для точек А' и В'. ON - радиус Земли (const).

б - схема перемещения материков:  $A_1$ ,  $B_1$  и ВМП -  $N_1$ , расположенных на радиусе  $O_1N_1$  (меньшем чем ON). Угол  $\alpha$  показывает поворот оси вращения Земли относительно Гондваны.

Согласно общепринятой точке зрения, Гондвана (Южная Америка, Антарктида и Австралия) 50 млн. лет тому назад представляла собой единый материк. На рис. 7-9-а, она занимает нижнюю часть круга. В Гондване на Южную Америку “приходится” примерно  $65^\circ$  долготы, на Антарктиду  $45^\circ$  и  $30^\circ$  на Австралию, итого, -  $140^\circ$  (при современном радиусе Земли). В настоящее время, с учетом того, что Гондвана была разорвана, и ее материка разошлись, это составляет уже  $175^\circ$ . Очень грубая (качественная) оценка величины радиуса Земли 50 млн. лет назад дает:  $R_o \approx (145/175)R = 0.8 R$ . По нашей модели, более точное значение  $\approx 0.9 R$ . Оценим величину  $R_o$  30 млн. лет назад, несколько иным, но очень похожим способом. Современный угол АОВ (рис. 7-9) составляет  $140^\circ$ . Примем условие, согласно которому 30 млн. лет назад Южная Америка была соединена с Антарктидой ( $-7^\circ$ ). Австралия отстояла от нее примерно на  $15^\circ$  (см. рис. 7-9) или ( $-13^\circ$ ). Тогда величина угла  $A'OB' \approx 120^\circ$ . Как отмечалось, хорда длиной  $120^\circ$  на современном радиусе должна быть равна хорде в  $140^\circ$  на шаре радиусом  $R_o$ . Только в этом случае можно выполнить принятое нами ранее условие относительно того, что оба ВМП: Австралии и Южной Америки, «попадут» в одну точку ( $N_1$  на рис 7-9-б). Отсюда следует, что величина  $R_o \approx 120/140 = 0.85 R$ . Точка А' переходит в  $(\cdot)A_1$ , а  $(\cdot)B'$  переходит в  $(\cdot)B_1$ .



При этом мы выполняем очевидное условие:  $A'B' = A_1V_1$ . Кроме этого, треугольники  $AON$  и  $A_1O_1N_1$ , а так же  $BON$  и  $B_1O_1N_1$  должны быть, и действительно оказываются, - подобными. Задача решена. При этом оказывается, что положение Гондваны относительно оси вращения Земли меняется на угол  $\alpha$ . Мы рассмотрели один из самых простых вариантов, когда для обоих континентов МП находится в одной точке (N). Наша модель показывает, что нет проблем в решении других вариантов для случаев, когда МП не совпадают. Заметим, что идея оценки величины палеорадиуса Земли по палеомагнитным данным ранее неоднократно предлагалась и обсуждалась (Carey, 1976; Schmidt, Embleton, 1981; Scalera, 1990; Steiner, 1977; Van Hilten, 1963; Ward, 1963).

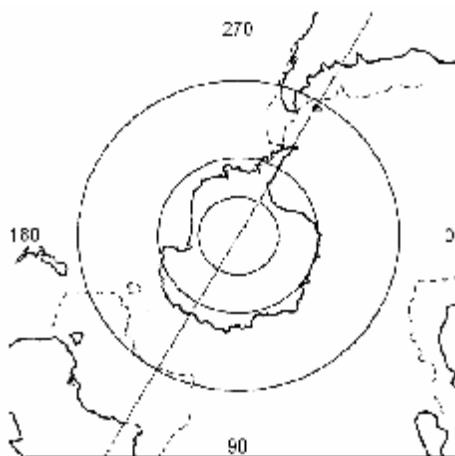


Рис. 7-10. Современное положение Австралии, Антарктиды, Южной Америки и Африки. Штриховой линией обозначено положение материков 30 млн. лет назад.

*Выводы.* Отмеченный нами факт дрейфа МП Австралии и Южной Америки в одном направлении и с одной и той же скоростью, не может найти объяснения с точки зрения современной тектоники плит, согласно которой полагается (и нигде не обосновывается), что радиус Земли не может изменяться, и он всегда был таким, как сейчас. По нашим (весьма приблизительным) оценкам, 30 млн. лет назад земной радиус составлял примерно 0.85 от современного. Это меньше, чем следует из модели (0.9). Ошибка вызвана, по-видимому, тем, что мы рассматривали только двумерную модель. Очевидно, что на таких простых моделях, даже если они несут в себе принципиально новый подход к решению проблемы восстановления положения материков в прошлом по палеомагнитным данным, полностью решить проблему, скорее всего, не удастся. Только трехмерная модель, поставленная на мощном компьютере, может продвинуть решение проблемы интерпретации дрейфа магнитных полюсов в настоящее время, в период инверсий и в геологическом прошлом.

Очевидным результатом расчетов с помощью такой программы могло бы быть получение уточненных сведений о величине земного радиуса в различное время эволюции Земли. Другим результатом работы такой программы, было бы выявление правдоподобных палеомагнитных данных. Последнее обстоятельство связано с тем, что (мы это отмечали) данные по положению ВМП у различных авторов очень сильно различаются. Имея в распоряжении такую программу, можно попытаться приблизиться и к самой главной цели - выяснению природы геомагнетизма.

Если мы правильно понимаем физику явлений, определяющих суть дрейфа МП на расширяющейся и пульсирующей Земле, то мы обязаны найти непротиворечивое объяснение явлению, названному нами "экскурс-160". Это явление, как видно из рис. 7-9, характерно для всех траекторий дрейфа МП. Как было показано выше, каждый вектор

“экскурса-160” направлен в сторону “своего” материка. Их величины по амплитуде примерно одинаковы. Какова причина этого удивительного явления? Для того чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к истории эволюции Земли.

Что произошло на Земле 160 млн. лет назад? Как следует из (Courtilot, Besse, 1987; Steiner, 1977) в этот период начался бурный рост океанов. Первым стал увеличиваться Тихий океан. Резко изменилась скорость дрейфа ТРВ, начался период мезозойских инверсий МПЗ. Этот период характерен тем, что именно от точки 160 млн. лет начинается отсчет начала регулярного спрединга.

Вполне естественно предположить, что 160 млн. лет назад на Земле произошло событие, связанное с началом её резкого расширения и возрастания объема и последующим его уменьшением - сжатием. Как можно видеть (см. рис. 7-11-б), при увеличении радиуса Земли, если растяжения и разрыва материка не происходит, то МП перемещается в сторону “своего” материка. Для того чтобы убедиться в этом, следует в точке В' изобразить угол  $OB'N'$ , равный углу  $OBN$  ( $O_1B_1N_1$ ). Положение точки  $N'$  покажет направление и величину сдвига МП в цикле расширения. Очевидно, что в цикле сжатия МП “вернется” к своему прежнему положению. Таким образом, следуя нашей модели, 160 млн. лет назад на Земле начался, по-видимому, один из самых значительных циклов “расширение-сжатие”, положивший начало ее интенсивному расширению. Именно в это время закончился Юрский суперхрон и наступил период мезозойских инверсий. По нашей модели – в это время произошла перестройка конвективной системы внешнего ядра, началось быстрое охлаждение вещества внутреннего ядра, процессы конденсации его вещества стали протекать более интенсивно, что привело к резкому росту мантии и, как следствие этого, расширению Земли и росту океанов.

#### VII. 5. 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 плитная тектоника не находит ответов. Рассмотрим, может ли ответить на них наша модель горячей Земли.

*Строение Земли.* В начале этой главы мы обсуждали конвекцию во внешнем ядре. Действительно, иначе как наличием периодической конвекции невозможно объяснить данные по *splitting*-функциям для внешнего ядра. Совсем другая картина при визуализации внутреннего строения с помощью этих функций, наблюдается для мантии и внутреннего ядра. Причем, что необходимо отметить, картина *splitting*-функций внутреннего ядра идентична аналогичным функциям, построенным для мантии (см. Главу III). Как мы отмечали в Главе III, картина, показывающая строение Земли становится ещё интереснее, если построить на ней распределение высот геоида (см. рис. 3.16–а, где показан “срез” по экватору: анизотропии внутреннего ядра, анизотропии сейсмических свойств мантии и высоты геоида, и рис. 3-16-б то же для “среза” по меридиану). Здесь, в качестве положительных отклонений от круга, приняты: понижение скоростей Р-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.

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° Е - 255° Е) и Атлантического (315° Е - 15° Е). Речь идет о двумерных картинках, регистрируемых в плоскости экватора и меридианов Земли. Именно в этих областях интенсивного фазового перехода происходит разуплотнение вещества внутреннего ядра и должно наблюдаться уменьшение плотности и скорости Р-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 (Глава III), 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 параграфе мы иллюстрируем их различия на примере анализа полосовых магнитных аномалий. Будем использовать карты осей палеомагнитных аномалий мирового океана (Карта .., 1981) и карту плитной тектоники района Тихого океана (Plate-tectonic map, 1985).

Беглый взгляд на характер раздвижения материков позволяет выявить две основные особенности этого процесса. Первая состоит в том, что по мере приближения из прошлого к настоящему, скорость увеличения площади поверхности океанического дна постоянно возрастает. Грубые оценки показывают, что разрастание океанического дна примерно пропорционально  $t^2$ , где  $t$  - время эволюции Земли. Вторая особенность заключается в заметном различии характера раздвижения, вернее, характера наращивания океанической коры. Легко выделяются два различающихся процесса (и, очевидно, механизма) образования океанической коры. К первому, наиболее широко обсуждаемому, отнесём, так называемый, “атлантический” тип. Суть его состоит в том, что после раскола древнего

материка, в зоне раскола стал действовать механизм спрединга в зоне срединно-океанического хребта, возникла астеносферная зона, с толщиной  $h$  убывающей с расстоянием от срединно-океанического хребта как:  $h \sim t^{1/2}$ . Нарастивание 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 7-11-а).

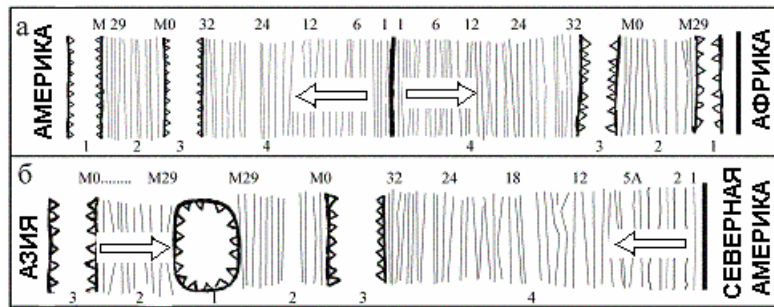


Рис. 7-11. Структура спрединга Атлантического (а) и Тихого океана (б) по данным о полосовых магнитных аномалиях, где выделяются зоны: 1 – юрского суперхрона; 2 – мезозойских аномалий; 3 – мелового суперхрона; 4 - «современных» аномалий. Стрелки показывают направление дрейфа.

Совсем иначе наращивалась океаническая кора в западной части Тихого океана. Здесь реализовывался т.н. “тихоокеанический” тип наращивания океанической коры. Его суть, в отличие от атлантического, заключается в том, что первоначально в океане наращивалась зона, соответствующая юрскому суперхрону. Вокруг неё расположена зона мезозойских инверсий, далее следует - она мелового суперхрона (в виде «полумесяца») и, наконец, зона инверсий “последних” 80 млн. лет (см. рис 7-11-б и 7-12). Рисунок 7-12 дает представление о возможном пути формирования дна Тихого океана. Исходная ситуация 7.12-1 (см. рис. 1-3) соответствует началу расширения Земли, росту мантии, разрастания океанов и образования юрской зоны “свободного поля” (ориентировочно 300 - 200 млн. лет тому назад).

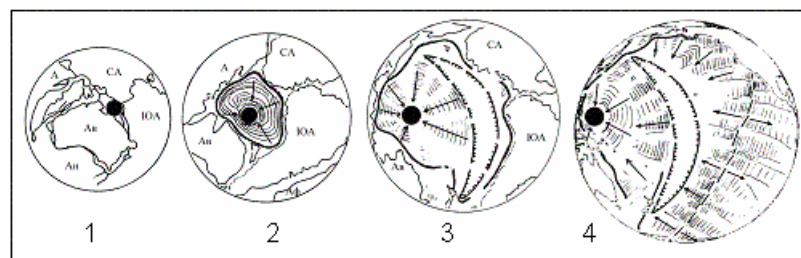


Рис. 7-12. Фазы спрединга Тихого океана: 1 – 200 млн. лет назад; 2 – 120; 3 – 80 млн. лет назад; 4 – настоящее время. Черный круг – юрский суперплюм, «полумесяц» – меловой суперплюм; жирная линия – желоба; стрелками показано направление спрединга.

Второй этап (рис. 7-12-2) эволюции связан с мезозойскими инверсиями (160 - 110 млн. лет). Третий (рис. 7-12-3) - с возникновением мелового суперплюма-суперхрона (110 - 80 млн. лет) и, наконец, последний рисунок (рис. 7-14-4) показывает современную ситуацию. Складывается впечатление, что спрединг в восточной части Тихого океана, на начальном

этапе (рис. 7-12-1) 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. Срединг 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:  $h(\text{км}) \approx 10 t^{1/2}$  (млн. лет). Сравним эту зависимость, с полученной нами ранее (в Главе III) 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 лишней 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.

*Данные.* В последние годы, в область космической геодезии, в дополнение к системам лазерной локации спутников (LAGEOS) и дальнотазовой радиоинтерферометрии (РСДБ), пришла спутниковая навигационная система GPS (Global Positioning System). Полученные с её помощью результаты по высокоточному определению орбит спутников, относительных координат наземных пунктов и величин деформаций земной поверхности, позволили значительно продвинуться в части понимания геодинамической обстановки на Земле. Эта система показала, что тектонические модели, в ряде случаев, не соответствуют реально действующим современным деформациям земной коры. Главным образом, это границы плит и зоны т.н. субдукции. Северо-запад Тихого океана является одним из наиболее хорошо изученных районов и, несомненно, районом, наиболее характерным для зоны субдукции. Рассмотрим комплекс явлений составляющих субдукцию на примере этого региона.

*Высота геоида.* В правом нижнем углу на карте северо-западной части Тихого океана (см. рис. 7-13) находится область ( $180^\circ; 0^\circ$ ), характеризующая 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 ( $90^\circ$  E-меридиан), после чего уровень геоида вновь повышается до Гринвича и затем понижается до  $90^\circ$  W-меридиана. Таким образом, высота геоида, если рассматривать её вдоль экватора, имеет два максимума и два минимума, отстоящих друг от друга почти строго на  $90^\circ$  (см. рис. 3-16).

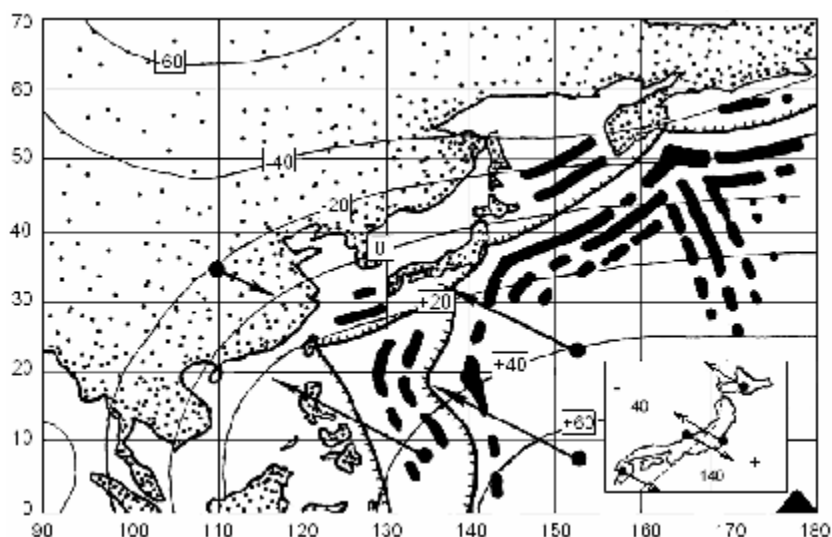


Рис. 7-13. Карта высот геоида (цифры в квадратах - метры), гравитационных аномалий (черные полосы), направлений (стрелки) и величин дрейфа (длина стрелок) материков и плит (Lewis, Smith, 1998; Маслов, 1988; Kato, et al. 1998). Черный треугольник внизу справа показывает положение точки с максимальным значением высоты геоида. В правом нижнем углу рисунка (вставка) показаны направления скоростей дрейфа литосферы, измеренные в Японии с помощью GPS-системы (Imakire, 2000). Штриховая линия, это линия геодинамического равновесия (аттрактор). При достижении равновесия встречные скорости дрейфа равны нулю.

*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. 7-13).

На вставке, в правом нижнем углу рисунка 7-13, - приведены данные по направлениям перемещений литосферы, измеренным с помощью GPS-системы в Японии (Imakire, 2000). Рисунок 7-13 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 7-13. 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  $R$  ( $R \gg H$ ), поверхностное натяжение жидкости  $a$ , капиллярная постоянная  $a = (2a/gr)^{1/2}$ ,  $g$  - сила тяжести,  $r$  - плотность жидкости. Объем капли  $2/3\pi H^3$ , объем растекшийся на дне стакана жидкости без учета краевых эффектов пленки жидкости на стенке стакана  $\pi R^2 d$ . Краевой угол, образуемый смачивающей жидкостью со стенкой стакана, обозначим  $Q$ , 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  $\Delta p$ :

$$\Delta p = a(1/X_1 + 1/X_2).$$

При условии, что поверхность жидкости плоская, иначе:  $X_1 = X_2 = \infty$ ,  $\Delta p = 0$ .

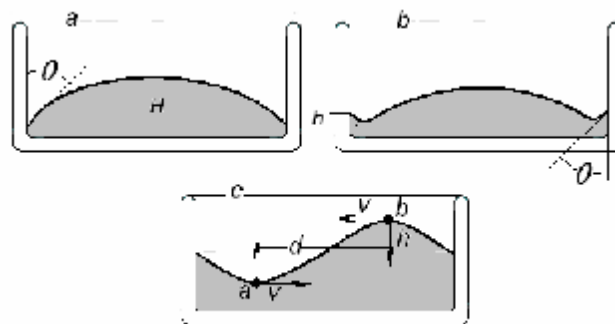


Рис. 7-14. Модель растекающейся капли.

Очевидно, что скорость растекания вещества капли, т.е. скорость перемещения фронта жидкости вдоль поверхности дна стакана  $v_R = dR/dt$  намного больше скорости уменьшения высоты капли  $v_H = dH/dt$ : т.е.  $dR/dH \sim H/R$ . При растекании капли на границе жидкости с поверхностью дна и окружающем воздухом возникают три силы: сила растекания, сила трения и сила поверхностного натяжения. Эти силы не уравновешены и для их равновесия возникает сила направленная вертикально вверх. Эта сила заставляет тонкую пленку, на которой находится растекающаяся капля, загибаться вверх, как бы обворачивая каплю. Именно эта сила заставляет жидкость подниматься вверх на высоту  $h$  около стенки сосуда:

$$h = a(1 - \sin q)^{1/2}. \tag{7.12}$$

Растекание капли вызывает появление капиллярных волн при условии:  $k \lesssim 1/a$ , где  $k$  - волновое число. Частота капиллярных волн  $\omega^2 = (a/r) k^3$  (Ландау, Лифшиц, 1986).

*Гравитационные аномалии.* Обратимся к геодинамической карте американской организации Energy and Mineral Resources (Plate-tectonic map, 1985). На ней, в районах Курильского и Алеутского желобов изображены протяженные аномалии силы тяжести, представляющие собой периодические структуры, с характерным поперечным размером («длиной волны») порядка 200 - 400 км. Амплитуда этих аномалий «затухает» на расстоянии порядка 1000 км от желобов (см. рис. 7-13). Картина гравитационных аномалий, как отмечал Маслов (1988), напоминает эффект интерференции волн, «набегающих» и отраженных от желобов. Он же обратил внимание на то, что аналогичная волновая картина наблюдается и на восточной границе плиты Наска, т.е. в прямо противоположном направлении от Курильской дуги.

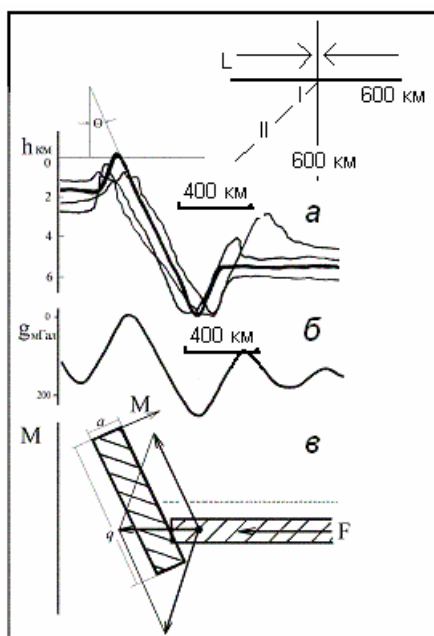


Рис. 7-15. Субдукция: *a* – рельеф (Harabaglia, Doglioni, 1998); *б* - гравитационные аномалии (Маслов, 1988); *в* – механическая модель. Вверху справа схема субдукции и три области сейсмичности и вулканизма.

*Структура зон субдукции.* Интересные результаты по структуре зон субдукции, в частности, по их топографии и гравиметрическим профилям поперек зон, а также по классификации зон субдукции, представлены в работе (Harabaglia, Doglioni, 1998). Зоны субдукции разбиты авторами на два класса, в зависимости от направления дрейфа погружающейся плиты: западный (W-class) и восточный (E-class). Средняя длина изучаемого профиля составляет 1250 км, гравитационные аномалии редуцированы по Фаю, максимальная величина аномалий не превышает 200 мГал. На рис. 7-16-а жирной линией изображен типичный усредненный топографический профиль зоны субдукции, тонкими линиями - различные варианты профилей зон, не имеющие принципиального различия со средним. Ниже, на рис. 7-15-б представлено изменение силы тяжести вдоль профиля зоны. Отметим, что во всех 20-ти зонах субдукции, о которых идет речь, их параметры практически идентичны и отличаются друг от друга в весьма незначительных (на наш взгляд) деталях.

*Модель субдукции.* Согласно действию принципа минимизации гравитационного потенциала, Земля в течение своей эволюции стремилась минимизировать площадь своей поверхности. Это, в конкретном случае, может означать, что на поверхности Земли всегда



есть сила, которая стремится привести её в состояние гидростатического равновесия, а форму Земли, - к равновесной форме сфероида. Иначе, эта сила стремится минимизировать высоту геоида. По-видимому, такую силу можно формально уподобить силе поверхностного натяжения жидкости и при определении параметров литосферы в зонах субдукции, воспользоваться формулами, выведенными для оценок капиллярных эффектов.

По данным, приведенными на рис. 7-15-а, оценим высоту  $h$  и величину краевого угла  $Q$ . Высота  $h$  составляет 6 - 8 км, а угол  $Q$  порядка 85 - 87°. Используя формулу 7.12, оценим величину  $a$ :  $a \approx 500 - 1000$  км, и воспользовавшись формулой:

$$a = (2a/gr)^{1/2}, \quad (7.13)$$

оценим величину “поверхностного натяжения”  $a$ :  $a \approx 10^{19}$  дин/см. (Для сравнения,  $a$  воды 70 дин/см).

Для Тихого океана  $R \approx 5$  тыс. км, высота “капли”  $H$  равна примерно 50 м (высота геоида), поэтому отношение  $H/R \approx 10^{-5}$ . Скорости “растекания” поверхности Тихоокеанической плиты ( $v \approx 10$  см/год) соответствует скорость убывания высоты геоида  $dH/dt \approx 10^{-3}$  мм/год. Это означает, что собственно “течет” только самый верхний и сравнительно тонкий слой литосферы. Оценим его толщину, для чего воспользуемся формулой (Ландау, Лифшиц, 1986):

$$hv \sim -z(da/dx), \quad (7.14)$$

где  $h$  вязкость вещества слоя литосферы ( $h \approx 10^{24}$  Пз),  $v = 10^{-7}$  см/с,  $z$  - толщина слоя,  $da/dx$  - изменение поверхностного натяжения вдоль слоя. Напомним, что величина  $a = 10^{19}$  дин/см, разумно предположить, что она может изменяться на 1 % на длине порядка 100 км, т.е.  $da/dx \approx 10^{10} - 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>. Отсюда следует ориентировочная оценка  $z \approx 10 - 100$  км.

Толщину слоя  $f$ , возмущающего величину  $g$ , оценим по известной формуле:

$$\Delta g = 2\pi Gf\Delta\rho. \quad (7.15)$$

Возмущение силы тяжести в зоне субдукции порядка 100 мГал (см. рис. 7-15-б), изменение плотности принято считать в таких оценках, порядка 0.2 г/см<sup>3</sup>, толщина возмущающего слоя оказывается:  $f \approx 40$  км. Эта оценка показывает, что гравитационные аномалии зон субдукции определяются поверхностной, коровой неоднородностью, а совсем не глубинной, мантийной, как должно бы следовать из плитной тектоники. Из наших оценок получается, что толщина слоя растекания одного порядка с толщиной слоя, возмущающего силу тяжести. (Очевидно, что к подобным оценкам надо относиться как к ориентировочным, тем не менее, они показывают соотношение эффектов, которые определяют физику явлений).

Использование капиллярной аналогии позволяет оценить порядок лапласовых, поверхностных сил, приводящих к растеканию литосферы. Величина  $\Delta p = 2a/X$ . Для того чтобы величина этого давления была порядка текучести литосферы ( $\approx 1$  кбар), при величине  $a$ , полученной нами выше, кривизна растекающейся литосферы должна быть:  $X \approx 10^{10}$  см, что в 20 раз больше земного радиуса и, по-видимому, вполне реализуемо на практике. Таким образом, наши оценки показывают, что зона субдукции, с точки зрения модели растекания, представляет собой область краевых эффектов, возникающих за счет проявления капиллярных сил.

С этих позиций рассмотрим и картину взаимодействия «волн», приводящих к их интерференции при отражении от преграды в виде желоба. Как мы отмечали, длина «волны» порядка 200 - 400 км, следовательно, величина  $k = (0.2 - 0.5) 10^{-7}$  см<sup>-1</sup> соизмерима с  $1/a = (1 - 2) 10^{-8}$  см<sup>-1</sup>, что говорит о необходимости учета капиллярных явлений. Частота капиллярных волн:  $w^2 = (a/r) k^3$ :  $w \approx 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>, или, если учесть, что длина волны  $\approx 400$  км, а скорость сейсмических волн  $v_p \approx 4$  км/с, то величина  $w$  оказывается того же порядка. При всей внешней “похожести” картины гравитационных аномалий в зонах субдукции,

интерференции капиллярных волн, эта модель абсолютно нереальна, т.к. нет никаких оснований, считать, что, хоть и капиллярные, но всё равно акустические волны, способны создать вариации плотности в литосфере, соответствующие  $\Delta g = 100$  мГал.

