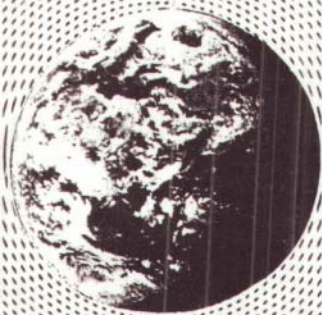


*В. В. КУЗНЕЦОВ*

**ФИЗИКА  
ЗЕМНЫХ  
катастрофических  
ЯВЛЕНИЙ**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

---

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Выпуск 809

---

В.В. КУЗНЕЦОВ

ФИЗИКА  
ЗЕМНЫХ  
КАТАСТРОФИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ

Ответственный редактор  
академик *А.С. Алексеев*



НОВОСИБИРСК  
"НАУКА"  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
1992

УДК 550.3

Физика земных катастрофических явлений / В.В. Кузнецов. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. — 95 с.  
ISBN 5—02—030045—4.

В монографии с позиции теории катастроф, природы солнечно-земных связей и разрабатываемой автором модели "горячей" Земли, рассматриваются возможные механизмы таких явлений, как сейсмичность Земли и физика очага землетрясения; природа вулканизма и физика магматического очага, физические явления, сопутствующие образованию ураганов и океанических течений.

Книга рассчитана на специалистов в области физики Земли.

Табл. 2. Ил. 45. Библиогр.: 96 назв.

#### Р е ц е н з е н т ы

доктор физико-математических наук *С.В. Гольдин*  
доктор геолого-минералогических наук  
и кандидат физико-математических наук *А.Н. Дмитриев*

Утверждено к печати  
Институтом геологии и геофизики  
СО РАН

1803020000—131  
К----- 325—92 I полугодие  
042(02)—92

©Издательство "Наука", 1992

ISBN 5—02—030045—4

Несколько лет тому назад автор этой книги получил приглашение от академика А.С.Алексеева принять участие в семинаре по катастрофическим явлениям. Тема выступления звучала примерно так: «Возможность катастрофических процессов в модели "горячей" Земли». Такая постановка вопроса для меня в то время была несколько неожиданной, так как мои интересы находились в области вопросов образования Земли и ее последующей эволюции, физики ядра и проблем генерации магнитного поля. Однако я согласился принять участие в семинаре и подготовил тезисы своего выступления. Не знаю, состоялся ли этот семинар, я, по крайней мере, участия в нем не принимал, но интерес к теме остался, причем как к физике этих явлений, так и к математической теории катастроф.

Природные катастрофы давно изучаются специалистами – и это естественно, естественно также то, что сейсмологи занимаются землетрясениями, вулканологи – вулканами, метеорологи – ураганами и т.д. В каждой из этих наук свои методы и подходы, и я не считаю возможным каким-либо образом подвергать их критике. Однако возникает вопрос: все эти явления уже объединены в один класс – катастроф, есть ли что-либо еще общее в физических и математических образах этих явлений? Возникает и такой вопрос: можно ли сказать что-либо принципиально новое о физике этих печально известных явлений с точки зрения развиваемой автором модели "горячей" Земли? Ведь согласно этой модели, Земля имеет активное внутреннее ядро, способное проявлять свою активность в магнитном поле и геодинамике на сравнительно малых временах.

Наиболее активно проблемой катастроф я стал заниматься после Спитакского землетрясения. Возник очевидный вопрос: что представляет собой землетрясение? У автора этой книги, не имевшего сейсмологического опыта, но работавшего ранее в области физики высокой плотности энергии, стала складываться несколько необычная концепция природы землетрясения и физики его очага. Идея состояла в том, что под действием внешней нагрузки среда становится акустически активной, а так как среда принципиально нелинейна, то в ней возможна генерация отдельных волн (солитонов, ударных волн), которые и являются причиной землетрясений. В ходе развития этой концепции оказалось возможным показать, что в другом случае, когда

также присутствует внешняя нагрузка, но в среде имеется расплав, образуется нечто, подобное волне, называемое кинком. Вероятно, такой подход окажется плодотворным для решения задачи физики магматического очага. Возможно также, что предлагаемые в этой книге подходы к задачам, связанным с физикой ураганов, и явления Эль-Ниньо, основанные на учете роли торможения Земли, окажутся также плодотворными.