Более реалистичная оценка эффекта может получиться, если в модели иметь ввиду гидродинамические волны, возникающие в растекающейся литосфере. Причиной возникновения таких волн (автоволн) в медленном ламинарном потоке могут быть эффекты, связанные с неравномерным распределением скорости течения вдоль по плите, которые могут сказаться при взаимодействии потока со «стенкой». По мере приближения к ней, скорость потока уменьшается, и поток как бы разворачивается таким образом, чтобы «встретить» стенку своим фронтом. Именно в этом случае могут возникать отраженные волны и интерференционные эффекты, о которых писал Маслов, и которые «зафиксированы» в виде гряд гравитационных аномалий, параллельных желобам (см. рис.7-13).

Скорость горизонтального течения литосферы (Маслов, 1988)  $v_x$ :

$$v_x = rg^2 / (8\pi m G D r T) \int_A^B N(x) dx,$$

где  $r$  - плотность слоя,  $Dr$  - разность между плотностью вещества слоя и плотностью земной коры,  $g$  - сила тяжести,  $m$  - вязкость вещества слоя,  $G$  - гравитационная постоянная,  $T$  - толщина слоя,  $N(x)$  - высота геоида на расстоянии  $x$  между точками А и В. Упрощая и подставляя привычные значения величин, получаем для  $v_x$ :  $v_x \approx 0.1 N$  см/год (где  $N$  в метрах). Эта оценка дает верный результат для скоростей течения литосферы. Отношение скорости вертикального перемещения  $v_z$  к  $v_x \approx 10^{-5}$ .

Можно ли найти другую причину, объясняющую характер гравитационных аномалий в зонах субдукции? Для того чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим явления, происходящие в этих зонах, с другой позиции, не в рамках гидродинамики, как раньше, а с позиции прочности, упругости и изгибных моментов. «Растекающуюся» литосферу будем теперь отождествлять с нагруженной балкой, левый конец которой был приподнят внешними силами на высоту  $h$  (см. рис 7-15-в). К торцу «балки» приложена внешняя сила, которая, собственно, и вызывает её поднятие. В жесткой «балке» в этих условиях возникает изгибный момент  $M$  (направленный по часовой стрелке), который будет стремиться опустить правый конец «балки» ниже уровня её равновесия. Обозначим длину «рычага»  $q$ , а поперечный размер балки -  $a$ . Тогда величина изгибного момента:

$$M = 1/2 g q^2 h a r. \quad (7.16)$$

Напряжение, вызываемое наклоном «балки» в области её правого конца, можно оценить по формуле Навье:  $S = M/W$ , где  $W$  - момент сопротивления (примерно равен объему освобожденному «балкой»),  $W = 1/2 q h a$ . Величина  $S \gg q g r$ . Если принять длину «рычага» равной примерно 200 - 400 км, то напряжение  $S$  оказывается весьма большим (до 100 кбар). Оно значительно превышает величину литостатического давления и прочности горных пород, что, по-видимому, можно расценить как подтверждение правомерности нашего подхода.

Форма балки может быть описана уравнением:  $w(x) = h \cos(\pi x/l)$ , тогда на изгиб балки влияют изгибающий момент  $M$  и изгибающий момент от действия осевой нагрузки  $S$ , дифференциальное уравнение изогнутой оси балки (упругой линии) при изгибе балки описывается уравнением:

$$d^2 w(x)/dx^2 = M(x)/EJ - S w(x)/EJ, \quad (7.17)$$

где  $E$  - модуль Юнга,  $J$  - момент инерции балки. Решение этого уравнения имеет синусоидальный, волновой характер, который, возможно даже в большей степени, чем интерференция акустических, капиллярных или гидродинамических волн, соответствует наблюдаемой картине гравитационных аномалий зон субдукции.

*Обсуждение.* Основным выводом, следующий из нашей модели субдукции, состоит в том, что движение материков и плит в этой области обязано «растеканию» литосферы. Крутопадающая в сторону материка область желоба, характеризуемая как астеносферная область пониженных сейсмических скоростей и как сосредоточение глубинных землетрясений и «корней» вулканов, представляет собой давно прекративший существование, «потухший» тихоокеанический спрединг. Напряжения, обязанные растеканию литосферы и влиянию изгибающего момента сил, связанного с образованием в зоне желоба наклоненной «балки», приводят к активизации сейсмичности и вулканизма. В этой области астеносферы, во всех зонах субдукции, фиксируется понижение величины силы тяжести. Наша модель, в принципе, находит объяснение многим особенностям, фиксируемым в зонах субдукции, без привлечения глобальной конвекции.

Второй, не менее важный вывод, следующий из нашей модели, заключается в том, что постулируемой в плитной тектонике глобальной конвекции в мантии, нет, и не может быть на Земле. Это совсем не означает, что конвекции нет, и не может быть вовсе. Конвекция в мантии существует, но это турбулентная, мелкомасштабная конвекция, которая не может служить двигателем материков и плит. Основанием для такого заключения служат несколько соображений. Например, одно из них состоит в том, что Земля негидростатична, так как иначе, Земля имела бы сжатие, равное  $1/232$ , а не  $1/298$ , как есть на самом деле. Последняя цифра говорит о том, что интегральная жесткость мантии, близкая к жесткости стали, не разрешает существование на Земле глобальной конвекции. В пользу этого вывода говорят ещё ряд фактов, таких как: отсутствие непрерывного слоя астеносферы, слишком малая величина гравитационных аномалий, особенности характера изменения скорости сейсмических волн в мантии и т.п.

Третий вывод, следующий из нашей модели очевиден: Если спрединг на Земле существует, а глобальной конвекции и субдукции нет, то Земля обязана расширяться. То, что сегодня расширение Земли инструментально не фиксируется, вовсе не говорит о его принципиальной невозможности в процессе эволюции Земли. Как мы отмечали, в настоящее время спрединга нет, нет расширения, наоборот, - инструментально фиксируется скорее сжатие Земли. Она стремится занять форму сфероида, что и является причиной «растекания» литосферы.

Модель субдукции базируется на принципе минимизации гравитационной энергии и его физическом воплощении - минимизации высоты геоида. Действительно, если сравнить высоту гор Земли с её радиусом  $H/R$ , то окажется, что эта величина порядка  $10^{-3}$ . Сравнивая величины гравитационных аномалий с силой тяжести  $\Delta g/g$ , убеждаемся, что эта величина на порядок меньше ( $10^{-4}$ ), в то время как отношение высоты геоида к радиусу Земли  $x/R \approx 10^{-5}$ . Следовательно, Земля, эволюционируя, стремится минимизировать не высоту рельефа, не величину гравитационных аномалий, а высоту геоида.

Таким образом, Земля стремится принять форму сфероида, а если не учитывать эффектов вращения, то шара. К аналогичной цели «стремится» капля жидкости вне сил гравитации. Эта аналогия позволила нам ввести новое понятие в физике Земли – поверхностное натяжение литосферы и оценить его величину. Какова физика этого явления? Очевидно, что здесь уже нельзя использовать аналогию с молекулярными силами, действующими в жидкой капле. В нашем случае должны быть силы, обеспечивающие “дальний порядок” этому явлению, только в этом случае в литосфере Земли могут проявляться эффекты, подобные поверхностному натяжению. В качестве таких сил могут быть силы гравитации и вращения. Именно они действуют на все компоненты литосферы, заставляя её проявлять коллективные свойства, подобные молекулярным.

Предлагая модель субдукции, мы, естественно, рассмотрели и спрединг, причем при анализе этого, казалось бы, хорошо известного явления, выяснилась интересная деталь, касающаяся эволюции Тихого океана. В отличие от линейного и симметричного атлантического спрединга, в Тихом океане спрединг представлял собой по началу

расширяющуюся со временем “трубу”, по стенкам которой происходил подъем вещества в течение юрского и мезозойского периодов. Эта “труба” была впоследствии разорвана и развернута в структуру, напоминающую спираль Архимеда (рис.7-12). Примерно 60-80 млн. лет назад этот “цилиндрический” спрединг в Тихом океане прекратился и начался линейный и симметричный, аналогичный - атлантическому. При развертывании “цилиндрического” спрединга, как результат расширения океанического дна, образовались т.н. окраинные дуги и желоба. Эти остатки, следы древнего спрединга, и называются зонами субдукции.

Как отмечалось, формирование Тихого океана начиналось с растяжения коры и мантии и образования разломов-рифтов, одним из которых был и Байкальский рифт. Эти события происходили, по-видимому, раньше, чем 200 млн. лет назад, когда начиналось формирование современных океанов. Толщина мантии (согласно нашей модели горячей Земли) в тот период была значительно меньше современной. Растяжение литосферы сопровождалось не только образованием Байкальского рифта но, возможно, и некоторым “течением” - перемещением его восточной части относительно западной. Такое течение должно было быть связано с нагревом определенной области мантии и возникновением астеносферы. Вполне возможно, что астеносферная зона, обнаруженная группой С.В. Крылова под Байкалом, это последствие явлений растяжения литосферы в верхней мантии, и её “отображение” в нижней. Надо заметить, что результат, полученный группой С.В. Крылова уникален. Насколько мне известно, таких подробных исследований рифтовых зон никто никогда не проводил. Полученный результат ещё раз убеждает в справедливости нашей модели геодинамических процессов на Земле.

Надо заметить, что значительно раньше Чудинов (1981), отрицая идею субдукции, как затягивание плиты в мантию, предложил в качестве альтернативы эдукцию, как механизм выноса материала на поверхность Земли (спрединг?) из мантии. Его идея согласуется с нашим выводом: Зоны субдукции, - это “следы” угасшего спрединга. Глубоководные желоба, - это наиболее глубокие “шрамы” на поверхности Земли. В настоящее время Земля “залечивает” эти “шрамы”. Современная геодинамика, сейсмичность и вулканизм, это средства процесса такого “залечивания”.

## VII. 6. 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. 7-16-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  $42^\circ \text{N}$  высота геоида начинает немного возрастать и затем понижается до нулевой отметки, которая приходится на северную границу Азиатской плиты (рис. 7-16-б). Рис. 7-16-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  $q$  так же выше и, более того, различны для различных горных районов.

Воспользовавшись формулой (7.13) можно оценить величину капиллярной постоянной  $a$  и, вслед за этим, величину «поверхностного натяжения»  $a$  (по формуле:  $a = (2a/gr)^{1/2}$ ). Рисунок 7-16-с показывает, что и величина  $a$ , 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. 7-16-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.

7-16-а и 7-16-d, ниже, т.к. она определяется соотношением между силой тяжести и прочностью литосферы.

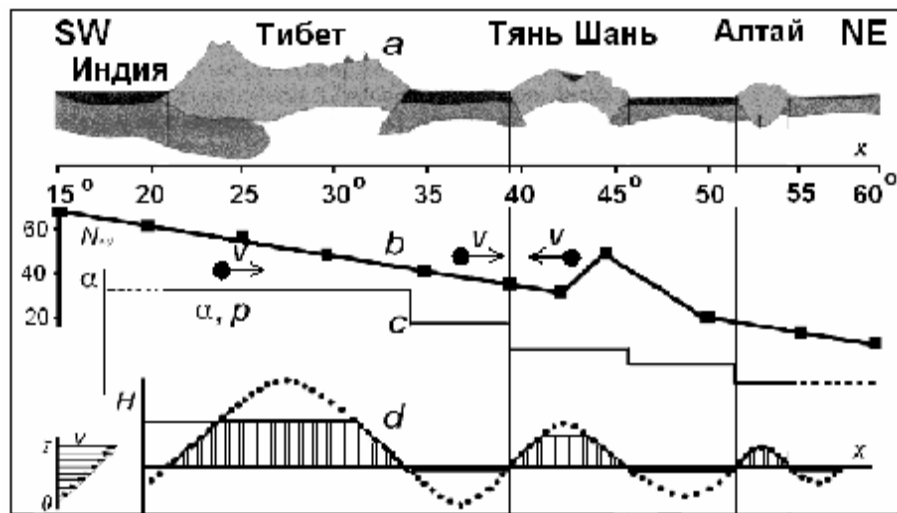


Рис. 7-16. Схема горных районов центральной Азии (рис. а) пересекаемых широтным профилем SW – NE (широта N – в градусах). Высоты геоида (в метрах) вдоль этого профиля (b) и направления скоростей дрейфа. Изменение (в отн. ед.) величины «поверхностного натяжения» литосферы  $\alpha$  и величины сдвигового (лаплассового) давления  $\rho$  вдоль профиля (c). Модельные представления (d).

Предположим, что кривая, отображенная на рис. 7-16-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,двигающемся с постоянной скоростью  $v_0$ . Ползун прикреплен к неподвижной точке при помощи упругой пружины, создающей упругую силу, изменяющуюся по линейному закону. Если скорость  $v_0$  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:

$$ds/dt = dp/dt - v_0. \quad (7.18)$$

Здесь  $p$  – амплитуда прерывистого движения ползуна. Уравнение движения ползуна будет иметь вид:

$$m(\ddot{p}/t^2) + j(dp/dt - v_0) + kp = 0. \quad (7.19)$$

Следуя книге Дж. Стокера (Стокер, 1952), введем новую переменную  $x$ , заменив  $p$  при помощи соотношения:

$$x = p + 1/k(-v_0). \quad (7.20)$$

Это соотношение означает, что положение ползуна отсчитывается от точки, в которой он находится в равновесии при одновременном действии упругой силы и силы трения. В нашем случае, положение точки равновесия определяет максимум функции, изображенной на рис. 7-16-d, и означает, что в первой (по оси  $x$ ) точке равновесия будет возникать упругая сила, приводящая не к горизонтальному смещению слоя, а к его вертикальному перемещению, т.е. образованию гор.

Уравнение, типа уравнения Ван дер Поля (Стокер, 1952), которое может подойти для описания нашего случая, и соответствовать решению 7-17-d, можно записать в виде:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + F(dx/dt) + kx = 0, \quad (7.21)$$

где

$$F(dx/dt) = j ( dx/dt - v_0 ) - j (- v_0) \quad (7.22)$$

отрицательна при  $dx/dt = 0$ . Это требование будет выполняться, если скорость  $v_0$  такова, что величина трения (вязкости) будет уменьшаться при возрастании  $v_0$ . При этом возникают вертикальные автоколебания сплошной среды, которые могут быть причиной образования гор и впадин

## VII. 7. Высота гор.

Наличие гор на Земле, казалось бы, должно находиться в противоречии с Принципом минимизации гравитационной энергии. Выше мы отмечали, что отношение максимальной высоты гор к радиусу Земли  $H/R$  существенно больше, чем отношение высоты геоида к радиусу. Следовательно, на Земле происходит минимизация высоты геоида, а не высоты гор. Таким образом, для гор Принцип «открывает возможность» увеличивать свою высоту. Более того, как следует из наших обсуждений, действие Принципа приводит к их возникновению и росту.

Надо сказать, что высота горы – величина не случайная, она может быть оценена из соотношения:  $rgH = s$ , где  $s$  – предел текучести материала литосферы (в терминах самоорганизации – перколяционный порог). Примем эту величину равной примерно 3 кбар, тогда максимальная высота гор  $H \approx 10$  км, что чуть больше, чем высота самых высоких гор на Земле ( $> 8$  км). Как известно, на Марсе высота гор выше:  $H \approx 25$  км, т.е. примерно в 3 раза больше чем на Земле, но ведь и сила тяжести на Марсе  $g = 360 \text{ см/с}^2$  – примерно в три раза ниже земной. Более того, принято считать, что на Земле раньше высоких гор не было. Если принять, что в течение эволюции масса Земли не меняется, а радиус растет, то и сила тяжести – падает. Так что здесь противоречий нет.

Принято считать, что горы образуются в результате натекания поверхностного слоя литосферы на преграду (в плитной тектонике – из-за столкновения плит). Наиболее распространенный пример, это «течение» к северу Индостана и столкновение этого потока с Азиатским материком в районе Гималаев. Надо сказать, что образование горы идет не только вверх, но и вниз, что связано с известным явлением изостазии, которое приводит, в конечном счете, к образованию «корней» гор. Существование явления изостазии лишней раз указывает на то, что, рассматривая образование гор, можно пользоваться гидродинамической моделью.

Возможно, современная геодинамика в значительной мере определяется действием на земной поверхности Принципа минимизации гравитационного потенциала, который приводит к минимизации высоты геоида, не обращая при этом, «внимания» на высоту гор. Возможно так же, что течение литосферы, и связанные с этим явления вулканизм, землетрясения и образование гор, составляют сумму процессов, обязанных протеканию процессов самоорганизации. Возможно, по сути, что это одни и те же процессы, цель которых привести такую «систему» как Земля в состояние с меньшей энтропией. В случае самоорганизации, высота гор, так же как энергия землетрясения или мощность вулканического извержения – фракталы. Фрактальные среды проявляют свои свойства, выражающиеся в том, что сильных событий бывает мало, более слабых, – больше, ещё более слабых, – ещё больше, и т.д. Степень фрактальности процесса или явления оценивается по величине Хаусдорфовой размерности  $D_H$ . Однако прежде чем оценивать  $D_H$  следует убедиться в том, что в логарифмическом масштабе наблюдается линейная зависимость между количеством событий  $N(r)$  и амплитудой события  $r$ .

Интересно выяснить, является ли высота гор фракталом. Для анализа был выбран горный район, включающий Гималаи, ограниченный: по широте:  $40^\circ - 25^\circ\text{N}$ , и по долготе:

60° – 100°E (см. рис. 7-18). Использовалась глобальная цифровая база данных о топографии GTOPO30 геологической службы США (<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30>) с пространственным разрешением 30 угловых секунд (около 1 км). Общее количество точек 8841600, максимальное значение высоты гор 8752 м. Ширина классового интервала по высоте при вычислении распределения 250 м. (рис. 7-17 внизу слева). На рис. 7-17 внизу справа приведено распределение средних значений высот в ячейках 1×1 км. Можно выделить две наклонных прямых, одна из них характерна для невысоких гор, другая – для более высоких гор. Очевидно, что в исследуемый регион либо «попали» два различных горных района, либо это один район, но он «пережил» два различных этапа горообразования. Величина Хаусдорфовой размерности для исследуемого горного региона равна: для невысоких гор (пологая часть графика)  $D_H \approx - 0.27$ , для высоких гор (крутая часть графика)  $D_H \approx - 0.9$ .

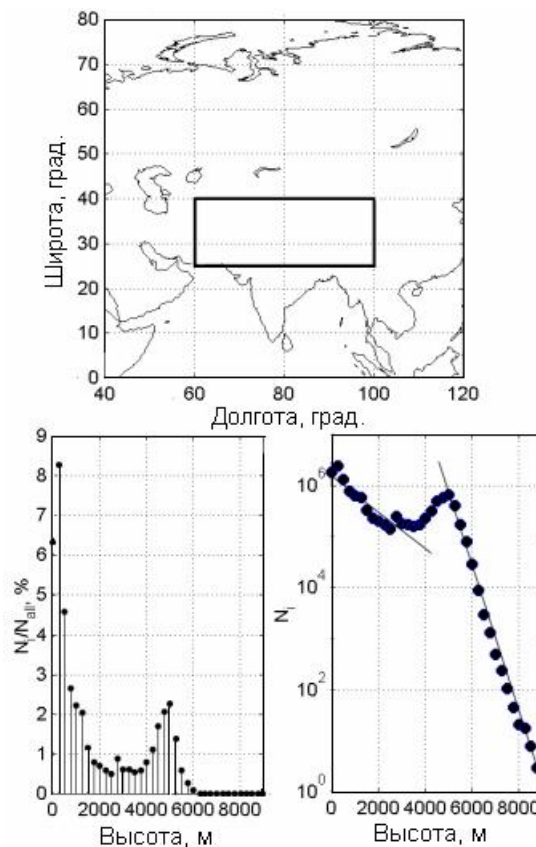


Рис. 7-17. Высота гор. Вверху – исследуемый регион. Слева внизу – гистограмма  $N/N$ . Справа внизу зависимость  $\lg N - \lg H$  ( $N$  – число гор,  $H$  – их высота).

Не будем делать ни предположений, ни выводов относительно особенностей образования гор в выбранном регионе. Приведенный пример носит только методический характер. Возможно, оценка  $D_H$  может оказаться полезной для выяснения физики процессов образования гор и их классификации. Важный вывод, который можно сделать, анализируя рис. 7-17, состоит в том, что высота гор, это фрактал, а это означает: наличие гор, их количество и высота не случайны, а собственно образование гор является следствием протекания процессов самоорганизации, происходящих на поверхности Земли. Как отмечалось выше, образование гор является так же следствием действия Принципа.

Обратим внимание на то, что высота гор оценивалась из соотношения:  $rgH \sim s$ , (I) где  $s$  - предел текучести материала литосферы. Формулу для высоты гор можно получить

из соотношения:  $rgH^2 \sim a$  (II), (т.к.  $H = a(1 - \sin q)^{1/2}$  и  $a^2 = a/rg$ ,  $a$  -поверхностное натяжение). Сравнивая I и II, получаем:  $H = sa^2/a$ : высота гор пропорциональна пределу текучести и квадрату капиллярной постоянной и обратно пропорциональна величине поверхностного натяжения (лапласовой силе). Последнее, казалось бы, противоречит (II), однако это не так, потому, что после подстановки значения  $a$ , получаем:

$H = a(1 - \sin q)/s$ . Отсюда следует реологический вывод: поверхностное натяжение и сдвиговое лапласово напряжение тем выше, чем выше предел текучести. Оценив выше:  $a = 10^{19}$  дин/см;  $s = 10^9$  дин/см<sup>2</sup>;  $a = 10^8$  см и  $H = 10^6$  см, можно получить величину:

$(1 - \sin q) = 10^{-4}$ , или  $q \rightarrow 90^\circ$ , что соответствует:  $a \gg H$ .

## VII. 8. Физика 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 двойное отношение: некоторые видят в них доказательство реальности плюмов, другие усматривают в них лишь сейсмические шумы (Kerr, 2006).

Как было выяснено, плюмы – мантийные струи пронизывают мантию от границы ядра до поверхности Земли. При выходе на поверхность они изливаются базальтами малой вязкости – трапшами. Плюмы по внешнему виду напоминают поднимающийся в атмосфере тороидальный вихрь (Лаврентьев, Шабат, 1973). 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. 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.

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  $10 \times 10$  км<sup>2</sup>, толщина мантии 3000 км, скрытая теплота плавления  $U = 1$  кДж/г, плотность вещества мантии  $\rho = 4$  г/см<sup>3</sup>. Тепловая энергия  $Q = \rho VU$ , где  $V$  – объём вещества мантии, участвующего в прохождении плюма,  $\approx 3 \cdot 10^{20}$  см<sup>3</sup>, 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 даёт.

Представим себе, что плюм «вышел» на материковую поверхность Земли в районе береговой линии (рис. 7-18-1). В момент выхода плюма растягивающие силы направлены вверх (рис. 7-18-2). Уровень океана (точка) при этом понижается (квадрат), - это явление получило название регрессия. Следующим этапом по окончанию цикла расширения, связанного с плюмом, происходит цикл сжатия Земли гравитационными силами (рис. 7-18-3). При этом уровень океана возрастает и становится выше изначального, - это трансгрессия.



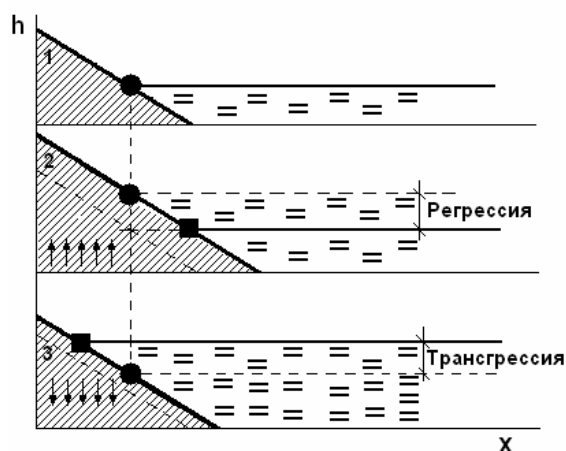


Рис. 7-18. Выход плюма на поверхность Земли и связанные с этим трансгрессии и регрессии.

Итак, временные этапы последовательного развития плюма включают (рис. 7-18):

1. «Вскипание» внешнего ядра и транспортировка «пузыря» к поверхности мантии.
2. Рост давления на границе мантии (в принципе, до мегабарных величин).
3. По достижении критического давления (порядка 10 кбар) начинается вязкоупругое течение мантии. Происходит локальный подъем части литосферы – Земля расширяется. При этом уровень моря понижается, наблюдается регрессия.
4. Плюм «всплывает» аналогично тороидальному вихрю, перенося к поверхности Земли из ядра тепло, водород, базальт и воду.
5. После подъема плюма, Земля релаксирует: начинается цикл гравитационного сжатия, выравнивается высота геоида, происходит «растекание» литосферы в области ранее поднявшегося региона, уровень океана локально повышается – наступает трансгрессия.
6. Изменение соотношения высоты гор и уровня океана изменяет характер разрушения гор, что ведет к изменению режима седиментации и изменению характера осадков: например, смена песка на глину и т.п. Этот момент может оказаться принципиальным при разработке модели, основанной на использовании идеи важной роли плюма в образовании месторождений углеводородов. Другой принципиальный момент этой проблемы состоит, в контексте нашей модели, в том, что выход вещества плюма состоит в мощнейшей «прокачке» литосферы потоком горячего водорода. Наличие водорода приводит к приобретению веществом Земли ряда принципиально новых качеств.

Рассмотрим проблему т.н. гавайских «горячих точек» и их перемещению по поверхности океана во времени. Как мы отмечали, рост океанов в процессе эволюции Земли связывается с последовательным прохождением 4-х этапов: 1) Юрский суперхрон-суперплюм, 2) период Мезозойских инверсий, 3) Меловой суперплюм-суперхрон и, наконец, 4) начавшийся 80 млн. лет тому назад, период современных инверсий геомагнитного поля. В Тихом океане часто встречаются регионы, в которых можно выделить все четыре этапа, но не везде. В районе траверса: Камчатка – Гавайи (1 и 2 на рис. 7-19-а) можно выделить два из них. Это образовавшийся в период 120-80 млн. лет назад Меловой суперплюм – зона спокойного геомагнитного поля (3 - на рис.7-19-а). Источник гавайского суперплюма отмечен черной стрелкой и треугольником. Здесь же показано направление спрединга суперплюма. Граница между 3 и 2 имеет возраст 120 млн. лет. Здесь примерно 80 млн. лет тому назад начался спрединг (белая стрелка и направление спрединга), сопровождавшийся возникновением срединно-океанического хребта (СОХ). Зона спрединга СОХ отмечена полосовыми магнитными аномалиями прямой и обратной полярности геомагнитного поля. Каждой из стрелок соответствует

область пространства на границе внешнего ядра, где, собственно, и зарождается и тот и другой спрединг. Угловые расстояния между стрелками в процессе эволюции Земли - остаются неизменными. Поэтому, по мере наращивания океанической коры региона современных инверсий, черная стрелка перемещается по области «постоянного поля», т.е. по области Мелового суперхрона, генерируя при этом Гавайскую вулканическую гряду.