Автор считал целесообразным ввести в книгу краткий обзор по математической теории катастроф и конфликтов. Хотя конкретных примеров использования этой теории в физике Земли еще очень мало, но они есть, и результаты достаточно интересны и обещающи.

По-видимому, каждый, кто работает в тех областях физики Земли, которым посвящена настоящая книга, согласится с утверждением, что сегодня ни у кого нет серьезных оснований считать, что он досконально понимает природу катастрофических явлений. Данный тезис служит некоторым оправданием автору, взявшему смелость высказаться по этой актуальной теме.

## ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ И КОНФЛИКТОВ

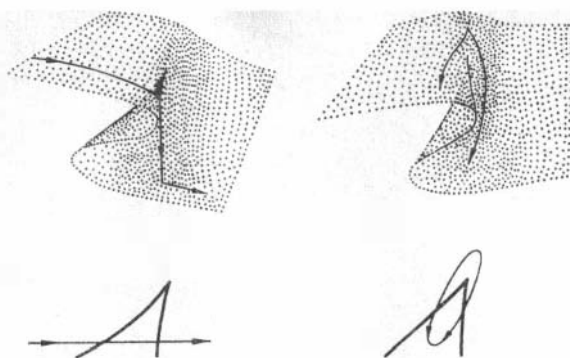
## 1.1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Большинство наблюдаемых нами явлений происходят достаточно плавно. Выходит и заходит Солнце, вращаются планеты, сменяются времена года и т.п. Но изменения происходят и скачком. Вдруг закипает вода, начинает таять лед, происходят землетрясения и извержения вулканов, рушатся дома... Спина верблюда, как мы знаем, выдерживает груз в  $n$  соломинок и внезапно ломается под  $(n + 1)$ -й.

Эти внезапные изменения вызываются обычно гладкими изменениями ситуации. Природа скачков бывает самой различной. Например, действующие силы постепенно нарастают до тех пор, пока не будет превышен предел прочности, после чего – разрыв. Есть критическая плотность популяции, ниже которой особи развиваются как кузнечики, а выше – как саранча; вот почему если саранча появляется, она появляется тучей. Внезапно изменяет свой репродуктивный ритм клетка и вдруг начинает удваиваться в ритме рака... [1].

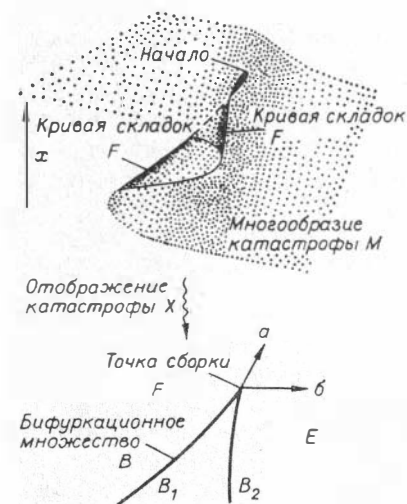
Решение подобных задач находится в области интересов раздела математики, получившего название теория катастроф. Математическая теория катастроф в ее современном виде обязана рождением французскому математику Ренэ Тома, который в 1972 г. опубликовал книгу "Stabilite structurelle et morphogenese". Это событие было поначалу воспринято как переворот в математике, естествознании, социологии... "Появились сотни научных и околонучных публикаций, в которых теория катастроф применяется к столь разнообразным объектам, как, например, исследования биения сердца, геометрическая и физическая оптика, эмбриология, лингвистика, экспериментальная психология, экономика, гидродинамика, геология и теория элементарных частиц. Среди опубликованных работ по теории катастроф есть исследования влияния алкоголя на водителей транспортных средств, устойчивости кораблей, восстаний заключенных в тюрьмах, поведения биржевых игроков..." [1, с. 54].