Таким образом, наша модель находит непротиворечивое объяснение, почему и как происходит дрейф «горячей точки» по океаническому дну «зоны спокойного поля». Остается выяснить причину, почему магматизм горячей точки в этой области пространства имеет прерывистый характер. Обратимся к рис. 7-19-*b*, здесь на первой полосе (1) показаны временные интервалы спрединга трех суперплюмов. На второй полосе (2) показаны временные области спрединга, соответствующие работе СОХ. Полоса 2 является обратным отражением полосы 4, где показана шкала инверсий геомагнитного поля, на которой черные полосы обозначают современную полярность поля, а белые = противоположную полярность. Согласно модели горячей Земли, во время современной полярности поля на Земле происходит цикл её сжатия, в период обратного поля – расширения. Именно в эти периоды происходит интенсивный спрединг в зонах СОХ, отраженный на полосе 2. Предположим, что спрединг горячей точки менее интенсивен, чем спрединг СОХ. При выполнении этого, вполне очевидного условия, третья полоса показывает спрединг горячей точки. Таким образом, происходит «дробление» второго и третьего суперплюмов (1) на более короткие периоды активизации. Черные полосы между полосами 3 и 4 показывают время измерений параметров гавайских горячих точек.

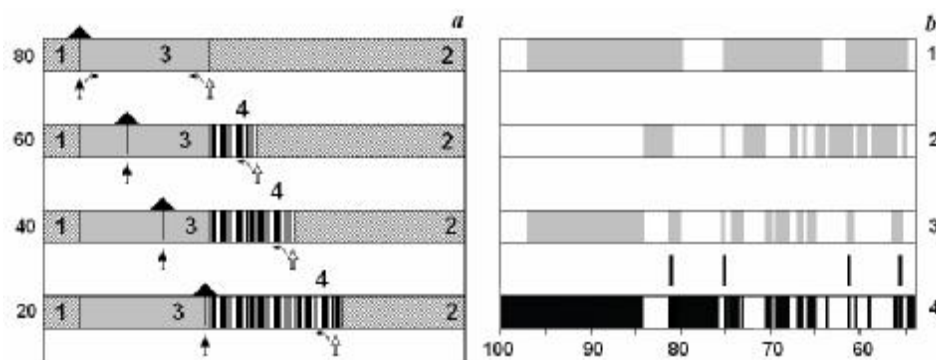


Рис. 7-19. Плюмы и суперплюмы. Перемещение «горячей точки» - *a*. 1 – Азия, 2 – Америка, 3 – меловой суперплюм, 4 – зона инверсий. Цифры слева – время в млн. лет, черная стрелка и треугольник – «горячая точка», белая стрелка – СОХ. Модель «дробления» суперплюма - *b*: 1 – суперплюмы, 2 – периоды «работы» СОХ, 3 – плюмы и суперплюм, 4 – шкала инверсий.

## VII. 9. Геодинамика и фундаментальные характеристики Земли.

Как известно, эксперимент - критерий истины. Любая модель строения Земли должна удовлетворять известным и неоднократно проверенным экспериментальным данным и её фундаментальным характеристикам. Такие характеристики Земли, как величина её радиуса и скорость его изменения; величина сжатия и изменение его с течением времени; сила тяжести и её изменение, скорость вращения, высота геоида, главные центральные моменты инерции и т.п., далеко не полный перечень фундаментальных характеристик Земли. Эти параметры и характеристики определяются геодезическими методами и составляют основу геодезии как науки. Если модель внутреннего устройства Земли противоречит её фундаментальным характеристикам, вероятнее всего то, что эта модель неверна.

Как следует из нашей модели горячей Земли, она в процессе эволюции расширяется. Цикл расширения следует за циклом сжатия, вслед за которым снова наступает цикл расширения и так до тех пор, пока полностью не релаксирует метастабильное вещество внутреннего ядра. В настоящее время Земля, по модели, переживает цикл сжатия. Об этом, в частности, говорит тот факт, что на 95% площади Земли доминирует сжатие, а на 5%, только в зоне влияния рифтов, - растяжение (Кропоткин, 1984).

По оценке одного из ведущих геодезистов России Машимова (1996), земной радиус уменьшается в настоящее время со скоростью 1 см в год, полярное сжатие уменьшается на  $1 \times 10^{-9}$  в год, а центр инерции смещается в юго-западном направлении на 2 см в год.

Фундаментальные характеристики Земли показывают (Машимов, 1996), что:

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

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

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

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

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

6. Основные интегральные характеристики, определяющие динамику Земли, это полярное сжатие  $a$ , экваториальное сжатие  $a_e$  и долгота  $I_o$  большой полуоси экваториального эллипса геоида. Вековые изменения этих параметров:  $da/dt = -0.22 \times 10^{-9}$  год<sup>-1</sup>,  $da_e/dt = 3.6 \times 10^{-9}$  год<sup>-1</sup>,  $dI_o/dt = -0.3'$  год<sup>-1</sup>. Современные данные:  $a = 0.0033528132$ ;  $a_e = 0.0000108728$ ;  $I_o = -14^\circ 54'$ .

7. Наблюдаемое уменьшение моментов инерции (не более  $0.16 \times 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>) соответствует уменьшению объема геоида.

***Выводы.*** Исследование временных изменений параметров геоида является главной задачей геодинамики. Изучение временных изменений тессеральных гармоник геоида, отражающих пространственное распределение аномалий масс в земной коре и верхней мантии, может оказаться полезным для прогноза землетрясений и извержений вулканов (Машимов, 1996). Модель горячей Земли находится в полном соответствии с фундаментальными характеристиками Земли, чего нельзя сказать о модели холодной Земли и плитной тектонике.

### ***Литература***

- Бердыев А.А., Мухамедов В.А. Землетрясения - фликкер-шум? ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 5. С. 1077-1081.
- Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследованиях 1/f-шума. УФН. 1983. Т.141. № 1. С. 151.
- Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. М.: Недра. 1984. 110 с.
- Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и развитие. М.: ИЛ. 1960. 485 с.
- Иванов С.С. Самоподобие последовательности инверсий геомагнитного поля. Геомагнетизм и Аэрономия. 1993. Т. 33. № 5. С. 181-186.

Иванов С.С. Мультифрактальные свойства и размерность аттрактора обращений геомагнитного поля. Геомагнетизм и Аэрономия. 1996. Т. 36. № 4. С. 149.

Карта осей палеомагнитных аномалий мирового океана. Составители: Карасик А.М. и Сочеванова Н.А. ЛО ИЗМИРАН. Л.: 1981.

Климонтович Ю.Л. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем. УФН. 1996. Т. 166. № 11. С.1231 - 1240.

Кропоткин П.Н. Пульсационная геотектоническая гипотеза В.А.Обручева и мобилизм. В кн. Проблемы расширения и пульсаций Земли. М.: Наука. 1984. С.24-33.

Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнх. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.

Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. Новосибирск: ИГиГ. 1990.

Кузнецов В.В. Связь фрактальных свойств и масштабной инвариантности инверсий магнитного поля с изменением режима конвекции в ядре Земли. Геомагнетизм и Аэрономия. 1998. Т. 38. С. 166-172.

Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир. 1991. 447 с.

Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука. 1973. 417 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 733 с.

Ламб Г. Гидродинамика. М.: Гостехиздат. 1947.

Макаренко Г.Ф. Вулканические моря Земли и Луны. М.: Недра. 1983. 143 с.

Маслов Л.А. Изучение динамики крупномасштабных движений литосферы по значениям высот геоида. В кн. Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии. Киев: Наукова думка. 1988. С. 193-197.

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

Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. М.: Мир. 1984. 811 с.

Печерский Д.М. Инверсии геомагнитного поля, плюмы и изменения органического мира в фанерозое: удивительные совпадения // Физика Земли. 2003. № 1. С. 53-56.

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

Рузмайкин А.А., Трубицын В.Л. Статистика инверсий геомагнитного поля за последние 80 млн. лет. Геомагнетизм и Аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 166.

Стокер Дж. Нелинейные колебания в механических и электрических системах. М.: ИЛ. 1952. 264 с.

Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.

Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.

Харланд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г. и др. Шкала геологического времени. М.: Мир. 1985. 188 с.

Чудинов Ю.В. Расширение Земли и тектонические явления: о направлении движений в окраинно-океанических зонах. Геотектоника. № 1. 1981. С. 19-37.

Эвернден Дж.Ф. О чем говорят параметры фигуры Земли  $\epsilon = 1/298$ ,  $C/Ma^2 = 0.333$ ? Изв. РАН Физика Земли. № 2.1997. С. 85-94.

Adjaout A., Sarrailh M. A new gravity map, a new marine geoid around Japan and the detection of the Kuroshio current. J. Geodesy. 1997. V. 71. P. 725-735.

Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise. Phys. Rev. Lett. V. 59. N. 4. 1987. P. 381.

Carey S.W. The expanding Earth. Amsterdam. Elsevier. 1976. 486 p.

Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversals, polar wander and core-mantle coupling. Science 1987. V. 237. P. 1140-1147.

Fuller M., Weeks R. Superplumes and superchrons. Nature. 1992. V. 356. P. 16.

Geodynamic map of the Circum-Pacific region, North-West quadrant. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. 1985. USA.

- Giardini D., Li X.D., Woodhouse J.H. Splitting functions of long-period normal modes of the Earth. *J. Geophys. Res.* 1988. V.93. №. B11. P.13716.
- Harabaglia P., Doglioni C. Topography and gravity across subduction zones. *Geoph. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 5. P. 703-706.
- Imakire T. Crustal deformation observed by GEONET, 2000. Geography and Crustal Dynamics Research Center. <http://mekira.gsi.go.jp/ENGLISH/index.html>
- Kato T., Kotake Y., Nakao S. et al., Initial results from WING, the continuous GPS network in western Pacific area. *Geoph. Res. Lett.* 1998. V. 25. NO. 3. P. 369-372.
- Kerr R.A. Rising plumes in Earth's mantle: phantom or real? // *Science* 2006. V. 313. P. 1726.
- Kuznetsov V.V. Characteristic features of continental drift. *Modern Geology.* 1990. V. 14. P. 239-243.
- Larson R.L., Olson P. Mantle plumes control magnetic reversal frequency. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 107. № 3/4. P. 437.
- Lewis Ch., Smith A.D. The geoid, plate configuration and Antarctica. *Геофизический журнал.* 1998. Т. 20. № 4. С. 3-8.
- Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature.* Freeman.: N.Y.1983. 272p.
- Mazaud A., Laj C. The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 107. № 3/4. P. 689.
- Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized Earth. *Science.* 1969. V. 166. P. 609-621.
- Nolet G., Karato S.-I., Montelli R. Plume fluxes from seismic tomography // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 248. P. 685-699.
- Plate-tectonic map of the Circum-Pacific region. Pacific basin sheet. 1985. Chairman M.T.Halbouty. Tulsa. Oklahoma. USA.
- Scalera G. Paleopoles on an expanding Earth: a comparison between synthetic and real data sets. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990 V. 62. P. 126-140.
- Schmidt P.W., Embleton B.J.J. A geotectonic paradox: has the Earth expanded? *J. of Geophysics.* 1981. V. 49. P. 20-25.
- Steiner J. An expanding Earth on the basis of sea-floor spreading and subduction rates. *Geology.* 1977. V. 5. P. 313-318.
- Tarling D.H. *Palaeomagnetism.* Chapman & Hall. London. 1983.
- Tarling D.H., Abdeldayem A.L. Palaeomagnetic-pole errors and a "small-circle" assessment of the Gondwanan polar-wander path. *Geophys. J. Int.* 1996. V. 125. P. 115-122.
- Turcote D.L. Fractals in Geology and Geophysics *Pure Appl. Geoph.* 1989. V. 131. № 1.
- Van Hilten D. Palaeomagnetic indications of an increase in the Earth's radius. *Nature.* 1963. V. 200. P. 1277-1279.
- Vogel K. Recent crystal movements in the light of Earth expansion theory. 6<sup>th</sup> International Symposium "Geodesy and Physics of the Earth". Potsdam. 1989. P. 284-289.
- Ward M.A. On detecting changes in the Earth's radius. *Geoph. J.R.Astron. Soc.* 1963. V. 8. P. 217-225.

## Глава VIII. СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ, ФИЗИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В Главе VIII изложены результаты исследований таких вопросов:

- возникновение когерентности в акустически активной среде взаимодействующих между собой раскрывающихся трещин;
- ударно-волновая (УВ) модель землетрясения;
- сильные движения грунта при землетрясении;
- особенности глубоких землетрясений и природа афтершоков;
- отношение к прогнозу землетрясения.

Ключевой момент главы составляет описание УВ модели землетрясения. Во временном срезе модели можно выделить три взаимосвязанных этапа:

- На первом этапе в нагруженной литосфере происходит образование когерентных структур, основанных на взаимодействии элементов между собой путем обмена звуковыми (акустическими) волнами. Взаимодействие акустических элементов структуры (дилатонов и бризеров) приводит, в конечном счете, к *образованию ударной волны*. На сравнительно малых глубинах когерентные структуры возникают за счет взаимодействия раскрывающихся трещин между собой путем обмена акустическими волнами. На больших глубинах, где реология среды не позволяет протеканию процесса образования трещин, когерентная структура может возникнуть за счет ансамбля схлопывающихся кавитирующих «пузырей», образующихся в глубоких слоях литосферы. Здесь, так же как в первом случае, звуковые импульсы от схлопывающихся пузырей воздействуют на другие пузыри, что приводит к их схлопыванию.
- Второй этап составляет комплекс явлений, связанных с прохождением ударной волны по геологической среде от области её формирования – гипоцентра землетрясения, до поверхности Земли. На этом этапе землетрясение проявляет себя как *излучатель объемных сейсмических волн*. Энергия землетрясения на этом этапе расходуется практически полностью. Этот процесс является общим и для коровых, и для глубоких землетрясений,
- Третий этап включает процессы, происходящие в эпицентре разрушения - районе, где ударная волна выходит на «дневную» поверхность, отражается и взаимодействует с образовавшейся в этом процессе волной разгрузки (разряжения). При этом на поверхности Земли происходит собственно *«трясение» земли*, т.е. возникновение отколов, разрывов поверхности, вспучивание поверхности грунта и т.п.

### VIII. 1. Математическая модель акустического сверхизлучения.

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

*Эксперименты.* Модель базируется на объяснении известных экспериментальных фактов. Авторами ряда работ неоднократно наблюдалось явление самопроизвольного усиления интенсивности акустической эмиссии, которое затем, так же самопроизвольно, - прекращалось. Единственное объяснение этому явлению с точки зрения самоорганизации когерентной структуры на основе взаимодействия звуковых волн с раскрывающимися трещинами было сделано автором. Им же высказано предположение, что эффект усиления акустической эмиссии имеет некоторую общность с оптическим сверхизлучением. Любопытный факт, досконально исследованный в некоторых работах в Японии и Китае, состоит в том, что эффекты акустического сверхизлучения происходят далеко не во всех

типах горных пород. Так, например, изучение режимов акустической эмиссии гранитов двух различных типов, внешне практически не отличающихся один от другого, показало, что при нагружении образцов на прессах, они ведут себя по-разному. На серии образцов гранита из одного месторождения эффект резкого усиления интенсивности акустической эмиссии, названной нами акустическим сверхизлучением, постоянно присутствует, однако, на серии образцов гранитов другого типа – эффекта нет. Этот результат, неоднократно подтвержденный экспериментально, дает основание полагать, что и в земных недрах должны встречаться геологические тела, реология которых такова, что в них могут развиваться процессы самоорганизации и генерироваться, в конечном счете, землетрясение, а в других телах, на первый взгляд идентичных первым, таких явлений возникнуть не может.

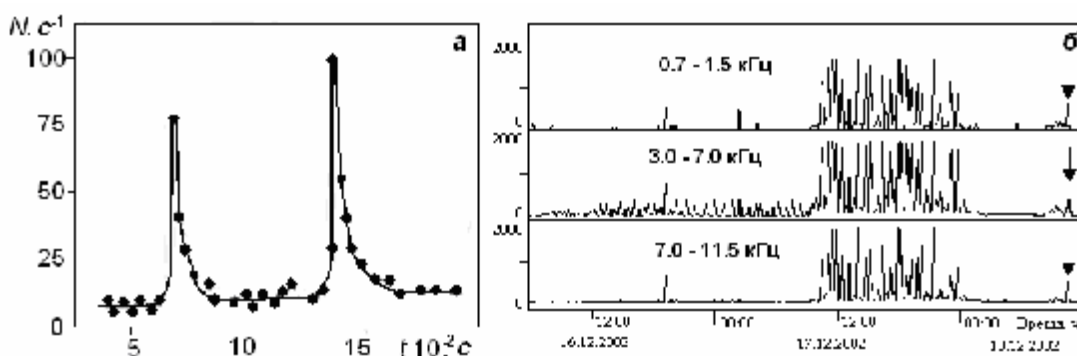


Рис. 8-1. а) Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения (Журков и др. 1980). б) Геоакустические сигналы, зарегистрированные перед землетрясением 18.12.2002 ( $K = 12.1$ ) на Камчатке (ИКИР). Время события отмечено стрелкой (Купцов, 2006).

Результаты лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений (рис. 8-1) показывают, что на фоне постоянного акустического фона ( $I = dN/dt \sim N$ ), излучаемого нагруженным образцом горной породы, возникает взрывоподобное нарастание (типа цепной реакции) количества раскрывающихся трещин  $N$  (акустических импульсов) в единицу времени  $t$ :  $dN/dt \sim N^2$ . По аналогии с оптикой это явление можно считать акустическим сверхизлучением. Ясного понимания этого явления нет.

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

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

перенапряжению на межатомных связях. Отсюда следует, что напряжение  $\sigma$ , разрывающее образец за время  $\tau$ :

$$\sigma = 1/\gamma (U_0 - kT \ln \tau/\tau_0) = \sigma_{\max} - (kT/\gamma) \ln \tau/\tau_0. \quad (8.1)$$

Рассмотрим роль ангармонизма в кинетической теории прочности. Представим силу межатомного взаимодействия  $F(\Delta)$  (см. рис. 8-2) в виде разложения в ряд Тейлора по величине  $\Delta a$  смещения атома от равновесного расстояния  $r$ , сохраняя два члена:  $F(\Delta a) = f \Delta a - g(\Delta a)^2$ , где  $f$  – константа упругости связи, а  $g$  – коэффициент ангармоничности, учитывающий нелинейность силы взаимодействия.

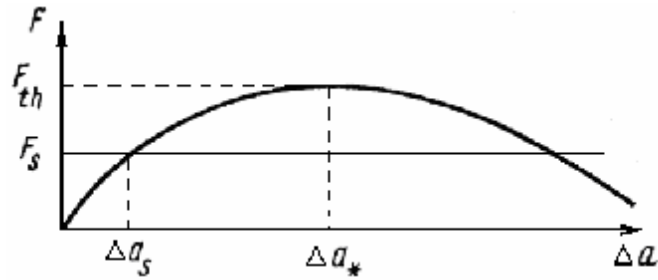


Рис. 8-2. Сила межатомного взаимодействия как функция смещения атомов (Журков, Петров, 1978).

Из рис. 8-2 видно, что максимум силы  $F_{th}$ , достигаемый при удлинении  $\Delta a^*$ , определяет теоретическую прочность связи. Если к связи приложена сила  $F_s$ , то при  $F_s < F_{th}$  возможен термофлуктуационный разрыв связи. Он обусловлен ангармоничностью тепловых колебаний атомов, что порождает дополнительную флуктуирующую силу  $Fg = F_{th} - F_s$ :

$$F_s = F_{th} - 2(gkT/f) \ln \tau/\tau_0. \quad (8.2)$$

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

$$\sigma = \sigma_{\max} - (2gkT/fa^2x) \ln \tau/\tau_0, \quad (8.3)$$

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

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

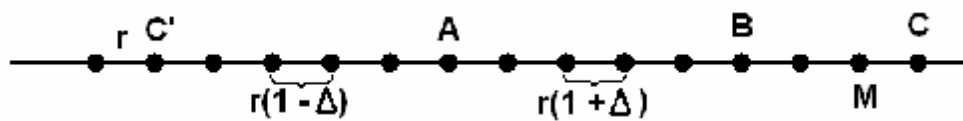
В приближении Грюнайзена изменения частот фононов одинаковы для всех мод и определяются деформацией  $\epsilon = \Delta V/V$  объема кристаллической ячейки:

$$\Delta\omega/\omega = G\epsilon \quad (8.4)$$



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

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



Дилатон  $\Delta$  - в линейной цепочке атомов

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

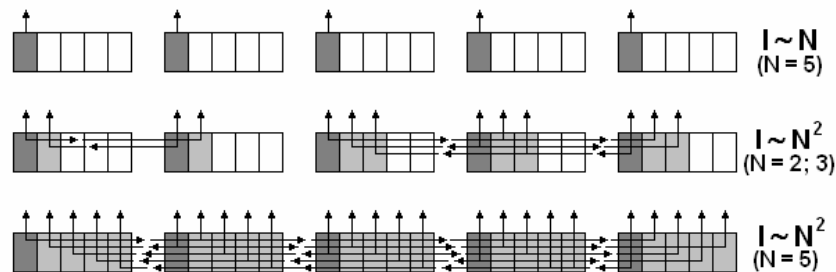


Рис. 8-3. Излучение раскрывающихся трещин (схлопывающихся дилатонов): верхняя панель – излучение акустических волн без связи между дилатонами. Средняя и нижняя панели – акустическая связь между двумя, тремя и пятью дилатонами.

Предположим, что в некотором объеме среды существует  $n$  ( $n = 5$ ) дилатонов (рис. 8-3), а схлопывание происходит только в одном. Излученная акустическая волна взаимодействует путем обмена энергией с фононами решетки с другими дилатонами, передает им энергию и способствует их схлопыванию. Если характерный размер выделенного объема среды меньше длины волны  $l$ , то в нем взаимодействия с собственной акустической волной не происходит. Рассмотрим  $N$  объемов, в каждом из которых находится  $n$  дилатонов. Если взаимодействия между дилатонами не происходит, то в единицу времени излучается  $N$  импульсов. Если происходит такое взаимодействие, то акустические волны возникающие при схлопывании  $N$  дилатонов «запускают»  $(N - 1)$  дилатон. В результате акустический фон возрастает с  $N$  импульсов в единицу времени до:  $N + N(N - 1) = N^2$ , что и требовалось доказать. По физике, это явление близко к свержизлучению Дикке (коллективное спонтанное испускание электромагнитного

излучения), которое было предложено им задолго до изобретения лазеров. Дикке показал, что система, состоящая из  $N$  инвертированных двухуровневых атомов, может спонтанно перейти в основное состояние за время, обратно пропорциональное числу атомов, что приводит к усилению потока излучения  $\sim N^2$ .

При раскрытии трещины излучается звуковой импульс акустической эмиссии (АЭ). Этот импульс “несет” определенную долю энергии и, взаимодействуя с дилатоном (микротрещиной), передает ему энергию, “помогая” раскрыться. Трещина начинает расти и излучает при этом “свой” импульс, который взаимодействует со следующей трещиной и т.д. При этом может наблюдаться эффект лавинного образования трещин, звуковые импульсы которых когерентно складываются, обеспечивая при этом явление усиления звуковой волны (Ishido, Nishizawa, 1984) и возникновение фрактальных структур (рис. 8-4).

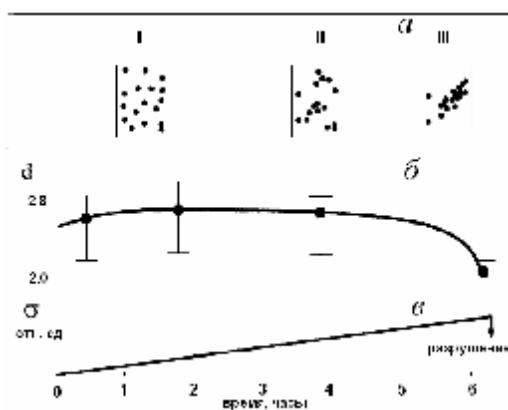


Рис. 8-4. *a* - Распределение гипоцентров акустической эмиссии по мере увеличения сжатия образцов гранита и возникновения фрактальных структур. *б* - изменение фрактальной размерности  $d$ . *в* - нагрузка образца до его разрушения (Lei et al., 1992).

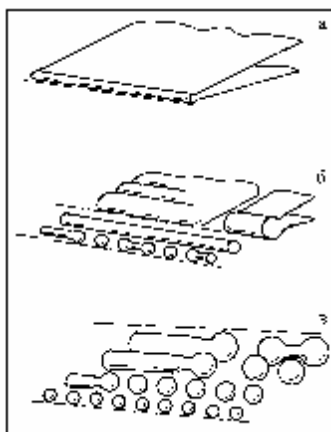


Рис. 8-5. Схема процесса залечивания (застарания) трещин (Smith, Evans, 1984).

*Залечивание трещин.* Как известно, часто землетрясения происходят в одном и том же месте геологической среды. Это означает, что среда, если она и разрушалась во время землетрясения с образованием трещин, - восстанавливает свои свойства в течение обозримого промежутка времени, т.е. происходит залечивание трещин. Рисунок 8-5 показывает последовательность процесса залечивания трещин. Наличие этого процесса имеет принципиальное значение в нашей модели, Если трещина не способна к залечиванию, и остается в течение длительного времени открытой, то система оказывается не самоподобной, т.е. в такой среде не может возникнуть акустически активной

структуры. Трещины, возникающие в таких структурах, могут закрываться (залечиваться) при прохождении ударной волны по среде. После прохождения ударной волны, среда вновь оказывается способной к её генерации. Этот процесс в сейсмологии называется афтершоковым.

*Пространственная когерентность среды.* В напряженной среде с явно выраженным характером нагрузки реализуется критерий разрушения Кулона-Мора (Поль, 1975). Согласно этому критерию, в образце максимальные величины касательных напряжений возникают в плоскостях, наклоненных под углом  $b$  к оси нагружения, близким к  $45^\circ$ . Однако, этот угол не всегда равен  $45^\circ$ . Его значение принимается:  $b = 45^\circ - j/2$ , где  $tg j = \kappa$ , а  $\kappa$  - коэффициент “внутреннего трения”. Величина угла  $b$  не зависит от прочности материала (рис. 8-6).

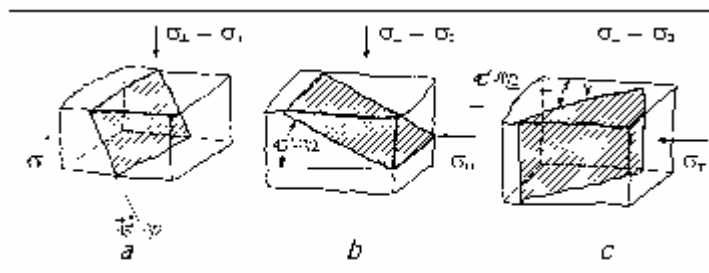


Рис. 8-6. Критерий разрушения Кулона-Мора (Поль, 1975). Максимальные величины касательных напряжений возникают в плоскостях, наклоненных под углом  $b$  к оси нагружения, близким к  $45^\circ$ .

В дальнейшем нас будет интересовать лишь та часть теории Кулона-Мора, которая описывает условия формирования пространственного угла образования трещин. Разрушение образца, как известно, происходит именно под этим углом  $q$  (рис. 8-6). Кулон обнаружил, что разрушение происходит под углом  $q = 45^\circ - j/2$ , где угол  $j$  можно оценить по известному критерию Кулона-Мора, записанному в главных напряжениях:

$$\sin j = [1/2 \cdot (S_I - S_{III})] / [c \cdot \text{ctg } j - 1/2 \cdot (S_I - S_{III})], \quad (8.5)$$

здесь  $c$  - прочность горной породы,  $S_I$  и  $S_{III}$  - главное и дополнительное напряжения. Из этой формулы следует, что если:  $s \rightarrow 0$ , то  $j \rightarrow 90^\circ$ , а  $q \rightarrow 0^\circ$  и, наоборот, если:  $s \rightarrow \infty$ , то  $j \rightarrow 0^\circ$ , а  $q \rightarrow 45^\circ$ . Т.о., с увеличением глубины  $h$  и, естественно, увеличением литостатической нагрузки  $s$ , угол  $q$  будет возрастать от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  (см. рис. 8-7-а). Полученный результат говорит о том, что в среде, которая “нагружена” только за счет статики вышележащих слоев, не может возникнуть дальний порядок и, очевидно, не может быть землетрясений. Возможно, это не совсем так при больших величинах  $s$  ( $s \geq 5$  кбар), когда угол  $j$  будет очень мал и угол раскрытия трещин  $q \approx 45^\circ$ . Однако, при меньших величинах  $s$  угол  $q$  может быть меньше  $45^\circ$ . Для того, чтобы в такой среде возник дальний порядок, необходимо каким-либо способом “довернуть” угол  $q$  до необходимого значения. В принципе, это можно сделать с помощью “боковой”, тектонической нагрузки (рис. 8-7-б). Эта нагрузка вызывается глобальными тектоническими причинами, именно она приводит к образованию разломов, дрейфу плит и континентов. Возможно, “довернуть” угол  $q$  можно при помощи электрического поля, если считать, что микротрещину можно рассматривать как электрический микродиполь.

Обратим внимание на одно из следствий модели. Величина литостатической нагрузки  $s$  составляет несколько килобар, величина тектонической “боковой” -  $s$  должна быть примерно того же порядка. Это намного больше, чем величина напряжения, вызываемая лунно-солнечными приливами (7 бар). Возможно, именно в этой разности

величин  $S$  и состоит причина отсутствия регулярной для всех сейсмически активных регионов корреляции между приливами и сейсмичностью.

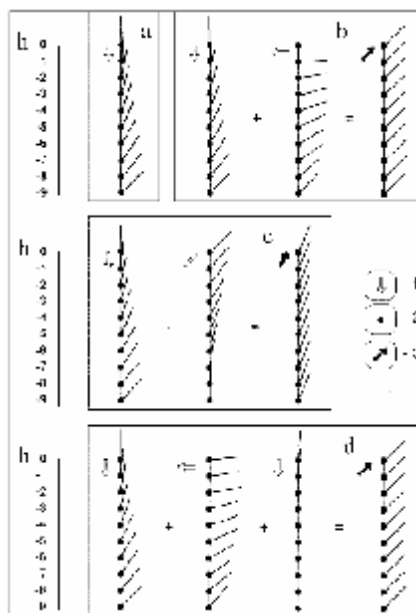


Рис. 8-7. Схема напряжений в литосфере: с увеличением глубины  $h$  и литостатической нагрузки  $S$ , угол  $q$  будет возрастать от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  (a); при аддитивном сложении двух напряжений, действующих под углом друг к другу, угол образующихся трещин в зоне их возникновения  $q = 45^\circ$  (b), или  $q > 45^\circ$ , и приближается к  $90^\circ$  (c); рис. 8-7-d иллюстрирует возможность сравнительно небольшой по величине дополнительной нагрузки привести к возникновению дальнего порядка и пространственной когерентности.

Рассмотрим случай, когда угол  $q$  определяется литостатической нагрузкой и напряжением, возникающим в зонах субдукции. Здесь  $S$  является результатом векторного аддитивного сложения двух напряжений, действующих под углом друг к другу (рис. 8-7-с). Угол образующихся трещин в зоне их возникновения  $q > 45^\circ$  и приближается к  $90^\circ$ . Рисунок 8-7-d иллюстрирует возможность сравнительно небольшой по величине дополнительной нагрузки привести к возникновению дальнего порядка\* и пространственной когерентности. Этим примером демонстрируется возможность проявления в нашей модели т. н. триггер-эффекта. Этот эффект, как известно, широко обсуждается сейсмологами.

\*Дальний порядок – наличие пространственной корреляции микроструктуры вещества в пределах образца. Дальний порядок – упорядоченная фаза. Параметр порядка - спонтанная поляризация, или константа анизотропии диэлектрической проницаемости, или намагниченность в ферромагнетиках, или фаза волновых функций частиц, которая может измениться во всем образце в целом, но не может изменяться независимо в разных его точках.

*Возникновение временной когерентности.* Другой гипотетический способ получения дальнего порядка в модели взаимодействующих трещин, это возможный механизм взаимодействия слабых ударных волн, возникающих в акустически активной среде. Ударные волны, образованные посредством объединения нескольких звуковых импульсов от раскрывающихся трещин, обладают уже более низкой несущей частотой и способны распространяться на расстояния, большие, чем звуковые импульсы от трещин. Такие волны способны объединяться аналогично тому, как это происходит с солитонами,



процесс вновь вызывает образование волн, он повторяется снова и снова, вплоть до возникновения лавины трещин и волн. При гидродинамической кавитации в потоке капельной жидкости возникают растягивающие напряжения, и в результате местного понижения давления возникает разрыв сплошности среды в виде полости (пузыря). Пузырь, представляющий собой пар жидкости или газ (вероятнее всего водород), находящийся под давлением  $p_n$ , увеличивается в размере от начального радиуса  $R_o$  до тех пор, пока местное давление (в области пузыря) будет меньше равновесного внешнего давления  $p_o$ . Условие неограниченного расширения пузыря при гидродинамической кавитации:

$$p_{кр} \gg p_n - (\sigma/R_o) [1 + (p_o - p_n) R_o/R]^{-1/2}, \quad (8.6)$$

где  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости, а  $R$  радиус расширяющегося пузыря.

Приведем уравнение адиабатического увеличения объема газа (пара) пузыря:

$$R d^2R/dt^2 + 3/2 (dR/dt)^2 + (1/r) (2\sigma/R) - 1/r(p_o - p_n + 2\sigma/R_o) (R_o/R)^{3\gamma} = 1/r[p - p(t)], \quad (8.7)$$

где  $\gamma$  показатель адиабаты, а  $r$  плотность жидкости.

Изменение режима течения жидкости, величины местного давления в потоке или какая-либо другая причина, например интенсивная звуковая волна, приводят к схлопыванию кавитационных пузырьков. Это явление сопровождается излучением звукового импульса (ударной волны), причем, чем меньше газа содержит пузырек, тем интенсивнее звуковой импульс. Образовавшиеся при схлопывании пузырей плоские акустические волны рассеиваются на других пузырях и их зародышах.

Падение плоской звуковой волны  $p_m \exp(ikr)$  на единичный пузырь, радиус которого много меньше длины звуковой волны, представляется (Красильников, Крылов, 1984) в виде суммы двух членов:

$$p(r) \gg p_m \exp(ikr) + f_1 p_m \exp(ik|r - r_1|)/|r - r_1|, \quad (8.8)$$

где  $r_1$  - координата центра пузырька,  $f_1$  - амплитуда рассеяния. При  $R \ll l$  амплитуда рассеяния сферически симметрична и не зависит от угла падения волны на пузырь. Она выражается формулой:

$$f_1 = R_o / (w_o^2/w^2 - 1 - id), \quad (8.9)$$

где  $d$  - затухание волны, а  $w_o$  - резонансная частота пузырька. Поглощение звука происходит эффективнее всего на резонансных частотах. Таких пузырей становится в системе все меньше и меньше и, наконец, происходит т.н. "просветление" системы. При этом амплитуда звуковой волны неограниченно возрастает. Волна из слабой акустической может превратиться в мощную уединенную, ударную волну.

Таким образом, в системе, включающей кавитирующие пузыри, возможна генерация мощной ударной волны. Известны данные по экспериментальному подтверждению существования таких систем, а так же известна реакция систем на ударные волны. Сошлемся, например, на работу (Борисов и др., 1977), в которой авторы наблюдали эффект усиления ударных волн в кипящих криогенных жидкостях - азоте и фреоне. Пузырьки пара при воздействии на них слабой ударной волной, начинали интенсивно конденсироваться и исчезать. При этом происходило усиление ударной волны. Механизм усиления ударной волны, считают авторы, состоит в том, что при схлопывании пузыря повышается давление на фронте ударной волны. Авторы не обсуждают возможности волнового характера воздействия на кавитирующие пузыри, однако, нет причин не рассматривать и такой механизм усиления ударной волны. Реально, по всей видимости, происходит более сложный процесс, например, такой, как кавитационное усиление волны, чем та модель, которую предлагают авторы эксперимента.

*Может ли возникнуть явление кавитации в литосфере?* Мы показали, что в двухфазной среде, точнее, в жидкости с пузырями, содержащими пар или газ, возможна генерация и усиление ударной волны. Можно ли соотнести сказанное выше к той части литосферы, где формируются очаги глубокофокусных землетрясений? Попробуем ответить на этот вопрос. Очевидно, что гидродинамической кавитации в литосфере возникнуть не может, так как причина этого явления состоит в наличии в системе быстрого потока жидкости, движущегося со скоростью  $v$  и создающего противодействие  $p$  равное:  $p \gg \rho v^2/2$ . Этот параметр в литосфере ничтожно мал и на нем кавитации астеносферы не получишь. Напомним, что основным условием возникновения кавитации является возможность возникновения в системе противодействия. Как отмечалось, на глубинах порядка 700 км литостатическое давление достигает 240 кбар, а температура, порядка 2800 К. Принято считать, что вещество при таких  $pT$ -условиях находится в состоянии частичного плавления. При этом в пузыре возникает газокINETическое давление  $p = nkT$ . Подставляя в эту формулу величины  $p$ ,  $k$  и  $T$ , получим необходимую величину плотности и молекулярного веса газа, т.к.  $p = r/mn$ , где  $m$  масса протона ( $m = 1.6 \cdot 10^{-24}$  г), а  $n$  молекулярный (атомный) вес. Легко показать, что газокINETическое давление, близкое по порядку величины с литостатическим, может создать газ, обладающий атомным весом  $m = 1$ . Иначе, только наличие свободного водорода в веществе мантии может быть причиной возникновения противодействия, сравнимого по порядку величины с литостатическим. В такой системе могли бы образоваться пузыри, наполненные водородом и окруженные частично расплавленным веществом мантии. В этом случае, их рост и последующее схлопывание, связанное с генерацией акустических волн, могли бы быть причиной процессов, постулированных в нашей модели. Возникает вопрос, может ли находиться водород в мантии, причем, в необходимом количестве? Имеется ли какая-либо информация о том, что водород действительно был обнаружен? К чему может привести его наличие в веществе Земли? В каком виде он может присутствовать? Ответы на эти вопросы можно найти в 5-ой главе этой книги.

### VIII. 2. Ударно-волновая модель очага землетрясения.

*Образование ударной волны. Модель №1.* Может ли возникнуть УВ в твердой оболочке Земли, если сейсмический фон стационарен и нет внешних взрывных возмущений? В работах (Кузнецов, 1992; 2001-а; 2001-б) идея возникновения УВ в литосфере Земли обосновывалась тем, что при нагрузке в твердом упругом и прочном геологическом теле возникают трещины, которые, при раскрытии, генерируют звуковые импульсы. Эти импульсы, распространяясь по среде и достигая готовой к раскрытию новой микротрещины, стимулируют ее раскрытие и генерацию еще одного импульса (Си, Либовиц, 1975; Кузнецов, 2001-а) и т.п. Если в среде микротрещин много, то первый импульс одновременно “запускает” раскрытие других трещин и возникает очень много импульсов, интенсивности которых складываются. Таким образом, в среде, в которой могут образоваться микротрещины, определенным образом ориентированные, возможно осуществление режима “сверхизлучения”, впервые предсказанного для оптики Р. Дикке (Dicke, 1954) еще до открытия лазеров, и практически реализованного уже после их широкого распространения. Если предположить, что в напряженной упругой среде возможен режим акустического сверхизлучения, т.е. фактически стимулированного образования трещин, то звуковые импульсы от синхронно образующихся трещин, когерентно складываясь, могут образовать уединенную акустическую волну, которая, в принципе, может превратиться в волну ударную.

Постулированный нами механизм землетрясения, по сути, очень близок к т.н. режиму лавинного образования трещин. Он отличается от общепринятой его трактовки тем, что в результате лавинного образования трещин, вместо одной большой трещины (по Рейду), в которую объединяются много - много мелких, эти же трещины “объединяют”

свои звуковые импульсы (звуковые, сейсмические волны), формируя при этом отдельную волну (Заславский, Сагдеев, 1988). Такая волна, распространяясь по геологическому телу, может из волны акустической превратится в волну ударную. При этом вместо привычного в физике землетрясения разрыва смещений будет происходить перемещение разрыва характеристик среды на фронте ударной волны, возникает, в терминах Аки и Ричардса (1983), - разрывной источник. Рассеяние УВ на акустических неоднородностях очага землетрясения вызывает генерацию объемных волн, и, таким образом, в ударно-волновой модели реализуется объемный, в терминах Аки и Ричардса (1983), источник.

Принципиальным моментом механизма взаимодействия между трещинами является то, насколько эффективно рассеиваются сейсмические волны на дилатоне (бризере) с генерацией микротрещины и раскрытием трещины. Приведем несколько очевидных соображений, касающихся особенностей рассеяния волны на микротрещине (Аки, Ричардс, 1983), которые следует использовать в дальнейшем:

- Рассеянные волны образуются в результате взаимодействия между первичными волнами и неоднородностями среды – трещинами и микротрещинами.
- Р-волна в направлении своего распространения не создает поля рассеянных S-волн дальней зоны.
- В направлении распространения S-волны рассеянные Р-волны не излучаются.
- Мощность, уносимая рассеянными волнами, определяется тремя основными параметрами: линейным размером объема неоднородной области, характерным размером неоднородности (размером трещины или микротрещины) и длиной сейсмической волны.
- Рассеяние становится пренебрежимо малым, когда размер неоднородности оказывается много меньше длины волны.

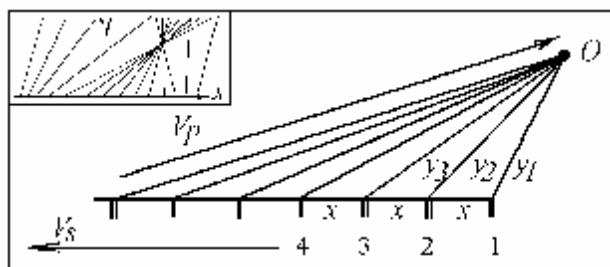


Рис. 8-8. Когерентное сложение Р-волн (в точке О) от раскрывающихся трещин (1, 2, 3, 4 – широкие вертикальные полосы, тонкие полосы - микротрещины) при распространении S-волны.

Иллюстрируем сказанное рисунком (рис. 8-8). Предположим, что в некотором объеме напряженной горной породы образовалась структура параллельных друг другу трещин и микротрещин. Раскрытие одной из микротрещин, сопровождается излучением S-волны. Эта волна, рассеиваясь на трещине, переизлучает Р-волну, распространяющуюся в направлении ориентирования трещин, и S-волну, распространяющуюся поперек луча Р-волны. Рассеиваясь на микротрещине, S-волна приведет к её раскрытию, и каскад явлений повторится. В результате, в этом объеме образуется некоторое количество Р-волн, распространяющихся вдоль направления трещин со скоростью  $V_P$  и S-волн, распространяющихся поперек этого направления со скоростью  $V_S$ . Предположим, что расстояние между соседними трещинами (по лучу S-волн) равно  $x$ . Тогда, если выполняется условие:  $t_1 + t_2 = t_0 + t_3$ , где  $t_1 = y_1/V_P$  – время распространения Р-волны от раскрывшейся трещины 1;  $t_2 = x_1/V_S$  – время распространения S-волны от трещины 1 до микротрещины 2;  $t_0$  – время раскрытия трещины;  $t_3 = y_2/V_P$  – время распространения Р-волны от трещины 2: *Р-волны пересекаются в одной точке*. Полагая:  $y_2 - y_1 = \Delta y$ , при



выполнении условия:  $\Delta y / V_P = -t_0 + x / V_S$ . Оценим величину  $x$ , для чего примем:  $\Delta y = x$ ,  $V_P = 5$  км/с,  $V_S = 3$  км/с,  $t_0 = 10^{-7}$  с, тогда величина  $x \approx 700$  мкм. (Что вполне реально). Таким образом, эта оценка показывает, что пересечение Р-волн от раскрывающихся микротрещин, расположенных на расстоянии друг от друга порядка 700 мкм, вполне возможно. В такой среде возможно явление акустического сверхизлучения.

Известно, что ударные волны могут возникать не только при разрывных начальных граничных условиях, но и в областях, где движение среды в начале не сопровождается никакими разрывами. Такие случаи «самопроизвольного» зарождения ударных волн всегда связаны с явлением *пересечения одноименных характеристик*. Простейший случай явления пересечения, это образование т.н. центрированной волны, когда несколько простых волн, при их одновременном распространении, пересекаются в одной точке (О) – вершине волны (рис. 8-8). При этом возникает волна сжатия, в вершине которой плотность вещества среды и давление в волне возрастают. Такая волна может стать ударной.

Случай, когда все сходящиеся характеристики пересекаются в одной единственной точке – предельный. Более вероятна ситуация, при которой появляется целая область пересечений, в которой находится некая точка, называемая точкой возврата. Именно этой точке приписывается возникновение ударной волны. Считается, что в точке возврата появляется произвольный разрыв, при распаде которого, собственно, и возникает ударная волна. Величина начального разрыва может быть весьма малой:  $e = (p_2 - p_1)/p$ , где  $e$  - малый параметр. Разлагая в ряд формулы, характеризующие ударную волну (законы сохранения и адиабату Гюгонио), по параметру  $e$  и отбрасывая члены с  $e^3$ , легко показать, что  $p_1 \approx p_2$ ,  $r_1 \approx r_2$  и т.д. Оценим величину  $e(r)$  для случая возникновения трещин в напряженной среде. Предположим, что в  $\text{см}^3$  среды плотностью  $r_1$  образовалось  $n$  трещин, каждая длиной  $l = 100$  мкм и «шириной» 10 мкм. Расстояние между трещинами  $\approx 2l$ . Объем одной трещины  $\Delta V \approx 10^{-8}$   $\text{см}^3$ . Увеличение объема за счет одновременного возникновения  $n$  трещин  $\Delta V n \approx 10^{-3}$   $\text{см}^3$ . Масса вещества среды, в которой образовалось  $n$  трещин, не изменилась, а объем, занимаемый этой массой, уменьшился на  $10^{-3}$ . Отсюда:  $(r_1 - r_2) / r_1 \approx 10^{-3}$ , ( $e \approx 10^{-3}$ ).

На рис. 8-8 изображена ситуация, в которой происходит пересечение волн от раскрывающихся трещин. Одновременный приход волн в одну общую точку (О) может привести к возникновению новой высокочастотной волны. Эта волна, по определению, не может распространяться на расстояние, большее 1 см. Как отмечалось выше, расстояние в 1 см определяет ширину фронта УВ ( $d$ ). Возможно, аналогичная ситуация, когда волны пересекаются, может возникнуть и с «видеоимпульсами» сверхизлучения, если они могут возникнуть одновременно и достаточно близко друг к другу, чтобы эффект пересечения состоялся. В этом случае дальное действие системы трещин будет значительно больше, чем в случае взаимодействия отдельных трещин. Синфазное сложение видеоимпульсов наиболее вероятно, если они проявляют свойства солитонов (Заславский, Сагдеев, 1988). В случае такого сложения высокая частота (10 МГц) определяет ширину фронта УВ. Однако в этом случае условие:  $t \sim 1/N$  может не выполняться, и сложение видеоимпульсов уже нельзя рассматривать как сверхизлучение.

Аддитивное сложение звуковых импульсов в ударной волне определяет ее энергию:

$$I = N \times (s^2/E) l^3, \quad (8-10)$$

здесь  $N$  - число трещин, принявших участие в формировании УВ. После генерации УВ, трещины, образовавшиеся в геологическом теле, «залечиваются» в течение некоторого времени, и затем система вновь готова к генерации ударной волны.

Если допустить, что объем активной геологической среды (объем очага землетрясения) составляет  $V = 10 \times 10 \times 100$   $\text{км}^3$ , то  $N = 10^{24}$ , и энергия УВ:  $I = 10^{24}$  эрг. Плотность энергии  $I/V = 10^5$  эрг/ $\text{см}^3$  - примерно в 10 000 раз меньше, чем энергия,

запасенная в таком же объеме тротила. Эта энергия эквивалентна нагреву одного  $\text{см}^3$  горной породы примерно на  $0,01^\circ \text{C}$  и т.п. Соотнесем полученную нами оценку с плотностью энергии очага, принятой в сейсмологии. Например, согласно (Касахара, 1985), для землетрясения с  $M = 8.6$ , плотность энергии  $E/V = 1000 \text{ эрг/см}^3$ , что в 100 раз меньше, чем получилось у нас. Этот факт может говорить, например, о том, что достаточно, чтобы в процессе генерации приняли участие только 1 % трещин из всех имеющихся и т.п.

Как известно, энергия УВ в значительной степени сосредоточена в ее фронте. Примем толщину фронта равной 1 см, тогда объем фронта УВ:  $V^* = 100\text{км} \times 10\text{км} \times 1\text{см} = 10^{13} \text{ см}^3$ . Удельная энергия на фронте:  $I^* = 10^{11} \text{ эрг/см}^3$  или, для нормальной плотности горной породы  $\rho = 3 \text{ г/см}^3$ ,  $I^* = 3 \text{ кДж/г}$ . Давление на фронте УВ  $\sim 10^{11} \text{ дин/см}^2$ . Естественно, это завышенные оценки, однако, удельная энергия и давление на фронте такого уровня могут привести к сильному сжатию горной породы в ударной волне и её разрушению в волне разгрузки.

Принято считать, что характерное время землетрясения (Касахара, 1985) определяется размером тела ( $L$ ) и скоростью сейсмических волн ( $V_p$ ). Если, к примеру, принять:  $L = 14 \text{ км}$ , а  $V_p = 7 \text{ км/с}$ , то характерное время  $t = 2 \text{ с}$ . Отсюда следует, что чем сильнее землетрясение, тем длиннее “импульс” главного удара. Аналогичным образом можно оценить  $t$  в нашей модели. Однако для этого сначала необходимо выяснить, с какой скоростью распространяется постулированная нами УВ. По-видимому, можно считать, что ударная волна, вызывающая землетрясение, даже катастрофическое, «не самая сильная», по классификации Зельдовича и Райзера (1966). Такая волна распространяется в твердом теле с «акустической» скоростью  $V_o = (V_p^2 - 4V_s^2/3)^{1/2}$ , что для:  $V_p = 7-8 \text{ км/с}$  и  $V_s = 4-4.5 \text{ км/с}$  дает значение скорости УВ  $V_o$  примерно 5-6 км/с. Характерное время «импульса» землетрясения (по данным наблюдений) порядка 6-8 с.

Другая ситуация должна была бы наблюдаться, если в землетрясении реализовался бы режим сверхизлучения. Здесь (Dicke, 1954) длительность импульса  $t \sim 1/N$ , откуда следует, чем больше магнитуда (энергия) землетрясения, тем короче  $t$ . (Автоматически это приводит к тому, что мощность землетрясения  $P \sim I/t$ , оказывается  $\sim N^2$ ). Если это время:  $t < t_n$ , где  $t_n$  - характерное время “накачки” (по аналогии с оптикой) образца горной породы упругой энергией, то реализуется режим сверхизлучения. Если имеет место обратное неравенство:  $t > t_n$ , то происходит сверхлюминесценция (и УВ не образуется). В случае примерного равенства:  $t \approx t_n$ , УВ генерируется в виде отдельных коротких импульсов. (Заметим, что практическая сейсмология «располагает» полным набором этих вариантов). Величину  $t_n$  можно оценить, привлекая кинетическую теорию прочности (Регель, Слуцкер, 1973).

Наша модель построена на взаимодействии трещин между собой по принципу: “трещина – волна - трещина”. В качестве экспериментального подтверждения такого взаимодействия мы используем тот факт, что в ряде лабораторных экспериментов, как отмечалось выше, обнаружен эффект внезапного, внешне ничем не инициированного, спонтанного роста акустической эмиссии (АЭ) в образцах горных пород при постоянной нагрузке (Журков и др., 1980; Ishido, Nishizawa, 1984). Более того, в этих экспериментах обнаружено, что гипоцентры АЭ в образце с течением времени группируются как во времени, так и в пространстве - объединяясь в кластеры (“пачки” импульсов) в некоторых областях образца (Журков и др., 1980; Lei et al., 1992; Jouniaux et al., 2001). Эти результаты можно считать экспериментальным подтверждением акустического сверхизлучения. По-видимому, мы можем полагать, что обнаруженные в лабораторных экспериментах эффекты возникновения кластеров (сверхизлучения - в нашей интерпретации), могут “проявиться” и в горных породах. Таким образом, можно считать, что идея сверхизлучения (и, как следствие ее, - генерация УВ) лабораторными экспериментами подтверждена.