Чтобы понять, что такое теория катастроф, познакомимся вначале с элементами теории особенностей Уитни. Теория особенностей – это обобщение исследований функций на максимум и минимум [1, 56]. В теории Уитни функции заменены отображением поверхностей на плоскость. Отображения гладких поверхностей на плоскость весьма распространённое явление. Действительно, большинство наблюдаемых нами объектов обладают гладкими поверхностями, а отображение их в сетчатке глаза – это видимые нами контуры тел. Уитни заметил, что



Р и с. 1. Геометрия катастроф [56].

встречаются особенности лишь двух типов; более сложные разрушаются при малых деформациях отображения и приводятся в конечном счете к этим двум типам. Первый Уитни назвал складкой; типичный пример складки – отображение на плоскости сферы в районе экватора. Второй – сборка, ее можно представить в виде некоторой гладкой поверхности, частично свернутой таким образом, что поверхность располагается в двух горизонтальных плоскостях (рис. 1, 2). Поверхность в пространстве  $(x, a, b)$  удовлетворяет уравнению:  $x^3 + ax + b = 0$  (см. рис. 2). Особенность этой поверхности состоит в том, что при отображении ее на плоскости точки меньшей ее (свернутой) части имеют по три прообраза (в них проектируется три точки поверхности), а точки большей части – лишь по одному. При подходе к кривой из меньшей части проекции два прообраза сливаются и исчезают (в этом месте особенность – складка); при подходе к острию сливаются все три прообраза.



Уитни доказал, что сборка устойчива, т.е. всякое близкое отображение имеет в близкой точке подобную же особенность. Он также доказал, что всякая особенность гладкого отображения сложной поверхности распадается на складки и сборки.

В качестве примера применения теории особенностей приведем одну хорошо известную задачу из теории упругости. Рассмотрим горизонтальную линейку, концы которой закреплены, а сама она испытывает вес стоящего на середине линейки груза. Наряду с положением равновесия, при котором линейка прогнута гру-

Р и с. 2. Поверхность сборки [56].

зом, возможно также положение, при котором линейка выгнута дугой вверх, наподобие моста. При увеличении груза в некоторый момент происходит "катастрофа": линейка скачком переходит из одного состояния в другое.

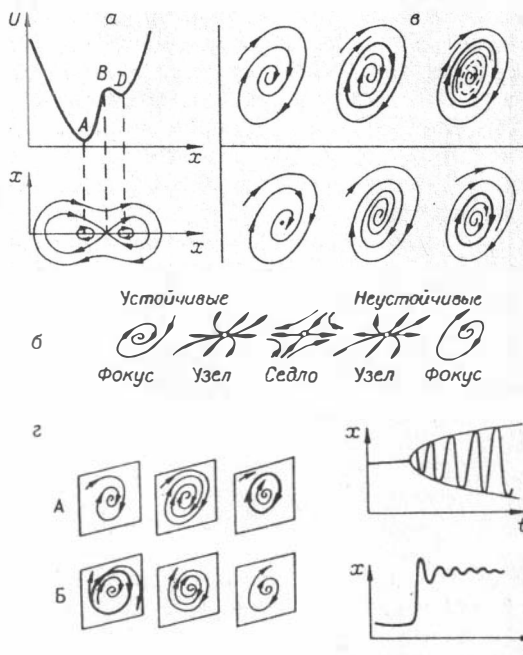
Проследим, каким образом аналогичную задачу можно отобразить на криволинейной поверхности и плоскости отображения. Представим себе, что нам необходимо двигаться по этой поверхности в направлении вдоль стрелки (см. рис. 1). Подходя к кривой складок (см. обозначения на рис. 2), мы претерпеваем прыжок. Этот прыжок, по нашей терминологии, и является катастрофическим явлением. Представим себе, что мы движемся в направлении, перпендикулярном предыдущему, и попадаем в точку, называемую точкой сборки; тогда у нас возникает две возможности продолжить движение: либо по верхней, либо по нижней части гладкой криволинейной поверхности. В теории катастроф такое раздвоение называется бифуркацией ("бифуркация" – "развилка", "раздвоение").

## 1.2. БИФУРКАЦИИ И АТТРАКТОРЫ

Операция бифуркации – это приобретение нового качества движениями динамической системы при малом изменении ее параметров [80]. Бифуркация соответствует перестройке характера движения реальной системы: физической, химической, биологической и т.п. Основы теории бифуркаций заложены А. Пуанкаре и А.М. Ляпуновым.