*Формирование ударной волны. Модель № 2.* Теоретически проблема образования УВ, как результат кумуляции многих импульсов, рассмотрена в книге Зельдовича и Райзера (1966). Обозначим волновую переменную  $j(x, t) = F(x - vt)$  через некоторую функцию аргумента  $(x - vt)$ , тогда условие постоянства  $\varphi$  при постоянстве аргумента можно записать в дифференциальной форме:

$$dj = (\partial j / \partial x) dx + (\partial j / \partial t) dt = 0. \quad (8-11)$$

При  $dx/dt = v$  получается волновое уравнение, играющее фундаментальную роль в теории волновых процессов:

$$\partial j / \partial t + v(\partial j / \partial x) = 0. \quad (8-12)$$

Одним из решений этого уравнения является бегущая плоская гармоническая волна:

$$j(x, t) = A \sin(\omega t - kx - z_0). \quad (8-13)$$

Здесь,  $A$  - амплитуда,  $\omega$  - частота,  $k$  - волновой вектор,  $z_0$  - фаза.

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

$$\partial j / \partial t + v_0(\partial j / \partial x) = -e j(\partial j / \partial x) + h(\partial^2 j / \partial x^2) - b(\partial^3 j / \partial x^3), \quad (8-14)$$

где  $e$ ,  $h$ ,  $b$  - константы, отражающие влияние, соответственно, нелинейности, диссипации и дисперсии. Относительно УВ возможны два решения: стационарная ударная волна описывается уравнением Бюргерса ( $b = 0$ ) и УВ в виде отдельного импульса (солитона), уравнением Кортевега-де Фриза ( $h = 0$ ). Нас, в дальнейшем, будет интересовать второе решение:

$$j = A \operatorname{sech}^2[(x - vt)/\Lambda], \quad (8-15)$$

где  $\Lambda = (12b/eA)^{1/2}$ ,  $v = v_0 + eA/3$ ,  $A$  - амплитуда. Характерная протяженность, "длительность" фронта  $L$ , УВ (солитона) тем меньше, чем больше  $A$  (условие сверхизлучения). С увеличением амплитуды  $A$ , УВ - убыстряется.

Известно явление укручения фронта УВ за счет того, что материальные частицы, находящиеся в пучности ударной волны (где плотность среды выше), движутся быстрее, чем соседние частицы вне пучности. Волновой профиль укручается настолько, что может привести к опрокидыванию УВ. Стабилизирующим фактором, предохраняющим волну от опрокидывания, является дисперсионный механизм, т.е. наличие нелинейной зависимости частоты фурье-гармоник от волнового числа  $k$ :

$$\omega_k = kc - bk^3,$$

где  $c$  и  $b$  - константы, а  $c$  - имеет смысл скорости звука. Нелинейный член  $bk^3$  ограничивает укручение УВ. Характерная ширина фронта УВ (солитона) имеет порядок:

$$\Delta x \sim (b/a)^{1/2},$$

где  $a$  имеет физический смысл увеличения скорости распространения УВ, по отношению к местной скорости звука (Заславский, Сагдеев, 1988).

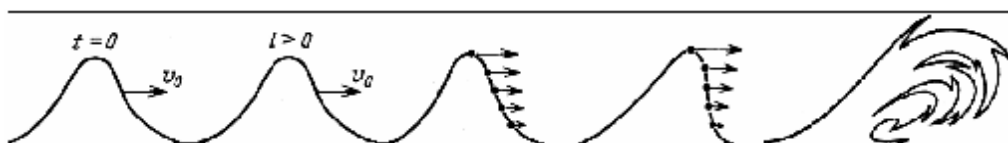


Рис. 8-9. Модель укручения и «опрокидывания» солитона (Заславский, Сагдеев, 1988).

*Акустический «портрет» землетрясения.* Акустически активную среду, в которой распространяется акустическое излучение, вызванное самой средой и приводящее, в конечном счете, к образованию ударной волны, можно рассматривать как «мутную» среду. Аналогичная ситуация возникает при излучении электромагнитных волн в мутную среду. Эта ситуация называется в физике как взаимное облучение. Принято считать, что

взаимное облучение среды светом имеет когерентную и некогерентную части. Вероятно, такой подход применим и к акустике. В этом случае когерентная часть акустического взаимного облучения может быть отнесена к кооперативным эффектам, которые приводят к качественному изменению характера облучения. В рассматриваемой нами ситуации, - к возникновению лавинного процесса и образованию ударной волны. Некогерентная часть взаимного акустического облучения характеризуется многократным рассеянием и проявляется как акустический фон. Очевидно, что доли когерентного и некогерентного излучения могут изменяться в процессе эволюции акустически активной системы. Смена режима некогерентного излучения на преимущественно режим когерентный, - должна приводить к уменьшению интенсивности излучения, принимаемого за - фоновое. Такой подход находит объяснение известному в сейсмологии эффекту «молчания» среды перед сильным землетрясением. Становится понятным и то, что, чем большие объемы напряженной геологической среды примут участие в когерентном процессе, иначе, чем мощнее будет землетрясение, тем процесс молчания должен быть длиннее.

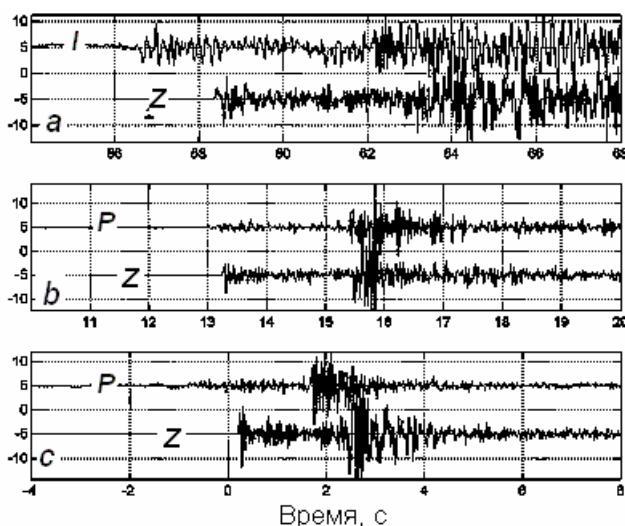


Рис. 8-10. Инфразвуковые сигналы (верхние кривые) и сейсмограммы (вертикальный канал Z, с/с "Акташ") землетрясений 5 ноября (a,b) и 8 ноября (c). Для наглядности кривые смещены по вертикали.

Приведем результаты наблюдений инфразвука, сопровождающего афтершоки Чуйского землетрясения, полученные автором совместно с С.Ю. Хомутовым на Алтае в 2003 году (неопубликованные данные):

- обнаружено, что акустический сигнал предшествовал сейсмическому примерно на 1 секунду и эта задержка не зависела от гипоцентрального расстояния. Вполне возможно, что обнаруженный нами акустический сигнал, предшествующий землетрясению, и есть явление подземного гула, который был иногда слышен перед толчком;
- линейная аппроксимация зависимости:  $L = k dt$  по акустическим данным, дает величину коэффициента  $k = 7.1$  км/с. Для величины  $L$  алтайских землетрясений используется соотношение  $L = 8.2 dt$ , где  $L = [V_P V_S / (V_P - V_S)] dt$ ;
- временной интервал между первым и вторым вступлениями на звуке всегда больше аналогичного интервала в сейсмике (рис. 8-10). На этом рисунке приведены акустические и сейсмические отображения землетрясений. Видно, что запись сигналов от землетрясения в инфразвуке всегда значительно больше зашумлена, чем сейсмограмма. Кроме этого, в сигнале принятым микрофоном не наблюдается резкого, крутого переднего фронта, как это обычно видно на сейсмограммах. Эти факты свидетельствуют в пользу того, что "портрет" землетрясения в инфразвуке заметно отличается от привычной сейсмограммы.

*Особенности распространения ударной волны.* Рассмотрим наиболее важные для нашей модели моменты, связанные с характером распространения ударных волн в твердом теле.

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

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

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

$$w(x_o, h_o) \approx - (2\pi m)^{-1/2} \int d\xi / (\xi_o - \xi)^{1/2} \int p(x, h) dh / (h_o - h)^{1/2}, \quad (8-16)$$

$w(x_o, h_o)$  – подвижка трещины в координатах  $x, h$ ;  $m$  – модуль сдвига;  $x(h)$  – траектория движения кончика трещины;  $p(x, h)$  – величина сброшенного напряжения.

Интегрирование этого уравнения приводит к формуле для подвижки:

$$w(x_o, h_o) \approx - b p_o t / m$$

$b = (m/r)^{1/2}$  – скорость сдвиговых волн ( $V_S$ ),  $t$  – текущее время процесса.

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

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

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

где  $u$ , как и раньше, медленная массовая скорость течения среды за фронтом ударной волны,  $r c$  – акустическое сопротивление среды. Если принять:  $u = 1$  м/с, а  $r c = 3 \text{ г/см}^3 \times 5 \text{ км/с}$ , то окажется, что величина  $\Delta p$  порядка 100 бар. Совпадение этих оценок не случайно и, по-видимому, говорит в пользу того, что мы рассматриваем одно и то же физическое явление с точки зрения различных моделей. Действительно, и в модели землетрясения, основанной на теории упругости, и в нашей ударно-волновой модели, конечным результатом действия механизма землетрясения является возникновение на поверхности Земли подвижек и течений сплошной среды, приводящих к образованию разрывов, разломов и т.п., т.е., собственно, к «трясению земли». Близость оценок величин скоростей slip в модели Рейда и массовой скорости, следующей из ударно-волновой модели, может говорить о том, что наша модель, адекватна физическому механизму землетрясения. Ранее мы отмечали, что ударная волна вызывает возникновение разрыва поверхности. Конечно, это совсем не тот разрыв, который, следуя модели Рейда, распространяется с глубины 700 км до поверхности Земли. Это локальный разрыв, время образования которого порядка длительности фронта УВ, а, в пределе, – длительности импульса УВ.

Заметим, что Аки и Ричардс, обсуждая проблему землетрясения как сейсмического источника, не замыкаются только на образовании трещины, которая, по их мнению, определяет одну из характеристик источника – разрыв. Они одновременно обсуждают и объемный тип источника, который связан с возникновением деформации и не имеет прямой связи с разрывом. Этот подход созвучен ударно-волновой модели землетрясения, в которой ударная волна, проходя по очагу от гипоцентра до эпицентра, рассеивается

(расщепляется) на неоднородностях среды, генерирует объемные волны, а, выходя на поверхность Земли, приводит к разрыву и разуплотнению поверхности.

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

Из физики ударных волн, распространяющихся в твердых телах при движении ударной волны со скоростью  $c_0 < V_P$ , 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.

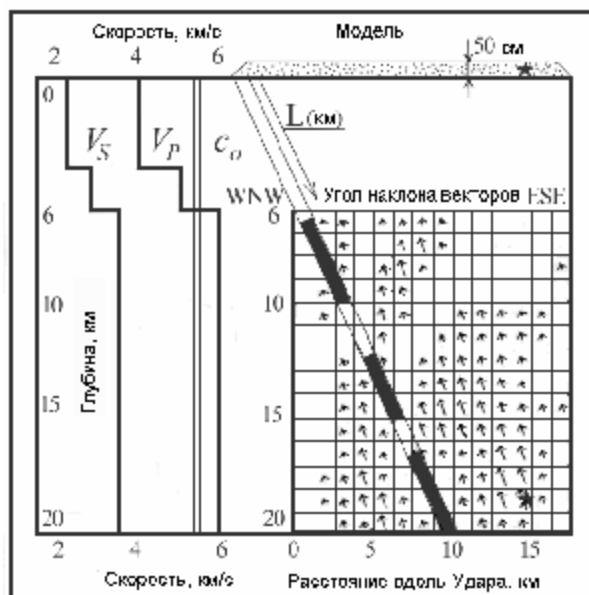


Рис. 8-11. Модель разрывов Нортриджского землетрясения (справа) (Somerville et al., 1996; Zeng, Anderson, 1996). В левой части рисунка - распределение скоростей P-, S-волн и ударной волны  $c_0$  - по глубине (Shen et al., 1996).

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

На рис. 8-11 справа, изображена модель разрывов Нортриджского землетрясения. В левой части рис. 8-11 показано одномерное распределение скоростей сейсмических P- и S- волн по глубине (Shen et al., 1996). На рис. 8-11 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  $t \approx 8$  сек. Скорость разрыва равна  $V = L/t = 2.8$  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  $\sim 60 - 70^\circ$ .

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. 8-11), 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  $c = (K/r)^{1/2}$ . 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. 8-6), проходящем через гипоцентр землетрясения, определены вектора подвижек, соответствующие интенсивности объемных волн (Somerville et al., 1996). Как следует из этой работы, все волновые векторы направлены под углом  $\approx 45^\circ$  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.

*Взаимодействие ударных волн на поверхности.* Рассмотрим волновую картину процессов формирования в недрах Земли УВ, движение её к дневной поверхности, возникновение ВР и взаимодействие волн. Воспользуемся приемом из практики изучения УВ. Изобразим рассматриваемые процессы на  $xt$ -диаграмме, где  $x$  - координата, а  $t$  - время. Обозначим  $x_0$ ,  $t_0$  - координату и время выхода УВ на свободную поверхность (см. рис. 8-7).

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

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

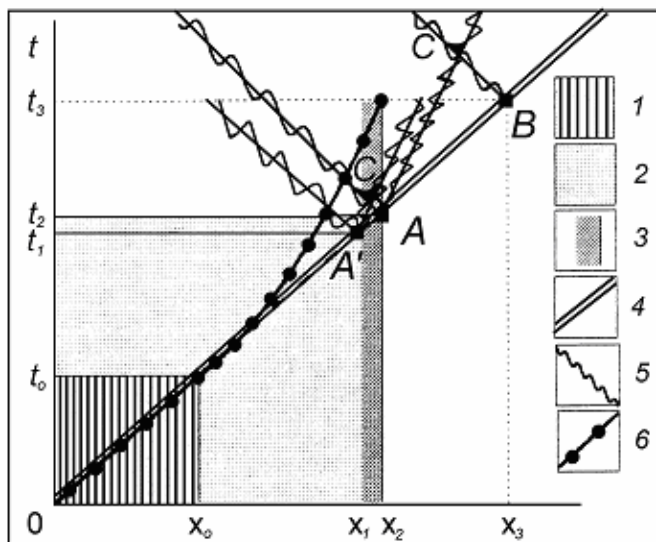


Рис. 8-12. Выход ударной волны (УВ) на свободную поверхность (в точке  $x_0$ ,  $t_0$ ). УВ выходит на свободную поверхность и образует волну разгрузки (ВР), “двигающуюся” в обратном (по отношению к УВ) направлении. Длительность импульса УВ  $\Delta t$ , за это время УВ проходит по земной поверхности расстояние  $\Delta x$ .

При выполнении этих требований в т.н. сейсмоактивной среде такого геологического тела (1 на рис. 8-12) возможно возникновение акустического стимулированного сверхизлучения и образование УВ. УВ возникает, как правило, в тот момент, и в том месте, где скорость распространения волны (6) в среде превысит местную скорость звука. В нашей модели, это, скорее всего, произойдет на границе (3)



геологического тела (2) с окружающей его средой, в которой местная скорость звука ниже, чем в теле.

В точке  $(x_0, t_0)$  УВ (4) выходит на свободную поверхность (см. рис. 8-12) и образует ВР (5), “двигающуюся” в обратном (по отношению к УВ) направлении. Длительность импульса УВ  $Dt$  конечна, за это время УВ проходит по земной поверхности расстояние  $\Delta x$ .

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

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

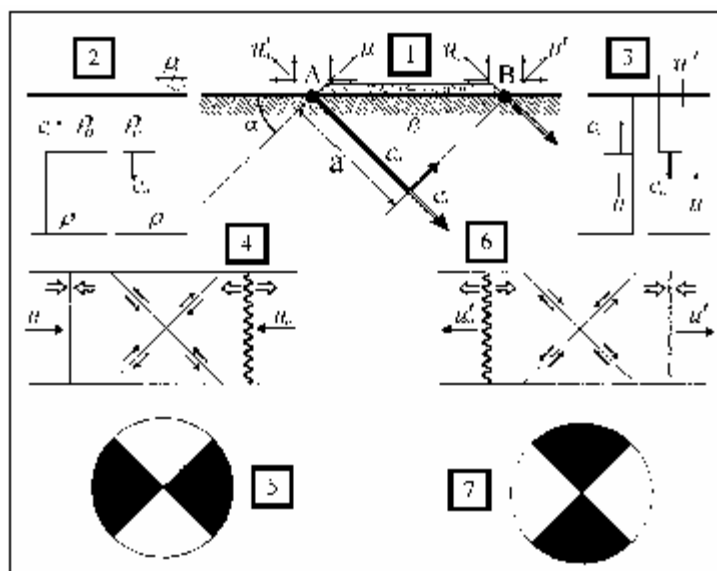


Рис. 8-13. Выход фронта ударной волны (шириной  $a$ ) на поверхность Земли под углом  $\alpha$  к линии горизонта. Пояснения в тексте.

Акцентируем внимание на процессах, сопровождающих выход не слишком сильной ударной волны на поверхность (см. рис. 8-13). Выход ударной волны под углом к линии горизонта изображен на рис. 8-13-1. Здесь фронт ударной волны, шириной  $a$ ,двигающийся со скоростью  $c_o$ , подходит под углом  $\alpha$  к земной поверхности, вещество которой обладает плотностью  $r$ . Распространение ударной волны сопровождается сравнительно медленным движением сплошной среды с массовой скоростью  $u$ . Ударная волна отражается на участке АВ и уходит вниз со скоростью  $c_o$ . При отражении возникает быстро затухающая волна разгрузки (разрежения, растяжения), движение которой сопровождается перемещением вещества со скоростью  $u_o$ . Действие на грунт силы, связанной с перемещением массы с вертикальными (вверх) компонентами этих скоростей приводят к разуплотнению, расширению грунта и подъему его относительно начального уровня на высоту порядка метра, как это, например, наблюдалось во время Чуйского (Геодаков и др., 2003) и Нортриджского землетрясений (Shen et al., 1996).

На участке АВ может возникнуть система сил, направленных друг навстречу другу соответственно тому, как направлены горизонтальные компоненты массовых скоростей:  $u - u_o$  (рис. 8-13-4), либо  $u' - u_o'$  (рис. 8-13-6).

На рис. 8-13-2 изображено распределение плотности до (слева) и после выхода нормально падающей ударной волны (справа). Видно, что после выхода ударной волны и отражения её от поверхности, вещество с плотностью  $r_1$  (меньшей  $r_o$ ) находится выше начального уровня. Аналогичная картина представлена на рис. 8-13-3, где изображены скорости в нормально падающей ударной волне со скоростью  $c_o$  и массовые скорости  $u$  и  $u' \gg 2u$  до выхода ударной волны на поверхность (слева) и после её выхода на поверхность. На рисунках 8-13-5 и 8-13-7 изображены разломные диаграммы, соответствующие ситуациям, изображенным на рисунках 8-13-4 и 8-13-6. Темные секторы диаграмм показывают области сжатия, светлые – растяжения.

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

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

Как известно, ударная волна, это волна сжатия, на очень узком фронте которой, термодинамические характеристики претерпевают разрыв. Эта волна, при прохождении через твердое тело, уплотняет его а, при расщеплении на внутренних неоднородностях тела, - приводит к генерации и излучению объемных волн. Ударная волна отличается от обычных акустических (сейсмических) волн ещё и тем, что вслед за фронтом УВ происходит движение (течение) вещества твердого тела, причем массовая скорость этого течения значительно меньше скорости УВ, и, чем интенсивнее ударная волна, тем выше массовая скорость. При выходе ударной волны на поверхность твердого тела образуется волна разрежения,двигающаяся в сторону, обратную движению УВ. Образование волн, идущих в обе стороны от «свободной» поверхности принято называть *распадом разрыва*. Разрыв в начальных условиях распространения УВ действительно исчезает, так как

образуются два других разрыва. В книге (Забабахин, 1997) рассмотрены четыре возможных типа распада разрыва, из которых нас будет интересовать лишь четвертый. Все типы распада разрыва изображены на рис. 8-14 (сверху вниз):

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

- Образование ударной волны и волны разрежения. Это происходит при выходе УВ из более жесткого вещества в более мягкое. Массовая скорость частиц более жесткого вещества удваивается и в нем начинает распространяться волна разрежения.

- Образование двух волн разрежения. Они возникают в том случае, когда, строго говоря, разрыва в начальных условиях нет, а волна разрежения приходит на границу двух сред, до этого сжатых и покоящихся. На Земле такая ситуация может возникнуть при выходе ударной волны на поверхность и образовании волны разрежения. Волна разрежения приходит на границу двух сред, например, грунта, лежащего на гранитном основании, либо рыхлого грунта на границе вечной мерзлоты и т.п. Волна разрежения является фактически волной плавного изменения состояния и не носит характера ударной волны, т.к. фронт такой волны имеет конечную ширину.

- Образование двух волн разрежения и разрыва сплошного вещества возможно при слабом начальном сжатии. При интенсивной волне разрежения элементы вещества начинают двигаться друг от друга в противоположных направлениях, т.е. происходит откол, - разрушение ранее целого и компактного вещества.

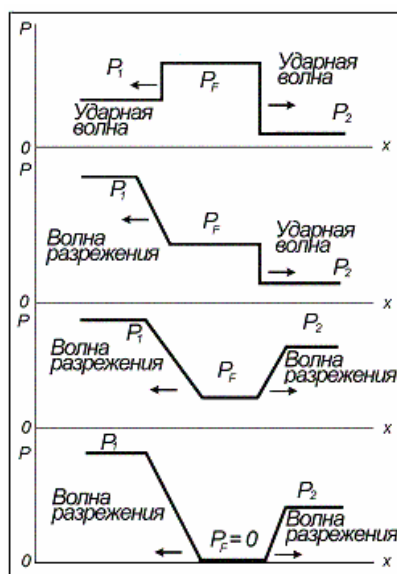


Рис. 8-14. Возможные типы распада разрыва (Забабахин, 1997). Давления  $P_1$  и  $P_2$  – на фронтах УВ и ВР, давление  $P_F$  – в теле, после прохождения по нему этих волн. Стрелки – направления распространения волн.

### VIII. 3. Особенности сильных движений при землетрясении.

В течение последних 10 – 15 лет в сейсмически опасных регионах США и Японии созданы измерительные и информационные сети, позволяющие фиксировать комплекс явлений на земной поверхности в момент землетрясения. Например, землетрясение, в Нортридже, вблизи Лос Анжелеса было зарегистрировано примерно 150 приемниками GPS (Global Positioning System) с точностью перемещений грунта порядка 1 мм. Кроме этого, использовались геодезические приборы, сейсмические датчики ускорений и т.п. Объем информации по сильным движениям Нортриджского землетрясения так велик, что выбрать какую-либо конкретную деталь, и на ней сконцентрировать внимание, просто

невозможно. Надо сказать, что данных по землетрясению в Кобе (Япония) 1995 г. не меньше, чем в Нортридже.

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

$$w = [gk + (ak^3)/r]^{1/2},$$

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

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

*Особенности сильных движений землетрясений.* Физику землетрясений нельзя понять, если базироваться только на теоретических моделях, натуральных и лабораторных экспериментах. Решающую роль должны сыграть непосредственные наблюдения за сильными землетрясениями, выявление их общности и различий, пространственных и временных особенностей и закономерностей макросеймики. Выясним, может ли оказаться полезным использование ударно-волновой модели при обсуждении особенностей явлений в грунте, сопровождавших сильные землетрясения.

*Муйское землетрясение ( $M = 7.6 - 7.9$ , 57/06/27).* В районе северного Байкала в 1957 г. не было разветвленной сейсмологической сети, тем не менее, тщательное изучение

геологической структуры этого землетрясения позволяет отнести его к достаточно хорошо изученным. Дело в том, что этот район подробно изучен с помощью методов глубинного сейсмического зондирования - ГСЗ (Крылов и др., 1993). Методы ГСЗ позволяют выявить объемные, трехмерные, глубинные неоднородности литосферы. Одним из наиболее интересных для нас результатов использования этого метода, было детальное изучение пространственных неоднородностей распределения скоростей продольных волн в очаговой области катастрофического Муйского землетрясения, произошедшего 27 июня 1957 г., его магнитуда оценивается в 7.6-7.9, интенсивность - 10-12 баллов, энергетический класс - 17, глубина очага около 15 км.

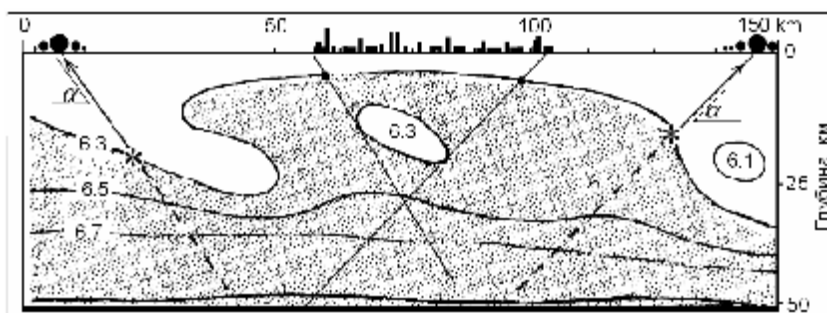


Рис. 8-15. Сейсмический разрез земной коры в Муйском районе Байкальской рифтовой зоны по данным скоростей Р-волн (Крылов и др., 1993).

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

В районе эпицентра Муйского землетрясения на территории около 60 тыс. кв. км методом ГСЗ проведены детальные площадные и профильные наблюдения, получено около 1600 зондирований. Выявлена область повышенной скорости, вытянутая в северо-восточном направлении и распространяющаяся в нижнюю часть земной коры вплоть до ее подошвы. Область высокой скорости включает в себя зону сейсмического затишья и два района активизации. Резкие краевые неоднородности области совпадают с гипоцентрами двух сильных землетрясений. Авторы считают эту область глубинным накопителем упругой энергии. В этом случае слагающие ее горные породы должны обладать повышенной прочностью и энергоемкостью. Вероятными местами разрядки накопившейся энергии могут служить ослабленные участки на контактах высокопрочного объема с вмещающей его средой. Авторы при анализе записей колебаний сдвиговых волн не обнаружили эффектов их расщепления на SV- и SH-составляющие, что позволяет считать среду изотропной. Надо сказать, что отображение крупных черт глубинного строения по Р- и S-волнам близки. Рассматриваемое тело, несмотря на существование в нем локальных внутренних неоднородностей, в целом характеризуется относительным увеличением плотности и обоих упругих модулей. В его пределах модуль сдвига увеличен на 15-20 % от среднего значения в изученной области. Как следует из рисунка 8-15, в рассматриваемом нами сейсмически активном теле (области) скорость Р-волн, от слоя М в

направлении к земной поверхности, вплоть до границы тела с вмещающей средой, постепенного уменьшается, а на его границе - убывает довольно резко.

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

*Нортриджское землетрясение ( $M = 6.7$  94/01/17).* Любая теория явления, а так же его физическая модель проверяются опытом, т.е. экспериментом или качественными наблюдениями. В этом плане наблюдения за Нортриджским землетрясением 1994 г в своем роде - уникальны. Воспользуемся данными наблюдений, полученными американскими сейсмологами в момент прохождения этого землетрясения и некоторое время спустя после него. Используемые нами данные в значительной массе собраны в специальном выпуске BSSA (Northridge, 1994)

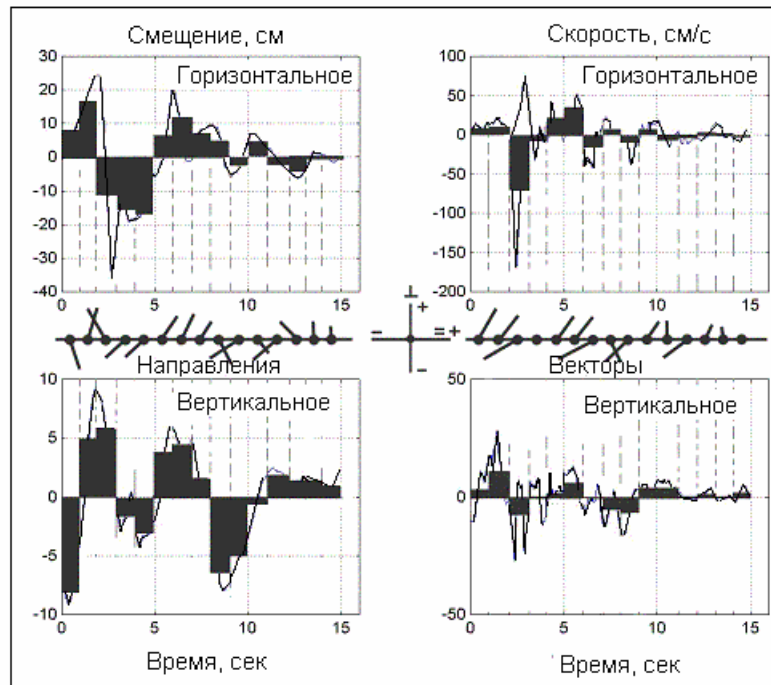


Рис. 8-16. Временная зависимость продольных компонент (transverse, vertical) скоростей и смещений, записанных на станции Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996).

Нортриджское землетрясение, одно из наиболее изученных, - было выбрано для проверки нашей модели. Оно произошло вблизи Лос Анжелеса, в сейсмоопасном и густонаселенном районе, где сосредоточено наибольшее количество сейсмической измерительной аппаратуры. Особую ценность, на наш взгляд, представляют собой

результаты измерения трех компонент сильных движений на специально оборудованном полигоне Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996), а так же результаты исследования величины и направления подвижек в очаге землетрясения.

Нортриджское землетрясение (6.7 баллов, энергия  $\sim 10^{22}$  эрг) произошло 17 января 1994 г., координаты гипоцентра:  $32.2^\circ \text{ N}$ ;  $118.5^\circ \text{ W}$ ; глубина 16.6 км. Сейсмический момент  $1.2 \cdot 10^{26}$  дин см. Ориентация strike:  $131^\circ$ ; dip:  $50^\circ$ ; rake:  $115^\circ$ . Размеры разрывов  $20 \times 20$  км. Скорость разрывов 2.8 км/с. Сброс давления  $\Delta S = 100$  бар (Anderson, Yu, 1996). Рисунок 8-16 показывает величины вертикальных и горизонтальных (long) амплитуд и скоростей перемещений грунта, измеренных на Van Norman Complex (Bardet, Davis, 1996). Черные прямоугольники на рис. 8-16 соответствуют усредненным за 1 секунду величинам направлений смещений и векторов скоростей. Анализируя амплитуды и скорости перемещений грунта, приведенные на рис. 8-16, можно выделить некоторую квазипериодичность процесса  $T \approx 2-3$  сек. Видно, что амплитуда горизонтальных перемещений и скоростей больше, чем вертикальных, примерно в 2 – 3 раза, при этом амплитуда вертикальных колебаний порядка  $h \approx 10 - 20$  см. Максимальная скорость горизонтальных движений грунта достигает 177 см/с, средняя скорость вертикальных, - 10 – 20 см/с. Максимальная амплитуда горизонтальных движений - до 40 см. Условная длина волны вертикальных колебаний  $\lambda \approx$  не более 50 см. Отношение  $h/l$  не менее  $1/5$ , что говорит о неустойчивости волн (Условие устойчивости:  $h/l < 1/2\pi$ ).

*Чуйское землетрясение на Горном Алтае ( $M = 7.5$ , 03/09/27).* На юге Горного Алтая, на территории Кош-Агачского района, 27 сентября 2003 г. в 11 час. 33 мин. по Гринвичу произошло сильное землетрясение с магнитудой 7.5. Землетрясение сопровождалось афтершоками, наиболее сильные из них два: первый - 27.09.03 в 18 час. 52 мин. по Гринвичу с магнитудой  $M = 6.4$  и второй - 1.10.03 в 1ч. 03 мин.28 сек. по Гринвичу с магнитудой 7.0. Главный удар афтершока 1 октября произошел в районе пос. Акташ (место расположения сейсмостанции), где отмечались повреждения зданий 7-ми, 8-ми бальной интенсивности.

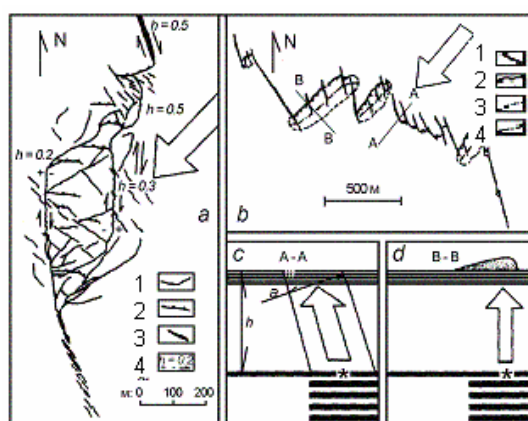


Рис. 8-17. Слева: (a) структура сейсморазрыва на водоразделе рек Чаган и Елангаш: 1 – закрытые трещины и разрывы, 2 – валы вспучивания, 3 – сейсморвы, 4 – амплитуда (м) и направления смещения. Большая стрелка – направление главного удара, параллельные стрелки – направления подвижек почвы. Справа сверху: (b) структура сейсморазрыва на водоразделе р. Талдура-Кускуннур. 1 – сейсморвы; 2 - бровки валов вспучивания; 3 – контуры валов вспучивания; 4 – оси валов вспучивания (Геодаков и др., 2003). Справа внизу: (c, d) разрезы по А-А и В-В, звездочка – гипоцентр, стрелка – направление главного удара, а - фронт УВ.

Очаг землетрясения, в ходе вспарывания земной коры, «вышел на поверхность» в виде системы первичных сейсморазрывов. Эта система прослеживается на протяжении 20 км в бассейне р. Чаган-Узун на восточном погружении Северо-Чуйского хребта (рис. 8-17). Первичный характер разрывов характеризуется их морфологией и то, что эти трещины представляют собой систему параллельных рвов, секущих различные формы рельефа. Эта система вытянута в северо-западном направлении на протяжении 20 км.

Сеймотектонические разрывы представляют собой эшелонированную систему трещин сжатия и расширения, укладываемую в линию СЗ простирания. Такая структура сеймотектонического разрыва, по мнению авторов (Геодаков и др., 2003), характеризует подвижку в очаге как сдвиг в горизонтальной плоскости. Строение зоны сейсморазрывов несколько отличается для различных участков. Так, например, на водоразделе рек Чаган и Елангаш разрыв разветвляется на две основных трещины, которые затем смыкаются, представляясь в виде трещин СЗ ориентировки (рис. 8-12-а). Наблюдается правостороннее смещение на 0.5 м. по западной ветви разрывов. По восточной ветви - смещение достигает 0.2 м. Блок, заключенный между этими рвами, опущен на 0.2-0.3 м и рассечен многочисленными диагональными трещинами. Авторы отмечают, что в зоне эпицентра Чуйского землетрясения находятся следы предыдущих землетрясений, которые, так же как современные, были следствием разрядки одного и того же очага. Чуйское землетрясение, по всей видимости, не является уникальным, - оно лишь несколько «обновило» следы прошлых, возможно, более сильных землетрясений. Этот факт однозначно демонстрирует, что очаг сильного землетрясения оказывается «привязанным» к определенной геологической структуре.

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

#### VIII. 4. Глубокофокусные землетрясения.

Каков же механизм землетрясений глубинных? Известно, что ни одна из когда-либо рассматриваемых моделей очага не способна ответить на него вразумительно...

Будем исходить из того, что высказанная нами УВ модель верна и, действительно, и разрушения на земной поверхности, и генерация объемных волн в очаге землетрясения, и причина появления афтершоков, - всё это следствия одного явления - генерации ударной волны в области очага землетрясения. В этом случае, естественно, возникает вопрос, каким образом может возникнуть УВ на глубине 700 км, где среда ведет себя скорее как жидкость, чем как кристаллическое тело? Будем иметь ввиду гениальную мысль, высказанную Ньютоном: «Природа проста и не роскошествует различными причинами вещей». Вспомним, что землетрясение, это способ сброса и перераспределения энергии тектонических напряжений. В основе этого способа положены механизмы разрыва сплошности среды путем образования трещин. Это общепринятая точка зрения. Она используется и в нашей модели.

Если в литосфере на глубине 500 - 700 км могут возникнуть разрывы сплошности, то это, скорее, будут уже не трещины, а «пузыри». По аналогии с раскрывающейся трещиной, при схлопывании пузыря также возникает звуковой импульс (кавитация, или холодное кипение). Предположим, что звуковые импульсы от схлопывающихся «пузырей» могут возникнуть одновременно и когерентно, и, складываясь, могут образовать УВ. В качестве подтверждения того, что эта идея имеет основания, приведем данные, где показано, что ударная волна усиливается при прохождении слоя кавитирующих пузырьков (Накоряков, Донцов, 2000). По-видимому, можно полагать, что раз УВ усиливается в такой среде, то она может там и возникнуть.

Проблема физики землетрясений, гипоцентры которых приходятся на глубины 300-700 км, всегда занимала сейсмологов. Разрушения, производимые этими землетрясениями, ничем не отличаются от разрушений, вызываемых землетрясениями, произошедшими на



небольших глубинах. То же самое можно сказать и о волновой картине очага. Естественно, землетрясение, произошедшее на глубине в несколько сотен километров, оказывало влияние на значительно большие площади и ощущалось на значительно больших расстояниях. Известно, что глубокие землетрясения отличаются от неглубоких тем, что у глубокофокусных землетрясений отсутствуют афтершоки. Среди сейсмологов принято считать, что основная причина глубоких землетрясений состоит в том, что на глубинах 500-660 км (Willemann, 1991) происходит фазовый переход оливин-шпинель, который и формирует сейсмическую зону и служит причиной разрыва сплошности среды. Именно этим объясняется зависимость интенсивности сейсмичности от глубины, имеющей явный максимум на глубине 580-600 км (Willemann, 1991). Напряжение  $s$  в этом случае зависит от величины энтальпии фазового перехода  $U$  и температуры окружающей среды  $T$ :

$$s = (e/A) \exp(U/nRT).$$

Соотношение между величинами  $U$  и  $T$  определяет глубину максимальной сейсмичности.

*Особенности глубокофокусных землетрясений.* Анализ глубин, на которых чаще всего происходят глубокофокусные землетрясения, проведенный большим количеством авторов (сошлемся на одну из самых последних работ, статью Горькавого и др., (1999)), показал, что они распределены по глубине далеко неравномерно. Как правило, землетрясения в основном происходят на малых глубинах, и с ростом глубины их становится всё меньше и меньше. Однако в этой зависимости наблюдается некоторая странность. Многие авторы в своих работах выделяют область заметного увеличения числа землетрясений на глубинах 550-650 км относительно их количества на меньших глубинах. Чем же характеризуется эта область мантии? Действительно, эти глубины характеризуются рядом особенностей.

Глубина 650 км была впервые выделена Кардером при анализе данных ядерных взрывов по резкому изменению скорости Р-волн (Буллен, 1978). Многочисленные последующие исследования подтвердили присутствие аналогичных изменений скоростей продольных волн на этих глубинах. В связи с этим обстоятельством, Буллен разделил зону мантии  $S$ , на две:  $S_1$  и  $S_2$  с границей между ними на глубине 650 км. Согласно РЕМ модели Земли (Жарков, 1983) на глубине 670 км плотность увеличивается на  $0.3 \text{ г/см}^3$  (от  $4 \text{ г/см}^3$  до  $4.3$ ), скорости Р- и S-волн, соответственно, от 10 до 10.9 и от 5.4 до 6.1 км/с. Величина литостатического давления на глубине 670 км составляет примерно 240 кбар. Температура вещества мантии (Жарков, 1983) увеличивается на границе 670 км от 2000 К до почти 2800 К, максимально приближаясь в этой области к кривой плавления. Следует обратить внимание на то, что таких границ, где скорость сейсмических волн резко возрастает, в мантии две. Первая находится на глубине 420 км, вторая – на глубине 670. В отличие от 670 км границы, около границы 420 км, как известно, увеличения концентрации землетрясений не наблюдается. В сейсмически активных регионах можно выделить ещё две сейсмических границы, на которых происходит не увеличение скоростей сейсмических волн, а, наоборот, их понижение. Это т.н. зона Гутенберга (80 – 100 км) и зона Леман (200 км). Именно эти зоны принято считать астеносферой. Особенностей изменения концентрации землетрясений с глубиной в этих зонах не наблюдается. Объяснение физики глубокофокусных землетрясений должно найти причину их приуроченности к границе 670 и «игнорирование» других сейсмически выделенных границ в мантии. Такое объяснение, если оно, возможно, должно найти и физику появления самих сейсмических границ. Только в этом случае модель можно считать приемлемой.

*Физика глубокофокусных землетрясений.* Отметим ряд проблем, связанных с физикой глубокофокусных землетрясений. Гутенберг (1963) утверждал, что Берч связывал глубокофокусные землетрясения с гипотетическими фазовыми превращениями в мантии. Однако существуют различные доказательства, считал Гутенберг, того, что глубокие

землетрясения вызываются теми же системами напряжений и сдвиговыми процессами, что и неглубокие. Анализ первых движений в волнах, приходящих от землетрясений, показывает, что и в мелких, и в глубоких землетрясениях превалирует один и тот же механизм движения в источнике.

Надо сказать, что большинство сейсмологов считает, что в целом механизм очага глубокофокусных и землетрясений средней заглубленности аналогичен механизму более мелкофокусных (Касахара, 1985). Этот вывод базируется на том основании, что картины излучения очагом Р- и S-волн идентичны для мелкофокусных и глубокофокусных землетрясений. Принято считать, что механизм очага глубокофокусного землетрясения связан с разрушениями сдвигового типа, происходящими на большой глубине. В этом случае особо оговаривается, что разрушения не могут быть хрупкими, как это считается принятым для мелкофокусных землетрясений. При разработке физики очага глубокого землетрясения Касахара рекомендует учитывать эффекты, связанные с высокими давлениями и температурой. Эти эффекты состоят в следующем: а) предельно высокое трение, препятствующее скольжению, б) хрупко-пластический переход, в) релаксация напряжений при пластическом течении. Процессы, приводящие к возникновению землетрясений на глубине 600 км, где прочность пород оценивается в 400 кбар, должны быть связаны с механизмами пластических течений и разрушений. Фрикционное разрушение принятое как механизм очага мелкофокусных землетрясений неприменимо для - глубокофокусных. Все механизмы глубокофокусных землетрясений делятся между собой по тому, существенна ли для них сдвиговая неустойчивость или нет, а так же по тому, какой тип разрушения в них принят – хрупкое или вязкое. Как правило, при построении модели очага глубокофокусного землетрясения используются давно известные механизмы, в частности, такой как, прерывистое скольжение, основанное на дегидратации горных пород. Проще, речь идет об использовании выделения воды из породы для обеспечения необходимой для скольжения смазки. Другим возможным механизмом считается пластическое разрушение под давлением. Этот механизм основан на идее сдвигового плавления, локального увеличения температуры, скорости диссипации энергии. Считается, что сейсмологические данные не подтверждают механизм плавления в области очага землетрясения. Как некоторую модификацию этого механизма можно рассматривать идею Моги относительно частичного плавления в очаге. Ранее рассматривалась гипотеза о возможности взрывных фазовых переходов как механизма очага. Этот механизм предполагал изменение жесткости среды, в то время как плотность и сжимаемость изменяться не должны. Всё это противоречило принятой в сейсмологии картине глубокофокусного землетрясения, так как не вписывалось в квадрантный тип излучения очагом сейсмических волн. Обсуждая различные модели очага, Касахара признает, что вопрос о механизме глубоких землетрясений остается открытым, несмотря на оживленные дискуссии среди сейсмологов. С момента выхода книги Касахары прошло около 15 лет. В ней он высказывал надежду на то, что успехи плитной тектоники подскажут механизм очага глубокофокусных землетрясений. Этого так и не произошло, и в наше время механизм глубокофокусных землетрясений остается не менее загадочным, чем ранее. Подобная ситуация обязана стимулировать разработку иных, принципиально новых гипотез.

*Оценки величины энергии глубокофокусного землетрясения.* В более ранних УВ моделях землетрясений автором использовалась идея о «квантовом» характере акустического излучения. Воспользуемся этим подходом для сравнения энергии одно «кванта» акустической энергии при схлопывании пузырька. Величина одного «кванта» акустической энергии звуковой волны, образующейся при раскрытии одной трещины принималась равной  $\sim 1$  эрг. Для ориентировочных оценок энергетики кавитирующей среды, примем эту же величину. Давление в пузыре с водородом должно быть порядка литостатического:  $p = 2.4 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>. Схлопывание пузыря уменьшает его объем на  $\Delta V$ ,

причем  $pDV \approx 1$  эрг, отсюда получаем величину  $\Delta V \approx 10^{-12}$  см<sup>3</sup>, что соответствует размеру пузыря  $\approx 1$  мкм. В пузыре такого объема содержится примерно  $10^{12}$  атомов водорода, а если учесть нашу оценку концентрации трещин и принять её равной концентрации пузырей ( $10^6$  в см<sup>3</sup>), то это будет соответствовать концентрации водорода  $n \approx 10^{18}$  см<sup>-3</sup> и концентрации акустической энергии  $10^6$  эрг см<sup>-3</sup>. Параметр H/Si (Глава V) оказывается равным  $10^{-4}$ . Это очень грубый, ориентировочный расчет, тем не менее, он показывает, что вполне реально, имея параметр H/Si порядка  $10^{-4}$ , получить в объеме  $V \approx 10 \times 10 \times 10$  км<sup>3</sup> акустическую энергию порядка  $10^{24}$  эрг. Наши оценки, естественно, предполагали, что каждый пузырь схлопываясь, приводил к возникновению акустической волны, которая, когерентно складывалась с другими звуковыми импульсами, одновременно испускаемыми другими пузырями. Такие оценки, очевидно, завышены, но и параметр H/Si может быть несколько выше, больше может быть объем, больше размер пузыря. Таким образом, в УВ модели и модели горячей Земли, можно найти вполне правдоподобное объяснение физики глубокофокусных землетрясений.

### VIII. 5. 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.

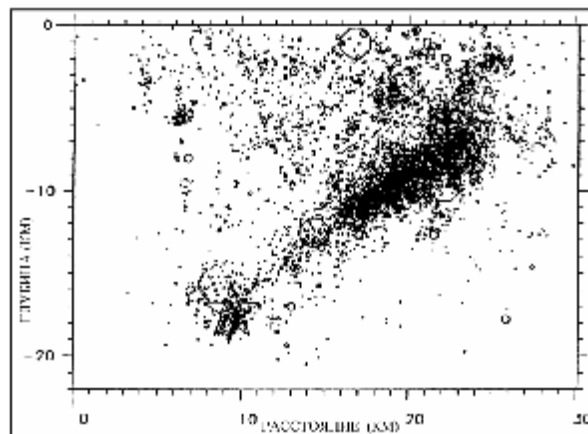


Рис. 8-18. Афтершоки Нортриджского землетрясения 1994 г. “повторяют” структуру “основного удара” этого землетрясения (Wald et al., 1996).

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. 8-18 (Wald et al., 1996), из которого следует, что после Нортриджского землетрясения 1994 г. максимальная концентрация афтершоков соответствует плоскости главного удара этого землетрясения. Звезда на этом рисунке показывает положение гипоцентра, угол подхода главного удара к дневной поверхности, как мы отмечали раньше, составляет примерно 40-45°. Максимум разрушений Нортриджского землетрясения располагается строго на север от гипоцентра

(эпицентра) землетрясения, в то время как максимум афтершоков немного (градусов на 20) повернут в восточном направлении (в сторону Голливуда). Рисунок 8-18 показывает, что проекция афтершоков на дневную поверхность приходится на область между гипоцентром землетрясения и эпицентром максимальных разрушений, т.е. в области максимальных значений амплитуды ударной волны, как это и должно следовать из нашей модели.

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  $N_0$ , то их изменение со временем можно описать формулой убывания люминесценции (фосфоресценции):

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t),$$

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:

$$B = B_0/(1 + at)^\alpha,$$

где  $B_0$  – начальная яркость,  $t$  - время, прошедшее после прекращения возбуждения,  $a$  и  $\alpha$  – 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.

#### VIII. 6. К вопросу о прогнозе.

Все системы прогноза базируются, как правило, на использовании уже сравнительно давно выявленных признаков. Трудно назвать какой-либо из признаков, о котором не было бы написано в известной книге Т. Рикитакэ (1979). Среди “прогнозных” признаков, предлагаемых к обсуждению, особую роль играют признаки, основанные на использовании электромагнитных полей. Сюда можно отнести:

- регистрацию электромагнитного излучения (эмиссии) - ЭМИ из зоны очага;
- возрастание сейсмoeлектрической активности, регистрируемой в теллурических токах (используемой в т.н. VAN-методе);

- изменение величины атмосферного электрического поля и, возможно, связанные с ним явления свечения неба и даже воды (Моргунов, 1998) перед сильными землетрясениями;
- изменения в магнитном поле Земли и
- изменения, фиксируемые в ионосфере.

Кроме этого, имеет смысл упомянуть о регистрации акустических (“ужасный гул”) и сейсмических (микросейсмы) сигналов перед сильными событиями. Можно отметить признаки, связанные с изменением наклона земной поверхности, величины силы тяжести, амплитуды деформаций и т.п. Перечисляя признаки, нельзя не остановиться и на серии так называемых реологических, регистрирующих, например, отношение скоростей продольных и поперечных волн и т.д.

Ни один из признаков готовящегося землетрясения не получил пока ясной интерпретации и связи его с процессом подготовки землетрясения, да и с самим явлением. Дело в том, что до сих пор так и нет, как мы неоднократно отмечали, понимания природы сейсмичности и физики землетрясения. Известные в настоящее время модели очага землетрясения в той или иной форме связаны с генерацией сейсмических волн. Ни одна из моделей не обходится без использования механизма “лавинного трещинообразования”. Совершенно неясен физический механизм этого явления, но, если что-либо подобное происходит в земных недрах, и это “что-то” связано с интенсивным образованием (раскрытием) трещин, то, очевидно, что очаг землетрясения можно уподобить объемному источнику сейсмических волн. Известна модель очага, в которой он является источником сейсмических волн, а разрушения на земной поверхности обязаны их усилению за счет интерференции (Rial et al., 1992). Наша ударно-волновая модель очага землетрясения предполагает, что в акустически-активной среде возникают сейсмические волны, которые предшествуют землетрясению и могут быть зафиксированы и как “ужасный гул”, и как микросейсмы. Более того, из этой модели следует такая особенность, как возникновение в зоне очага когерентной структуры, обладающей “дальним порядком”. Это открывает возможность для привлечения к объяснению физики происходящих процессов таких явлений, как генерация электрических полей, за счет их когерентного “сложения” от раскрывающихся трещин, изменение величины магнитного поля, за счет упорядочения ферромагнитных структур и т.п. Кроме этого, здесь могут иметь место различного рода сейсмoeлектрические и сейсмамагнитные эффекты, как результат воздействия сейсмической волны на упругую среду, как “носителя” магнитных и электрических “зарядов”.

Сейсмическая волна, выходя на земную поверхность, будет генерировать акустическую волну, которая, распространяясь в атмосфере, способна переносить информацию об очаге, например, на ионосферные высоты, где, взаимодействуя с ионизированным воздухом, вызывать возмущения. Другим возможным “переносчиком” возмущений в атмосфере, от границы с твердой землей вплоть до ионосферных высот, вызываемых готовящимся землетрясением, может быть электрическое поле. Как показано в (Плоткин, 1992), электрическое поле может проникать из хорошо проводящей земной коры в плохо проводящую атмосферу, за счет преобразования вертикальных компонент поля в тангенциальные и обратно. Возможно, действию этого механизма “обязано” появление таких электрических явлений перед землетрясениями, как свечения неба, воды и т.п. Электрическое поле способно проникать и на ионосферные высоты (Kuznetsov et al., 1995), где может вызывать те самые явления, которые фиксируются как ионосферные предвестники землетрясения.

Землетрясения представляют собой наиболее распространенный естественный источник акустических и электромагнитных возмущений, которые активно изучаются. Считается, что при землетрясениях источником акустических возмущений в атмосфере является релеевская волна, распространяющаяся вдоль земной поверхности со скоростью нескольких километров в секунду (Suzuki et al., 1969). В этом случае акустическая волна излучается в атмосферу почти вертикально. Соответствующие периоды акустических

колебаний по измерениям (Ichinose et al., 1982) составляют десятки секунд. Инфразвуковые волны столь низких частот испытывают весьма малое поглощение в атмосфере, распространяются на большие расстояния и оказывают акустическое воздействие на ионосферу (Липеровский и др., 1992; Calais, Minster, 1998).