Знание особенностей характера бифуркаций позволяет провести исследования конкретных физических систем как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами; определить в пространстве параметров области их существования и устойчивости; предсказать параметры новых движений и т.п.

Один из распространенных примеров перестройки характера движения реальной системы – возникновение конвекции в горизонтальном плоском слое



Р и с. 3. Типы бифуркаций: а – шарик в потенциальной яме; б – устойчивые и неустойчивые состояния; в – рождение периодических движений; г – потеря устойчивости.



жидкости при достижении определенного перепада температуры между верхней и нижней поверхностями ячейки. Бифуркации делятся на три типа: бифуркации состояний равновесия, рождения периодического движения и смены устойчивости периодических движений. В дальнейшем нас будут интересовать бифуркации первого типа и в какой-то степени второго.

Бифуркации состояний равновесия, в свою очередь, включают: 1) слияние и последующее исчезновение двух состояний равновесия (пример: движение шарика в потенциальной яме с полочкой (рис. 3, а)); 2) рождение предельного цикла из состояния равновесия (так называемая бифуркация Андронова–Хопфа (см. рис. 3, в)); 3) рождение из одного равновесного состояния трех состояний равновесия.

Эволюционный процесс всех возможных бифуркаций описывается математически векторным полем в фазовом пространстве. Точка фазового пространства определяет состояние системы. Приложенный в этой точке вектор указывает скорость изменения состояния. Кривые в фазовом пространстве, образованные последовательным состоянием процесса, называются фазовыми кривыми [1, 56, 80]. Установившиеся колебания изображаются замкнутой кривой на фазовой плоскости. Эта кривая называется предельным циклом (см. рис. 3, в).

А. Пуанкаре показал, что поведение фазовых кривых в окрестности положения равновесия на фазовой плоскости наиболее сложно. В зависимости от направлений векторов, равновесие может быть устойчивым либо неустойчивым (см. рис. 3, б). Как мы отмечали выше, более сложные случаи бифуркаций могут превращаться при случайных возмущениях в более простые – основные (см. рис. 3, б). Выход некоторой физической (или любой другой) системы из положения равновесия, иначе – потерю устойчивости, можно представить в виде двух возможных случаев (см. рис. 3, з): а) после потери устойчивости равновесия устанавливается колебательный периодический режим (Этот вид называется мягкой потерей устойчивости.); б) перед тем, как установившийся режим теряет устойчивость, область притяжения этого режима становится очень малой и случайные возмущения могут выбросить систему из начальной области; при этом система выходит из стационарного режима скачком и перескакивает на иной режим движения. (Это жесткая потеря устойчивости.)

Установившиеся режимы движения получили название аттракторов, так как они "притягивают" соседние режимы. Аттрактор, "притягиватель" — притягивающее множество в фазовом пространстве. Аттракторы, отличные от состояний равновесия и состояний строго периодических колебаний, получили название странных аттракторов. Классический пример странного (стохастического) аттрактора – переход к турбулентности [41]. Считается, что на первой и второй бифуркациях возникновение странного аттрактора невозможно, однако на третьей он может образоваться (хотя это и не обязательно). Принято считать также, что если турбулентное движение уже установилось (течение "вышло на странный аттрактор"), то такое движение диссипативной системы (вязкой жидкости) в принципе не отличается от стохастического движения.

В работе [42, с. 23] по этому поводу утверждается следующее: "Математическим образом турбулентности является аттрактор или несколько аттракторов сравнительно малой размерности, вложенные в имеющее очень большую размерность пространство состояний гидродинамической системы. Движение на аттракторе чувствительно к начальным условиям, и эта чувствительность ответственна за наблюдаемое стохастическое поведение течения во времени".

Отличительным свойством диссипативной системы является возможность существования как аттрактора, так и репеллера. Если примером аттрактора может быть устойчивый фокус или устойчивый предельный цикл, то репеллером является отталкивающее множество точек. Таким свойством обладают, например, неустойчивый фокус и неустойчивый предельный цикл. Аттрактор, как и репеллер, является инвариантным множеством [23].

Стохастическая система – это система, которая совершает финитное движение; в конечной области ее фазового пространства имеется локальная неустойчивость; в системе существует процесс перемешивания, пусть не на всем фазовом пространстве, но на некотором его множестве. Кроме стохастического (странного) аттрактора, в ней может существовать и квазиаттрактор в следующем смысле: система сначала ведет себя как стохастическая, а затем ее траектория притягивается к регулярному (нестохастическому) аттрактору.

Странные аттракторы появляются при изменении параметров систем обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейной частью весьма простого вида. Такие системы встречаются в нелинейной оптике, физике плазмы, теории твердого тела, задачах экологии, биологии и т. д. Математических результатов, относящихся к теории странных аттракторов, сравнительно немного. Все они базируются на решении дифференциальных уравнений Навье–Стокса, либо уравнений Э.Лоренца, либо уравнений, описывающих систему двухдискового динамо Рикитакэ и т. п. [73].

Экспериментально изучать и исследовать сложную стохастическую и диссипативную систему, такую как Земля, по всей видимости, также целесообразно, используя странные аттракторы. Однако описать такую систему некоторым рядом дифференциальных уравнений пока невозможно, поэтому остается изучать ее свойства по фактическим данным. В последнее время появился ряд работ, в которых обосновывается возможность оценить размерность аттрактора фазового пространства системы по набору экспериментальных данных [7, 44].

Притягивающими многообразиями – аттракторами потока траекторий – может служить точка, что означает отсутствие движения (аттрактор нулевой размерности); замкнутая кривая – предельный цикл (аттрактор единичной размерности); двумерная поверхность – двумерный тор (размерность – двойка); трехмерный тор (размерность – три) обычно неустойчивый [7]. Траектории частиц исследуемой системы на аттракторах целой размерности ведут себя регулярным образом. Однако могут существовать аттракторы дробной размерности – фракталы, напоминающие (для малых размерностей) бесчисленно

продырявленный ковер или причудливо пористый объем (для больших размерностей). Траектории системы с аттрактором фрактальной размерности достаточно сложны. Знание о размерности аттрактора позволяет сделать вывод о степени стохастичности изучаемой системы. Наличие конечномерного аттрактора в сложной системе означает, что ее можно описать конечным числом параметров, т. е. простой динамической моделью. Бесконечномерный аттрактор характеризует абсолютно стохастическую систему (белый шум).

Формальное определение размерности аттрактора по поведению динамических переменных – весьма сложная задача, подход к решению которой наметился лишь в последнее время в связи с работами П. Грассбергера и И. Прокачия (ссылка в [7]), которые предложили практически реализуемый метод определения размерности аттрактора путем нахождения показателя степени пространственной корреляционной функции данной экспериментальной зависимости. Причем (повторим), если размерность аттрактора системы больше двойки, то она способна к резкому изменению своего поведения, иначе – способна к катастрофе. Этот интересный подход, как утверждается, позволяет по экспериментальной зависимости поведения системы, даже если в эксперименте не наблюдается резких изменений ее поведения, оценить способность системы к катастрофе.

### 1.3. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Один из значительных разделов, которые находятся в сфере изучения теории катастроф, это оптика и рассеяние света. Сюда можно отнести изучение физики таких явлений, как образование оптических каустик\*, миражей, радуги и т. п.

Эти разделы физики весьма интересны, и мы отсылаем желающих познакомиться с ними к фундаментальной книге [56], в которой в рамках теории катастроф они рассмотрены подробно. Здесь мы не будем касаться этих разделов, так как прямого отношения к объекту наших исследований они не имеют.