Однако землетрясения, особенно сильные, происходят не часто, случайным образом, и детально изучить предшествующие им и сопровождающие их явления затруднительно. Другой важный путь изучения сейсмоионосферных явлений связан с искусственным возбуждением сейсмических колебаний земной поверхности и применением всех возможных способов излучения инфразвука. Инфразвук хорошо распространяется в приземном волноводе, испытывая отражения от различных слоев атмосферы. В исследованиях дальнего распространения инфразвука принято называть лучи, отражающиеся в тропосфере - звуком первого рода, отражающиеся вблизи озонового слоя на высотах 40-50 км - звуком второго рода, а если поворот луча осуществляется в термосфере на высотах 100 км и более, то говорят о звуке третьего рода. При этом выводы делаются на основании оценок времени распространения регистрируемых акустических сигналов. В (Balachandran et al., 1977) регистрировался аномальный звук третьего рода от полетов сверхзвуковых самолетов на горизонтальных удалениях от 165 до 1000 км. Излучатели инфразвука, применявшиеся в установках радиоакустического зондирования, имели частоты не ниже 80 Гц (Francel, Peterson, 1976), поэтому их дальность не превышала 3 км по высоте. Интенсивные инфразвуковые и сейсмические возмущения наблюдались во время старта и посадки американских космических аппаратов "Шатл" (Calais, Minster, 1998; Qamar, 1995). Обзор явлений, наблюдаемых в верхней атмосфере при излучении инфразвука различными природными и искусственными источниками, дан в (Blanc, 1985). Хорошую возможность для изучения сейсмоионосферных связей предоставляют явления, наблюдающиеся при мощных взрывах (см., например, Jacobson et al., 1986; Blanc, Rickel, 1989; Calais et al., 1998). В (Blanc, Rickel, 1989) приведена простая физическая модель, объясняющая наблюдаемые искажения доплеровских спектров радиоволн, распространяющихся через область спорадического E-слоя ионосферы, возмущаемого мощным наземным взрывом. В соответствии с этой моделью, акустическая волна в ионосфере на высотах ~ 100 км распространяется почти горизонтально во все стороны от области над точкой взрыва. Различные аспекты взаимодействия акустических и сейсмических волн, наблюдаемых при атмосферных (на высотах 4, 6 и 8 км), наземных и подземных взрывах рассмотрены в работе (Kitov et al., 1997).

Электромагнитные эффекты, сопровождающие рассматриваемые явления, также представляют большой интерес и достаточно подробно рассматриваются в монографиях (Гохберг и др. 1988; Сидорин, 1992). Отметим работу (Iyemori et al., 1996), посвященную наблюдению геомагнитных возмущений, сопровождавших сильное землетрясение в Кобе (Япония) в 1995 году. Эти эффекты интенсивно изучаются сейчас в связи с проблемой поиска предвестников готовящихся землетрясений. Большое внимание к ним уделялось также с целью выяснения возможности идентификации ядерных, обычных взрывов и землетрясений. В (Sweeney, 1996) описывается серия измерений параметров низкочастотного электромагнитного излучения при ядерных и химических взрывах и установлено, что электромагнитные импульсы (ЭМИ), порождаемые этими взрывами существенно различаются. При ядерном взрыве наблюдаются относительно короткие импульсы в магнитном поле в момент детонации, обусловленные гамма-излучением. Природа последующих сигналов в магнитном и электрическом поле, как при ядерных, так и при обычных взрывах, остается пока неясной. Один из возможных механизмов связан с разделением зарядов при образовании разрывов в породах (Yamada et al., 1989; Tomizava, Yamada, 1995; Adushkin, Soloviev, 1996).

Если допустить, что предлагаемой здесь УВ модель землетрясения верна, то следствием этого могут быть несколько практических её применений. Во-первых, в нашей модели необходимо присутствие прочного геологического тела, которое может быть

обнаружено одним из известных сейсмических или электромагнитных способов. Действительно, в тех случаях, когда тщательно изучались разрез, проходящий через гипоцентр землетрясения, направление главного удара, вектора подвижек в очаге и т.п., выяснялось, что гипоцентр, как правило, приурочен верхней границе геологического тела (Крылов и др., 1993). Направление главного удара составляет примерно  $45^\circ$  для суммы вертикальной и боковой нагрузок и  $\approx 90^\circ$  - в тех случаях, когда кроме нее присутствует и нагрузка, действующая под острым углом. В качестве иллюстрации сказанному, сошлемся на книгу (Крылов и др., 1995), где утверждается, что в центральной части прочного геологического тела, обнаруженного авторами (см. рис. 8-15) на севере Байкала, сейсмичности нет, хотя на его периферии произошли два сильных землетрясения: Муйское 1957 г. и Северо-Байкальское 1917 г., а также ряд более мелких. Гипоцентры обеих сильных землетрясений точно совпадают с границей геологического тела. Заключение о совпадении гипоцентра с границей высокоскоростного и электропроводящего тела можно сделать на основании материалов (Eberhart-Phillips, Michael, 1993). В этой работе авторами, для района сильнейшего Паркфилдского (Калифорния) землетрясения 1966 г., была построена трехмерная структура распределения сейсмических скоростей. Авторы использовали данные по прохождению по среде Р-волн, возбуждаемых 5251 локальными землетрясениями 1969-1991 г.г. Объемная волновая структура получена для части земной коры в окрестности разлома Сан-Андреас, площадью 60 на 80 км и глубиной 16 км. Выявление таких сейсмоактивных геологических тел, возможно, окажется полезным при сейсмораионировании отдельных особо важных объектов (атомных электростанций, плотин ГЭС и т.п.).

Если допустить, что основная идея нашей модели адекватно описывает явления, происходящие в очаге и при разрушении земной поверхности, то, казалось бы, можно предложить некоторые приемы защиты от разрушительного действия землетрясений. Суть таких приемов всякий раз должна состоять в том, чтобы УВ выходила на свободную поверхность не там, где, например, построено здание или плотина, а в другом, искусственно подготовленном заранее месте, где разрушения не так опасны.

Представим ситуацию, в которой некоторое геологическое тело хорошо изучено. Известно, например, что незначительное увеличение нагрузки на тело, например, в доли атмосферного давления, может привести к возникновению в нем пространственной когерентности и дальнего порядка. В этой ситуации мониторинг надо вести уже не столько сейсмической активности, сколько атмосферного давления, уровня грунтовых вод и т.п.

Согласно нашей модели землетрясения, обнаружив сейсмоактивное геологическое тело, можно попытаться решить ту часть прогноза, которая называется "*определение места*". Далее, ведя постоянный мониторинг ряда геофизических параметров, можно попытаться "*предсказать время*" очередного события. Все эти гипотетические возможности прогноза "*разбиваются*" о непреодолимое (на наш взгляд) препятствие. Оно связано с "*прогнозом силы*" (т.е. энергии) землетрясения. В нашей модели этот параметр зависит от того, сколько раскрывающихся трещин "*подключится*" к ударному импульсу. Заметим, что и в Б-К модели, так же как и в нашей, - сила землетрясений определяется тем, сколько дискретных элементов может "*подключиться*" одновременно.

Сила землетрясения, по-видимому, величина непредсказуемая в принципе, она совершенно случайна, а *землетрясение*, "*уже начавшись, само не знает, каким получится*". Направление главного удара тоже случайно, однако, не случаен угол, под которым выходит на поверхность ударная волна. Эту мысль иллюстрирует рассмотренный нами выше пример, когда после землетрясения в Нортридже, главный удар которого (угол  $45^\circ$  к горизонту) пришелся севернее Лос Анжелеса, рой афтершоков был направлен под тем же углом, но уже в сторону этого города (рис. 8-18). Можно считать, что только благодаря счастливой случайности город почти не пострадал. "Источником" как

основного удара, так и афтершоков, было одно геологическое тело, верхняя граница которого (гипоцентр) находилась на глубине 17 км.

Известно, что трещина, в момент ее раскрытия, является генератором электричества. На ее “бортах” возникают заряды противоположных знаков. Казалось бы, когерентное сложение зарядов может проявиться (при условии, что будет “найден” подходящий способ “транспортировки” поля) на поверхности Земли как аномалия в атмосферном электрическом поле, или в виде усиления (ослабления) теллурических токов. Идея регистрации эффектов вариации теллурических токов перед землетрясением в качестве его прогноза, используется в т.н. VAN-методе (Masood, 1995). Однако, как показано Геллером (Geller, 1991; 1996), этот метод, как прогнозный, не имеет достаточных оснований ни по физике явлений (которая вообще не разработана), ни по его точности и надежности.

### VIII. 7. Обсуждение ударно-волновой модели.

Напомним, наша модель называется ударно-волновой, её суть состоит в том, что геофизическая среда, находящаяся под постоянной литостатической нагрузкой, генерирует кратковременный импульс энергии. В принципе, это может быть уединенная волна, солитон. Мы назвали такую волну ударной исключительно потому, что в физике этот тип волн изучен лучше всего. Возможно, землетрясение связано с генерацией ударной волны в том смысле, как это понимается Зельдовичем и Райзером (1966), в любом случае, это не обычная, гуковская Р-, или S-волна. Зельдович и Райзер называют такую волну акустической, скорость её распространения определяется формулой скорости звука в воде  $(K/\rho)^{1/2}$ . Если эта скорость больше скорости распространения Р-волн, то расщепления волн в зоне очага не происходит и очаг (в нашей интерпретации) «не звучит». УВ распространяется вероятнее всего со скоростью  $c$ :  $V_p > c > V_s$ . В этом случае, в зоне очага происходят различные взаимодействия её со средой и генерация волн, фиксируемых удаленными от землетрясения сейсмостанциями. Амплитуда колебаний частиц среды и грунта, при выходе УВ на поверхность, в такой волне может быть достаточно большой, значительно большей, чем обычно фиксируемые в сейсмических волнах. Заславский и Сагдеев (1988) считают, что амплитуда такой волны может быть линейно связана со скоростью её распространения. Можно ли что-нибудь сказать о том, насколько реальна волна подобного типа, или это всего лишь теоретическая абстракция?

Магнитуа землетрясения ( $M$ ) пропорциональна логарифму: сейсмического момента  $M_0$ , энергии объемных волн  $E_v$ , площади поверхности разлома  $S$ , площади области афтершоков  $S_A$ , периоду (длительности главного удара)  $T$ , объему очага землетрясения  $V$  (Касахара, 1985). Обсудим, как эти зависимости могут быть объяснены в рамках нашей модели...

Как отмечалось в ранних работах по УВ-модели, энергия УВ:  $I = N \cdot (S^2/E) l^3$ . Вместо  $N$ : подставим:  $N = nLS_A$ , где  $n$  - концентрация трещин,  $LS_A$  - объем геологического тела, в котором образуются трещины (т.е.  $I \sim S_A$ ). Энергия излучения объемных волн зависит от полной энергии УВ, объема очага ( $V = S h / \sin \alpha$ , где  $h$  - глубина гипоцентра) и коэффициента преобразования энергии УВ в объемные волны:  $k$ . Энергия объемных волн в нашей модели:

$$E_v \gg I k V / h^3.$$

Сделаем очевидную замену:  $T = L/v_p$ , где  $v_p$  - скорость Р-волн в геологическом теле, получаем:  $I \sim T$ .

Принято считать, что  $T \sim L/v$ , отсюда  $I \sim T$ . Однако это, как мы отмечали, должно противоречить идее сверхизлучения, используемой в нашей модели, согласно которой  $I \sim 1/T$ . Как известно, корреляции (прямой или обратной) между  $I$  и  $T$  вообще не наблюдается. Здесь  $T$  - время нарастания (Приложение I в книге Касахара, 1985). С точки зрения нашей модели, этот факт можно объяснить тем, что в момент образования УВ, ее амплитуда (интенсивность) “связана” с длительностью ее фронта (“импульса”)



соотношением:  $I \sim 1/T$ . Однако длительность импульса УВ за счет влияния дисперсионных эффектов среды возрастает до величины в несколько секунд и оказывается независимой от величины начальной интенсивности.

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, которые возбуждаются в объеме очага - от гипоцентра землетрясения практически до поверхности Земли. 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.

Как мы отмечали выше, на глубине двух-трех километров и выше, т.е. вблизи земной поверхности, генерации объемных волн, как правило, не наблюдается (Somerville, et al., 1996). Это явление в сейсмологии однозначного объяснения не находит. Как мы показали, наша модель объясняет это явление: Волна разгрузки образуется, как было показано выше, при прохождении УВ 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  $p_{кр}$ . Скорость распространения УВ должна быть ниже, чем скорость Р-волн:  $V_{ув} < V_p$ . В этом случае возбуждаются и по среде бегут две волны, одна - "упругая", со скоростью  $V_p$ , другая - акустическая (пластическая), со скоростью  $c = (K/r)^{1/2}$ . Ударная волна расщепляется на упругую и пластическую волны. При этом по нагруженному телу "бежит" волна растяжения в сторону, обратную распространению УВ. Кроме этого, может образоваться еще и пластическая волна разгрузки, "двигающаяся" вслед за ударной, но с меньшей скоростью.

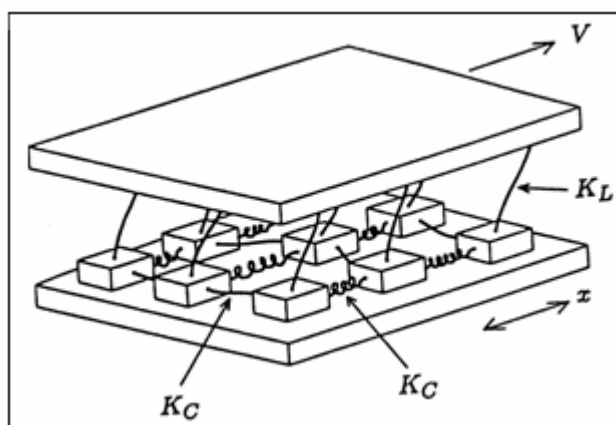


Рис. 8-19. Модель землетрясения Барриджа и Кнопова.

Ударно-волновая модель удовлетворяет известным экспериментальным зависимостям между собой параметров: энергия землетрясения, длительность импульса (период), площади областей афтершоков и разрушений и т.п., что позволяет считать высказанную выше идею не совсем безнадежной. Для того чтобы по возможности объективно оценить "плюсы" и "минусы" нашей модели, имеет смысл сопоставить ее с одной из моделей землетрясения, общепринятой, и в настоящий момент, - наиболее популярной. Наибольший интерес у геофизиков и физиков-теоретиков вызывает spring-block модель Барриджа и Кнопова (Б-К). Механистическая Б-К модель представляет собой систему, состоящую из дискретных элементов, каждому из которых приписаны определенные значения массы, упругости, трения и вязкости. Дискретные элементы механически (посредством пружин) "связывают" две пластины, одна из которых

движется, другая – неподвижна. Кроме этого, они “связаны” между собой. В зависимости от реологии (жесткости пружин и трения) и скорости движения пластины, дискретные элементы перемещаются по неподвижной пластине “прыжками”, причем, количество элементов, одновременно “прыгающих”, различается для разных режимов скольжения. Когда их много, это эквивалентно “главному удару” землетрясения. Следующие за главным ударом “прыжки” - афтершоки, предыдущие - форшоки.

Для физиков-теоретиков эта задача представляет интерес, как система, в которой возможно проявление самоорганизации, т.к. дискретные элементы взаимно завязаны через механические пружины (реологические параметры). В ключе самоорганизации, Б-К модель очень близка к нашей модели, в которой организуются трещины, влияя друг на друга через механизм АЭ, и собираясь в пространственные и временные кластеры. Трудно себе представить, чтобы Б-К модель имела реальное физическое воплощение, например, в виде “прыгающих” под давлением в десяток килобар отдельных блоков в глубине земной коры и литосферы, несмотря на то, что модель с т.н. прерывистым скольжением (stick-slip) общепринята и широко развивается. Брэйс и Байерли показали (Приложение 10), что на поверхности трещин, уже существующих в горной породе, может иметь место серия скачкообразных подвижек в условиях сохранения давления, и назвали это явление прерывистым скольжением (stick-slip). Однако, несмотря на это, представляется, что более реальным физическим явлением, происходящим на глубинах в десятки и сотни км, могут быть либо раскрытие трещин, либо перемещение дислокаций, проявляющиеся, например, в дилатантных моделях. Если допустить, что приемлемой физической реальностью Б-К модели могут оказаться не “мифические” отдельные блоки земной коры, а всего лишь трещины, то наша модель и Б-К модель - идентичны.

Все модели очага в своей основе базируются на том, что разрушается горная порода на огромной площади, на глубине 10 км и протяжении в 100 км. В момент разрушения, очаг излучает объемные волны, которые, распространяясь на огромные расстояния, несут информацию об очаге. Эта идея была высказана Рейдом около 80 лет тому назад. Сейсмологи, которым не импонировала идея Рейда, но, в то же время они наблюдали, что в момент землетрясения происходит разрушение поверхности, рано или поздно приходили к заключению, что очаг, находящийся где-то глубоко, излучает сейсмические волны, которые, усиливаясь, вызывают разрушения поверхности. Наша модель практически повторяет эту идею, наполнив ее новым содержанием, которое хорошо известно в той части физики, которая занимается ударными волнами и их взаимодействием со средой. Попутно заметим, что все модели воспринимают очаг как некую плоскость. В нашей модели, это объем среды, который начинает излучать объемные волны в момент прохождения через него УВ. Обратимся к наблюдениям землетрясения в Нортридже. Здесь, как уже упоминалось, фиксировалась и плоскость очага и, с другой стороны, плоскость векторов подвижек, нормальная к плоскости очага, т.е. объем. Анализ роя афтершоков так же показывает, что очаг представляет собой не плоскость, а объем. Это заключение ближе к нашей модели, чем к общепринятой. Обратим внимание на такой момент. В нашей модели становится понятной физика нодальной плоскости. Это та часть пространства, где осуществляется взаимодействие фронтов двух волн УВ и ВР. Как мы отмечали, именно в этом месте удваивается амплитуда волны разрежения и происходит разрывы и разломы.

В книгах по сейсмологии неоднократно приводится один эпизод, связанный с подвижками дома, построенного в непосредственной близости от разлома Сан-Андреас. Этот дом разворачивало таким образом, что его стена, обращенная на юго-запад, к океану, перемещалась в северо-западном направлении. Когда произошло известное землетрясение в Сан-Франциско, то оно разрушило этот дом, причем его удар был именно в том направлении, что и медленное перемещение вдоль разлома. Этот случай, якобы послужил

Рейду для формулирования его идеи упругой отдачи, когда медленный крип сменяется резким сбросом (отдачей) с «выходом» трещины на поверхность. Эта связь направления основного удара с направлением течения литосферы до сих пор так и не опровергнута и даже подтверждается наблюдениями многих сильных землетрясений. По-видимому, это свойство Земли можно считать неким своеобразным тестом для проверки моделей очага землетрясения. Естественно, мы должны убедиться в том, что наша ударно-волновая модель землетрясения обладает таким свойством.

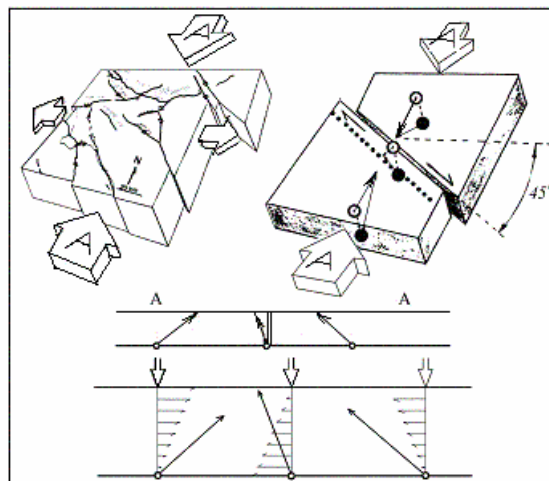


Рис. 8-20. Схемы напряжений « $\sigma$ » и направлений перемещений литосферы в Южной Калифорнии (Walls et al., 1998), - слева вверху; в районе разлома Сан Андреас, - справа вверху. Направления «главных ударов трех землетрясений (разрез по линии «AA»)). Схема напряжений в районах очагов этих землетрясений, «обеспечивающая» удары в заданных направлениях.

Воспользуемся схемой направлений нагрузок (напряжений) « $\sigma$ » и направлений перемещений литосферы в Южной Калифорнии, в частности, в районе разлома Сан Андреас (Walls et al., 1998). Эта схема приведена в левой части рис. 8-20. Справа изображена часть схемы, относящаяся непосредственно к этому разлому. Напряжения обозначены буквами «А». Направление напряжений в этом районе совпадает с направлением вдоль меридиана, а перемещения плит происходят, как и следует из закона Кулона-Мора, под углом 45 градусов к меридиану. На правой части рисунка изображены три землетрясения. Одно из них произошло в подвижной южной части и направление главного удара ориентировано на север. Например, это может быть Нортриджское (Northridge) землетрясение 1994 г. По нашей схеме, другое землетрясение находится на противоположной (северной) части, за разломом, и его удар ориентирован в южном направлении. В качестве примера такого землетрясения, можно рассмотреть землетрясение Коалинга (Coalinga) 1983 г. Между ними, на линии «AA», непосредственно в зоне разлома, происходят землетрясения, эпицентры разрушений которых «выстраиваются» в линию, параллельную разлому Сан Андреас (см. рис. 8-20). К таким землетрясениям, гипоцентр которых приходится непосредственно на зону разлома, можно отнести известные землетрясения: Паркфилдское (1966) и Лома Приета (1989). Главный удар этих землетрясений направлен практически вертикально вверх, в отличие от первых двух, у которых он приходится к горизонту примерно под углом 40-50°. Как видно из рисунка, литостатическая (вертикальная) нагрузка одинакова для всех трех случаев. Горизонтальные (касательные) напряжения (нагрузки) отличаются. Причина таких отличий заключается, на наш взгляд, в том, что собственно «течет» только самый верхний слой литосферы, поэтому на удалении от русла, которым является в данном случае сам разлом, чем меньше глубина, тем больше напряжение. Совсем по-другому ведет себя

касательное напряжение непосредственно в области разлома (русла), где скорость течения максимальна, а, как известно, касательное напряжение тем меньше, чем выше скорость течения.

Рисунок 8-20 демонстрирует одно из важнейших следствий нашей модели землетрясения, состоящей в том, что характер его импульсного воздействия на земную кору в виде подвижек и разрушений, повторяет и, более того, точно соответствует направлению подвижек и разрушений, вызываемых медленным перемещением блоков земной коры и литосферы. Как мы отмечали выше, именно это свойство привело Рейда к модели землетрясения, как упругой отдачи. Оказывается, что такой эффект находит объяснение совсем с других, чем у Рейда, позиций. Эта особенность землетрясений, основанная на взаимодействии в области их очага двух напряжений: литостатического и касательного, связанного с “течением” литосферы, позволяет использовать её в модели самоорганизации.

И, в заключение, подводя итоги обсуждения ударно-волновой модели землетрясения, сошлемся на мнение строителя, специалиста по разрушению зданий во время землетрясений профессора С.Б. Смирнова, обосновавшего концепцию ударно-волнового сейсмического разрушения (Смирнов, 1992). Смирнов учитывает, что многочисленные наблюдения сейсмических разрушений зданий показывают, что разрушения происходят сразу после первых наиболее мощных поперечных толчков. Результатом таких толчков, которые, конечно же, не успевают раскачать здание, т.е. вызвать в нем появление опасных сил инерции, является почти мгновенный срез колонн или стен здания, вследствие чего происходит разрушение здания до попадания его в резонанс. Для того чтобы объяснить эти факты, автор приходит к мнению, что такие разрушения могут производиться *только ударной волной*. Свою концепцию автор обосновывает расчетами и многочисленными примерами из практики сейсмических разрушений.

Работа Смирнова свидетельствует в пользу предлагаемой нами ударно-волновой модели землетрясения. По всей видимости, трудно найти более убедительные аргументы в поддержку нашей модели.

### *Литература*

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. М.: Мир. 1983.
- Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Губайдулин А.А. и др. Усиление ударных волн в жидкости с пузырями пара. В сб. Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. 1977. С. 67-74.
- Буллен К.Е. Плотность Земли. М.: Мир. 1978. 442 с.
- Гвоздев А.А., Кузнецов В.В. Откольные явления в грунтах, наблюдаемые при сейсморазведке. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. N. 5. С. 21-27.
- Геодаков А.Р., Овсяченко А.Н., Платонова С.Г и др. Материалы предварительного изучения сильного землетрясения 2003 г. на Горном Алтае. Электронный научно-информационный журнал «Вестник отделения наук о Земле РАН» № 1 (21) 2003, М.: ОИФЗ РАН, 2003. URL: [http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h\\_dgggms/1-2003/screp-8.pdf](http://www.scgis.ru/ruaaian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-8.pdf)
- Горькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Тайдакова Т.А., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. О зависимости корреляции между региональной сейсмичностью Земли и неравномерностью её вращения от глубины очагов землетрясений. Физика Земли. 1999. № 10 . С. 52-66.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука. 1988. 174 с.
- Гуттенберг Б. Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 263 с.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука. 1983. 415 с.

- Журков С.Н., Петров В.А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел. ДАН. 1978. Т. 239. № 6. С. 1316-1319.
- Журков С.Н., Куксенко В. С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел. Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. науч. тр. М.: Наука, 1980. С. 78-85.
- Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 1997.
- Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. М.: Наука. 1988. 368 с.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 1966. М.: Наука. 686 с.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 262 с.
- Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1984. 400 с.
- Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах. Новосибирск: Наука. 1993. 198 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. 1992. Новосибирск: Наука. 96с.
- Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин. ПМТФ. 2001-а. Т. 42. № 4. С. 184-189.
- Кузнецов В.В. Ударно-волновая модель очага землетрясения. Науки о Земле: Современные проблемы сейсмологии. М.: Вузовская книга. 2001-б. С. 47-62.
- Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР. 2006.
- Кусов А.А. Фононная модель разрушения нагруженной атомной цепочки. ФТТ. 1979. Т. 21. № 10. С. 3095-3099.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992, 304 с.
- Моргунов В.А. Электрические явления, предшествующие Шикотанскому землетрясению и его афтершокам. ДАН. 1998. Т. 359. № 1. С. 102-105.
- Накоряков В.Е., Донцов В.Е. Усиление ударной волны в насыщенной пористой среде. ДАН. 2000. Т. 373. № 4. С. 477-478.
- Плоткин В.В. Ионосфера как нагрузка глобальной атмосферной электрической цепи. Известия вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35. № 11-12. С. 900-913.
- Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения, в сб. Разрушение т. 2. Ред. Г. Либовиц. М. Мир.: 1975. 764 с.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И. Кинетическая природа прочности. В кн. Физика сегодня и завтра. Л.: Наука. 1973. С. 90-175.
- Рикитакэ Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1979. 286 с.
- Си Г., Либовиц Г. Математическая теория хрупкого разрушения, в сб. Разрушение т. 2. Ред. Г. Либовиц. М.: Мир. 1975. 764 с.
- Сидорин Л.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 192 с.
- Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружений. Энергетическое строительство. 1992. № 9. С. 70-73.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 404 с.
- Шредер М. Фракталы, хаос, степенные ряды. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 528 с.
- Adushkin V.V., Soloviev S.P. Generation of low-frequency electric fields by explosion crater formation. J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 20165-20173.
- Anderson J.G., Yu G. Predictability of strong motion from the Northridge, California Earthquake. Northridge Earthquake. January 17, 1994. Bulletin Seismological Society of America (BSSA). 1996. V. 86. N. 1B. P. 100 – 114.
- Balachandran N.K., Donn W.L., Rind D.H. Concordant sonic booms as an atmosphere probe. Science. 1977. V. 187. P. 47-49.

- Bardet J.P., Davis C. Engineering observations on ground motions at the Van Norman Complex after the 1994 Northridge Earthquake. Northridge Earthquake January 17, 1994. Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. N. 1B. P. 333-349.
- Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary. Ann. Geophys. 1985. V. 3. P. 673-688.
- Blanc E., Rickel D. Nonlinear wave fronts and ionospheric irregularities observed by HF sounding over a powerful acoustic source. Radio Sci. 1989. V. 24. № 3. P. 279-288
- Calais E., Minster J.B. GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle. Phys. Earth Planet. Inter. 1998. V. 105. P. 167-181.
- Calais E., Minster J.B., Hofton M.A., Hedlin M.A.H. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. Geophys. J. Int. 1998. V. 132. P. 191-202.
- Dicke R.H. Coherence in spontaneous radiation processes. Phys. Rev. 1954. V.93. N. 1. P. 99-110.
- Eberhart-Phillips D., Michael A.J. Three-dimensional velocity structure, seismicity, and fault structure in the Parkfield region, Central California. J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N. B9. P. 15737-15758.
- Francel M.S., A.M.Peterson. Remote temperature profiling in the lower troposphere Radio Sci. 1976. V. 2. № 3. P. 157-166.
- Geller R.J. Shake-up for earthquake prediction. Nature. 1991. V. 352. 275-276.
- Geller R.J. VAN: a critical evaluation, in Critical review of VAN, ed. J. Lighthill, World Scientific. 1996. P. 155-238. Singapore.
- Harp E.L., Jibson R.W. Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake. BSSA. 1996. V.86. N.1B. P. S 319-S 332.
- Ichinose T., Takagi K., Tanaka T., Oquzawa T., Shibata T., Sato Y., Nagasawa C., Ogawa T. HF Doppler observations of acoustic waves excited by the earthquake Middle Atmosphere Program, Handbook for MAP. 1982. V. 18. P. 310-318.
- Ishido T., Nishizawa O. Effect of zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression J. Geophys. Res. 1984. V. 89, N B6. P. 4153-4159.
- Iyemori T., Kamei T., Tanaka Y., et al. Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. J. Geomag. Geoelectr. 1996. V. 48. P. 1059-1070.
- Lei X., Nishizawa O., Kusunose K., Satoh T. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes // Phys. Earth. 1992. V. 40, P. 617-634.
- Jacobson A.R., Carlos R.C., Argo P.E., Rickel D.G. Radio wave diffraction during the passage of an acoustic shock through a sporadic E layer. Radio Sci. 1986. V. 21. № 4. P. 752-760.
- Jouniaux L., Masuda K., Lei X., et al. Comparison of the microfracture localization in granite between fracturation and slip of a preexisting macroscopic healed joint by acoustic emission measurements. J. Geophys. Res. 2001. V. 106. NO. B5. P. 8687-8698
- Kitov I.O., Murphy J.R., Kusnetsov O.P., Barker B.W., Nedoshivin N.I. An analysis of seismic and acoustic signals measured from a series of atmospheric and near-surface explosions. Bull. Seism. Soc. Amer. 1997. V. 87. P. 1553-1562.
- Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Izraileva N.I. The investigation of electromagnetic interactions between regions surrounding the Earth. J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V. 57. № 13. P. 1639-1660.
- Lei X., Nishizawa O., Kusunose K., Satoh T. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes // Phys. Earth. 1992. V. 40, P. 617-634.
- Masood E. Greek earthquake stirs controversy over claims for prediction method. Nature. 1995. V. 375. P. 617.
- Northridge Earthquake January 17, 1994. Bulletin Seismological Society of America 1996. V. 86. N.1. Part B.
- Qamar A. Space Shuttle and meteoroid - tracking supersonic objects in the atmosphere with seismographs. Seism. Res. Lett. 1995. V. 66, № 5. P. 6-12.

- Rial J.A., Saltzman N. G., Ling H. Earthquake-induced resonance in sedimentary basins. *American Scientist*. 1992. V. 80. November-December. P. 566-578.
- Shen, Z., Ge B. X., Jackson D. D. et al. Northridge Earthquake rupture models based on the Global Positioning System measurements. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1996. V. 86. N.1, Part B, P. 39- 48
- Smith D.L., Evans B. Diffusional crack healing in quartz. *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 4125-4135.
- Somerville P., Saika C., Wald D., Graves R. Implications of the Northridge earthquake for strong ground motions from thrust faults. 1996. *BSSA*. V. 86. N. 1B. P. S115-S125.
- Suzuki R.K., Yuen P.C., Weaver P.F. Continuous traveling coupling between seismic waves and the ionosphere evident in May 1968 Japan Earthquake Data . *J. Geophys. Res.* 1969. V. 74. № 9. P. 2256-2264.
- Sweeney J.J. Low-frequency electromagnetic measurements as a zero-time discriminate of nuclear and chemical explosions - OSI research final report: Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, report UCRL-ID-126780. December. 1996. 23 p.
- Tomizava I., Yamada I. Generation mechanism of electric impulses observed in explosion seismic experiments. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1995. V. 47. P. 313-324.
- Wald D.J., Heaton T.H., Hudnut K.W. The slip history of the Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data. *BSSA*. 1996. V. 86. P. S49-S70.
- Walls C., Rockwell T., Mueller K., et al. Escape tectonics in the Los Angeles metropolitan region and implications for seismic risk. *Nature*. 1998. V. 394. P. 356-360.
- Wiens D.A., McGuire J.J., Shore P.JU., et al. A deep earthquake aftershock sequence and implications for the reapture mechanism of deep earthquakes. *Nature*. 1994. V. 372. P. 540-543.
- Willemann R.J. A simple explanation for the depth distribution of deep earthquakes. *Geoph. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 1123-1126.
- Yamada I., Masuda K, Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock failure. *Phys. Earth Planet. Int.* 1989. V. 57. P. 157-168.
- Zeng Y., Anderson J.G. A composite source model of the 1994 Northridge Earthquake using genetic algorithms. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1996. V. 86. N.1, Part B. P. 71-83

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почему движутся материки, как происходит генерация магнитного поля, почему тепловой поток пронизывает материки и океаны, насколько велика температура в центре Земли, какова там плотность и состав вещества? На эти и другие вопросы нет, и никогда не может быть однозначных ответов. Происходит это потому, что человеку никогда не удастся “заглянуть” в глубины Земли и произвести там требуемые измерения. Ответы на эти вопросы всегда останутся дискуссионными, хотя степень “разбросов” различных мнений должна бы снижаться по мере накопления новых данных о Земле и планетах. Среди всех этих вопросов выделим один, имеющий принципиальное значение для нашей модели, расширяется Земля или нет? Если да, то почему, а если нет, то какая сила, или какой физический закон заставляют поддерживать земной радиус неизменным?

Австралийского геолога С. Кери можно с полной уверенностью считать “главным специалистом” по расширяющейся Земле. Он, в заключение своей книги “The Expanding Earth”, так ответил на вопрос, который считал самым главным: «Empirically I am satisfied that the Earth is expanding. I do not know» (Я знаю, что Земля расширяется, но я не знаю почему).

Кери рассмотрел несколько возможных причин расширения Земли:

- фазовые переходы при постоянной величине массы (наш случай);
- уменьшение гравитационной постоянной;
- увеличение массы за счет преобразования энергии;
- изменение отношения  $e/m$  (заряда электрона к его массе).

Эту, последнюю, причину Кери назвал: “Universal null”. Здесь речь идет о том, что во Вселенной энергия сосуществует с массой и поэтому, если полная масса Вселенной возрастает, то это должно происходить и на Земле. Сам Кери считает главной причиной расширения Земли - “рождение” её новой массы  $m$  за счет аккумуляции Землей энергии  $E$  в соответствии с известной формулой Эйнштейна:  $E = mc^2$ , полагая, что может происходить:  $E \ll mc^2$ .

Это не такая уж новая идея. Её высказал более ста лет тому назад русский инженер И.О. Янковский. Он полагал, что Земля поглощает эфир, который преобразуется в земных недрах в весомую массу. После Янковского и, особенно после Эйнштейна, с его формулой:  $E = mc^2$ , эта идея неоднократно привлекала внимание геологов. На основании этой, в принципе ошибочной идеи, - была построена модель расширяющейся Земли, а сама книга «Веселов и др. Физико-геологические основы концепции глобального рифтогенеза. 1993», была рекомендована в качестве учебного пособия для студентов МГУ. Я не мог согласиться с тем, чтобы студенты учились на таких книгах, и был вынужден написать по поводу этой, и ещё одной, аналогичной книги, рецензию: «Правильны ли новые подходы к физике Земли? (Геология и геофизика, 1996)», в которой показал ошибочность подобных идей.

Кери полагал, что Земля расширяется с начального радиуса  $0.55 R$ . Надо сказать, что такой точки зрения придерживались многие геологи, но не все. По-видимому, этим авторам казалось, что если уж Земля и расширяется, то не вдвое же! Пусть себе расширяется немножко, а насколько, - это определяет каждый по своему разумению. Геологи, которые, если и допускали расширение Земли, но только «маленько, маленько», напоминают мне старшину из известного анекдота: “Рядовой спрашивает: - Товарищ старшина, скажите, а крокодилы летают? - Да что ты, рядовой, нет, конечно. - А вот товарищ майор сказали, что летают! - Ну, если товарищ майор сказали, то тогда летают, но - низенько, низенько!”.

Модель горячей расширяющейся Земли проще и нагляднее, если в момент образования её радиус был равен радиусу внешнего ядра, т.е.  $0.55 R$ . Однако это не столь принципиальный момент. Например, такие планеты, как Марс и Меркурий тоже расширялись (на Меркурии, похоже, этот процесс еще не завершился), но степень



увеличения их размера значительно меньше, чем на Земле. И всё же, расширяется Земля или нет? Напоминаю резко отрицательную реакцию академика А.Л.Яншина по этому поводу, о которой я писал в начале книги.

Полагаю, что надо ознакомить читателя с мнением чешского физика и астронома М. Бурши «К гипотезе расширения Земли. Геодезия и картография. 1993», который принимал во внимание условие сохранения неизменным общего момента вращательного и орбитального движения системы Земля-Луна-Солнце, и пришел к выводу, что Земля не расширяется. Бурша использовал данные астрономических наблюдений за 100 последних лет. Действительно, как следует из нашей модели, последний цикл расширения Земли происходил от 20 до 12 тыс. лет тому назад. В течение последних 12 тыс. лет Земля сжималась, а не расширялась. Поэтому вывод Бурши, без сомнения справедливый для последних 100 лет, нельзя распространять на всё время эволюции Земли.

Как известно, современная модель холодной Земли не отрицает факта спрединга, т.е. разрастания океанического дна. В модели горячей Земли этот факт тоже принят во внимание, более того, мы оговаривали, что спрединг - это “инструмент” расширения. Среди многих принципиальных различий между моделями холодной и горячей Земли отметим один, наиболее важный для нашей модели, - постоянство размера холодной Земли. Постулат постоянства земного радиуса автоматически привел к идее субдукции, так как необходимо куда-то “спрятать” часть земной коры равную той, которая образовалась при спрединге. *Постоянство радиуса Земли предполагается, но нигде, никогда и никем не доказывается.* Постоянство радиуса тем более странно, что в основе субдукции заложена крупномасштабная конвекция в мантии, которая, как известно, базируется на идее температурного расширения вещества, связанного с изменением его объема. Можно ли доказать, что Земля расширяется? Однозначный ответ на этот вопрос можно получить только после того, как на Земле начнется цикл расширения. До этого момента у человечества всегда будет повод сомневаться. Вспомним ситуацию с расширяющейся Вселенной. Эйнштейн так и не поверил, что выведенные им уравнения имеют нестационарные решения и только прямые наблюдения Хаббла показали, что Вселенная расширяется, а совсем не стационарна, как полагал А. Эйнштейн. Возвращаясь к нашей модели, одним из таких доказательств было бы признание справедливости нашей модели субдукции, как растекание литосферы, а не “ныряние” её в мантию, как это постулируется в плитной тектонике. Тогда объединение двух механизмов спрединга и субдукции (в нашей модели) могло бы служить доказательством факта расширения.

Свойство вещества адиабатически расширяться при охлаждении - хорошо изучено в области физики высоких плотностей энергии. Для этого вещество должно быть нагрето до очень высокой температуры и сжато внешним давлением до состояния с высокой плотностью. После прекращения нагрева и снятия внешнего давления, вещество расширяется и при этом охлаждается. Таким образом, процесс расширения вещества является следствием его первоначального нагрева. Этот фундаментальный принцип используется в нашей модели горячей расширяющейся Земли.

*Что нового и полезного может дать науке модель горячей Земли:*

1. Обсуждая проблему гравитационного поля Земли и изменения его со временем, мы показали, что Жизнь может возникнуть только в поле силы тяжести. Это означает, что она возникла на Земле и не могла быть привнесена из Космоса. Сила тяжести на Земле постепенно уменьшалась. Однако в течение эволюции Земли могли происходить и довольно резкие, её изменения. Например, резкое изменение силы тяжести в юрский период, возможно, послужило причиной глобальных вымираний.
2. В нашей модели предпринята попытка, решить “Проблему № 1 физики Земли” - проблему геомагнетизма. Она рассматривается нами не только как проблема генерации магнитного поля, как выяснение природы возникновения инверсий, западного дрейфа, джерков и всего прочего, чего объяснить пока никому не удавалось, да и невозможно

“увязать” эти явления в единую схему генерации. Совсем наоборот, мы рассматриваем эту проблему, как функционирование фазового перехода (ФП) “испарение-конденсация”, во многом аналогичного тому, что происходит в земной атмосфере. Геомагнитное поле возникает за счет образования и разделения электрических зарядов, их суточного вращения, возникновения слабого затравочного магнитного поля и его последующего усиления в области ФП, в F-слое (по модели). Смена режима ФП автоматически меняет полярность поля, а его функционирование как термодинамической системы связано с тепломассопереносами, образованием и дрейфом вихрей и т.п. Эти процессы, по сути тепловые, но они происходят в проводящей среде в магнитном поле, и мы, на земной поверхности, фиксируем их как явления геомагнетизма. Такой подход не только объясняет практически все явления геомагнетизма, но находит ответы и на вопросы о природе магнитных полей других планет и спутников Солнечной системы.

3. Согласно нашей модели горячей Земли, её недра находятся при очень высокой температуре, такой, что вещество внутреннего ядра представляет собой переуплотненный газ, внешнего ядра - конденсат этого газа, а мантии - конденсат в кристаллическом состоянии. По мере остывания, газ на границе внутреннего ядра конденсируется в жидкость, а жидкость кристаллизуется на границе ядро-мантия. Оба фазовых перехода экзотермические, они являются источником внутренней энергии Земли: её теплового потока, геодинамики и расширения, магнитного поля и т.п. Нестационарный характер охлаждения Земли является причиной возникновения циклического режима её эволюции. Наша модель находит естественное объяснение: равенству теплового потока на океанах и материках; причине корреляции суперхронов и суперплюмов; наличию теплового потока Юпитера и других планет и т.п.

4. Наша модель предполагает, что химический состав вещества Земли во всех её сферах однороден и одинаков с солнечным. Наличие водорода и водородных связей в веществе Земли позволяют объяснить ряд её характеристик, которые не находят объяснения в рамках холодной модели. Одна из таких, это континуальная зависимость скоростей сейсмических волн в мантии и ядре. Развиваемый подход позволяет найти решение таких задач, как проблема возникновения гранитов и их соотношение с базальтами; проблема концентрации химических элементов в земной коре и образование месторождений полезных ископаемых; проблема образования алмазов и других высокобарических минералов практически на земной поверхности, проблема образования и концентрации углеводородов и т.п.

5. Один из принципиальных моментов физики Земли состоит в том, из какого материала состоит ядро, как внешнее, так и внутреннее. Иначе, железное ли ядро Земли? Последние успехи сейсмологии позволили оценить скорость S-волн, проходящих через внутреннее ядро. Это дало возможность оценить величину коэффициента Пуассона. Оказалось, что он в полтора раза больше чем у железа. Этот факт, как и многие другие, например, постоянство скорости P-волн по радиусу внутреннего ядра, позволяет сомневаться в том, что ядро железное. В модели горячей Земли высказывается «безумная» идея относительно того, что внутреннее ядро представляет собой плазму в «кристаллическом» состоянии. Сегодня трудно рассчитывать на то, что подобная идея овладеет умами большинства геофизиков. Однако в будущем, после того как физики разберутся с веществом, находящимся в подобном («пятом») состоянии, эта идея может оказаться вполне тривиальной. В наше время поставлены эксперименты, в которых измерены скорости сдвиговых волн в кристаллической плазме, т.е. доказано, что плазма обладает свойствами твердых тел.

6. Согласно развиваемой модели, основной принцип, лежащий в основе эволюции Земли, заключается в минимизации гравитационного потенциала. Поэтому, Земля - шар, как звезды, планеты и спутники. Именно поэтому, после каждого цикла расширения, Земля стремится восстановить гидростатически - равновесную форму сфероида. Все геодинамические явления: движения плит, вулканизм, сейсмичность и т.д. являются

следствием действия этого принципа: Земля стремится минимизировать площадь своей поверхности, или иначе, минимизировать высоту геоида.

7. На основе подходов, развитых в модели горячей Земли, высказаны принципиально новые идеи по физике очага и сейсмичности, предложена ударно-волновая модель очага землетрясения. Её использование, возможно, позволит выявлять сейсмически опасные области и по-новому подойти к решению проблемы сейсмического микрорайонирования и прогноза землетрясений.

8. Земля рассматривается нами как открытая самоорганизующаяся фрактальная структура, способная достигать, время от времени, состояния самоорганизованной критичности. Как мы неоднократно отмечали, в основе её эволюции - функционирование ФП. Как известно, протекание фазового перехода подчиняется закону фликкер-шума. Очевидно, что и на Земле основной закон её саморазвития описывается фликкер-шумом. Наиболее известное воплощение этого закона в геофизике, это т.н. закон повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера. Пространственно-временные “срезы” функционирования и саморазвития Земли - фракталы, системы, обладающие нецелой размерностью. Фрактальная размерность уменьшается по мере саморазвития и перехода на более высокую степень самоорганизации.

9. В модели горячей Земли мы пытаемся найти связи между геооболочками как внутри Земли, так и между твердой Землей и ближайшим космосом: атмосферой, ионосферой и магнитосферой. В твердой Земле мы выявили взаимосвязь между фазовыми переходами, происходящими на границах внутреннего и внешнего ядра. Связь между ними реализуется через тепловые потоки и конвективные тепломассопереносы. Связь между твердой Землей и космосом осуществляются основными “агентами”: космическими лучами, электрическими и магнитными полями, а также с помощью акустических волн.

Можно ли считать, что модель горячей Земли нашла ответы на все вопросы, которые могут возникнуть в этой области науки? Нет, конечно. Разработка модели на более глубоком уровне ставит всё большее и большее количество вопросов, требующих ответов. Можно ли обозначить хотя бы некоторые из них? Конечно! Приведем, для примера, ряд невыясненных вопросов:

- действительно ли сейсмичность, вулканизм и дрейф материков подчиняются закону минимизации гравитационного функционала?
- действительно ли, что граниты есть только на Земле и Венере, и их нет на Марсе и Луне?
- было ли раньше магнитное поле у Венеры?
- имеется ли однозначная связь между анизотропией внутреннего ядра и морфологией геомагнитного поля?
- можно ли разработать физическую модель процессов взаимодействия электрических и магнитных полей и акустических волн на границе литосфера-атмосфера?
- действительно ли климатические катастрофы и характер эволюции «контролируются» экскурсами и инверсиями?
- насколько реальна идея, связывающая возникновение жизни с гравитацией?

Что следовало бы сделать в развитие идей, высказанных в этой книге:

- \* Получить решение cut-off для таких природных явлений как землетрясения, высота гор и пр. на основе модели негиббсовской термодинамики, предложенной Тсаллисом.
- \* Выяснить роль факта пространственных ограничений на возникновение этого явления. Оценить, насколько эта идея, следующая их модели самоорганизованной критичности, соответствует природе явления.
- \* Получить строгое решение и провести численное моделирование динамо модели F-слоя (двойное, несимметричное токовое кольцо), ориентируясь на модель холловского ионосферного динамо. Создать численные, гидродинамические трехмерные модели дрейфа магнитных полюсов, джерков и фокусов векового хода.

- \* Получить численное решение упругих свойств вещества внутреннего ядра находящегося в состоянии плазменного пылевого кристалла.
- \* Получить решение трехмерной задачи промерзания (задача Стефана) при кристаллизации внутреннего ядра Земли.
- \* Разработать математическую модель процесса самоорганизации Земли как структуры на базе использования принципа минимизации гравитационного потенциала, идей, высказанных Чао и Гроссом и уравнений самоорганизации типа уравнений Фокера-Планка.
- \* Провести численное моделирование задачи флуктуации термодинамических параметров в области критических частот, с целью получения понимания в вопросе о возможном механизме возникновения на поверхности Земли месторождений полезных ископаемых.
- \* Выполнить численное моделирование процессов зарождения ударной волны (УВ) на различных глубинах литосферы. Провести численное моделирование транспортировки УВ и образование очага, как области, излучающей объемные сейсмические волны. Моделировать выход УВ на поверхность и сильные движения грунта (макросейсмика).
- \* Провести численное моделирование разрушения магнитосферы и распад радиационных поясов в момент экскурса и инверсии и последующего возрастания уровня радиации на Земле, с целью выяснения проблемы изменений климата и эволюции жизни на Земле и, в частности, - человека.

Подобные вопросы можно продолжать до бесконечности, но и те, которые мы привели, показывают, что физика горячей Земли ещё не создана, а скорее только обозначена. Она открыта для пытливых исследователей. Я надеюсь, что эта книга поможет им найти себя в этой проблеме.

Имеет ли смысл развивать эту модель? Какая польза будет от этого человечеству? Отвечая на эти вопросы, в свое оправдание, хочу повторить слова, сказанные одним физиком: *«При нашем невежестве отрицать возможность полезного применения было бы самонадеянно в той же степени, в какой безответственно было бы гарантировать её».*

Закljučая книгу, хочу отразить аспект диалектики, тесно связанный с обсуждаемой проблемой. Декарт, Ньютон и др. сконструировали внутреннее устройство Земли, в центре которой находится горячее «солнечное» вещество. Это – утверждение. Исследования физики Земли второй половины прошлого века продемонстрировали отрицание этого утверждения. Более тщательный анализ экспериментальных данных и новый взгляд на эту проблему приводит нас к отрицанию отрицания.

И, наконец, мы говорили о модели горячей Земли. Решение такой глобальной задачи, как понимание природы Земли, не может ограничиться разработкой только модели. Требуется создание теории. Есть ли основание к этому? Надеюсь, что да. Главный аргумент «хорошей» теории, по мнению Нобелевского лауреата С. Вайнберга (Мечты об окончательной теории, 2004), состоит в том, чтобы теория была простой и «красивой». Красота теории, по его мнению, заключается в минимальном числе начальных посылок, предположений и условий, в то время круг рассматриваемых явлений – должен быть максимально широк. Неудача Эйнштейна в создании единой полевой теории, по мнению Вайнберга, состояла именно в том, что Эйнштейн ограничился только гравитацией и электромагнетизмом, упустив из внимания неизвестные ему тогда слабые и сильные ядерные силы.

Выдерживается ли это правило в нашей модели? По-моему, да. Действительно, развиваемая модель базируется на *единственном* (и вполне логичном) постулате: *Земля, как и все планеты, и спутники образовалась в одном процессе – рождении звезды – Солнца, и по единственному для всех космических объектов сценарию*. Все остальные моменты вытекают из этого – единственного. С другой стороны, все ли возможные явления, имеющие отношение к физике Земли, охватываются нашей моделью? Речь идет о таких явлениях как земной магнетизм, геодинамика, природа теплового потока, физика образования месторождений полезных ископаемых и т.п. В значительной степени, - да.

Выполнение этих условий: единственность и простота основного постулата, и широта рассматриваемых особенностей, дают надежду развить на базе обсуждаемой здесь модели - теорию Земли. Возможно, последнее обстоятельство дает некоторое основание считать всё то, что написано в этой книге, - *введением в теорию Земли*. В подтверждение этому, сформулируем некоторые закономерности, возможно, даже законы, следующие из нашей модели, подтвержденные опытом наблюдений:

1. Образование планет и их спутников происходит одновременно и в едином механизме с рождением звезды. Начальная температура планеты (спутника) определялась 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 полезных элементов формируются гигантские флуктуации их плотности – прообразов будущих месторождений полезных ископаемых.

2. Образование планет и спутников и их последующая эволюция проходят при действии 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 по градиенту высоты геоида.

3. Внутренняя энергия планеты и спутника обеспечивается функционированием двух экзотермических фазовых переходов (ФП): первый - на границе внутреннего ядра (конденсация - испарение), второй – на границе ядро-мантия (кристаллизация - плавление). Теплота первого ФП примерно в 20-30 раз выше, чем второго. Энергия ФП расходуется на создание теплового потока, дрейф континентов, образование океанов, генерацию магнитного поля и т.п.

4. 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 – смена режима спрединга на режим субдукции и т.д.

5. В цикле расширения материи, за счет спрединга океанического дна, - расширяются. При этом изменяется форма геоида. В цикле сжатия (в настоящее время) Земля стремится минимизировать свою гравитационную энергию, - уменьшая высоту геоида. Материки, при этом, движутся вдоль по градиенту геоида в направлении его нулевой высоты.

6. 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 комических лучей - за счет их участия в образовании дополнительного количества водного аэрозоля, вымывающего пыль, либо приводящего к слипанию её частиц. Усиление интенсивности космических лучей и увеличение естественного радиационного фона на Земле происходит в моменты переполюсовки (инверсии) геомагнитного поля, когда прекращается экранирующее действие поля. Увеличение фона приводит к генетическим мутациям и резким изменениям биологического разнообразия. В частности, развиваемый подход позволяет прогнозировать грядущее похолодание Земли.

И, наконец, согласно теореме Гёделя, которая утверждает, что полнота и непротиворечивость в рамках одной логической системы не сочетаются, модель горячей Земли, претендуя на возможную полноту картины, не может не содержать некоторых неясностей и даже противоречий. Основная идея состоит в доказательстве, казалось бы, очевидного факта, что все элементы Солнечной системы (звезда, планеты и спутники) образовались одновременно и в едином процессе. Этот вывод приводит к пересмотру системы взглядов на звезды, Коричневые карлики, большие и малые планеты и их спутники. Кроме этого, Основная идея, высказанная в книге, приводит к необходимости пересмотра привычных взглядов и представлений, присущих модели холодной Земли.