Остановимся на звуковых ударах и физике фазовых переходов. Наиболее простой и привычный пример образования звукового удара – преодоление самолетом так называемого звукового барьера [56]. Самолет производит массу возмущений воздушной среды (шум двигателя, отбрасывание воздуха в стороны и пр.), которые распространяются радиально от места возмущения. При малых скоростях движения самолета они распространяются вперед так же, как и назад, самолет не поспевает за ними (рис. 4, а). На сверхзвуковых скоростях самолет обгоняет их и получающаяся огибающая образует ударную волну (см. рис. 4, б). Вблизи самолета все много сложнее, чем показано на рисунке, имеются отдельные ударные волны от носа и хвоста и т. п., но на

---

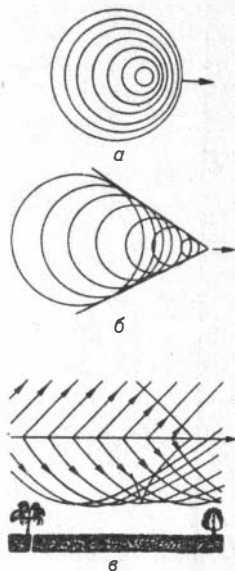
\* Каустика (жгучая) – явление в геометрической оптике, при котором световые лучи касаются резких, ярких кривых – собственно каустик. Название "жгучая" оправдывается, если каустика образована солнечным светом, сопровождающимся тепловым излучением.

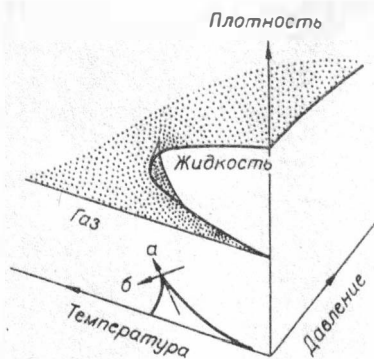
больших расстояниях такие эффекты роли не играют. В теории катастроф принято рассматривать ударную волну не как огибающую – она трактуется как волновой фронт в приближении геометрической оптики. Рисунок 4, б демонстрирует форму ударной волны в однородной спокойной атмосфере – это совершенный конус. В природе атмосфера далеко не равномерна и не спокойна. Воздух обычно теплее у земли, следовательно, скорость звука здесь выше. Значит, нижняя часть волнового фронта движется быстрее верхней, и поэтому она загибается вперед и, возможно, вверх. В результате, если самолет находится на достаточной высоте и движется со скоростью, немного превышающей скорость звука, то звуковой удар от него вообще может не дойти до земли. На рис. 4, в изображена иллюстрирующая этот пример каустика. К сожалению, эту каустику не всегда можно удержать над землей (при выполнении полетов сверхзвуковых самолетов), и тогда приобретает особую важность то свойство каустик, благодаря которому они получили свое название, – высокая интенсивность энергии. В принятой нами выше терминологии эта каустика: начало поворота "звуковых лучей" – каустика сборки, пересечение ударной волны с поверхностью земли – каустика складки. Отметим, что каустики, возникающие при сильной ударной волне, очень сложны, в то время как каустики слабых ударных волн не представляют большой сложности. Дело в том, что при сильных ударных волнах на каустике возникает интерференция волновых пакетов.

Следуя работе [56], обратим внимание на то, что к преломлению ударных волн приводят не только глобальные неоднородности в атмосфере, но и локальные, а именно турбулентности.

Возникает естественный вопрос: причем здесь теория катастроф? Согласно [56, с. 354], она "...дает новую информацию относительно того, какие случаи важны и требуют уточнения новых деталей; при этом у нас есть благодаря ей уверенность, что этих случаев конечное число".

Аналогично предыдущему, "привлечение теории катастроф в термодинамику, подобно большинству термодинамических процессов, произвело больше тепла, чем света" [56, с. 416]. Однако тем не менее авторы этой работы считают, что "теория катастроф должна входить необходимой составляющей в любое физическое толкование фазовых переходов" [Там же]. В физике фазовых переходов выражение "критическая точка" используется в смысле "точка, где производная функции обращается в нуль", как это принято в математике. В термодинамике это выражение обычно употребляется в более специальном смысле: "вырожденная критическая точка, являющаяся абсолютным минимумом".





Обычно принято описывать фазовые переходы через уравнения состояния. Воспользуемся уравнением Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) (V - \beta) = RT.$$

Здесь  $p$ ,  $V$  и  $T$  – соответственно давление, объем и температура данного образца, а  $R$  – постоянная. Константы  $\alpha$  и  $\beta$  подбираются из условия наилучшего согласия с экспериментом.

Произведем стандартную редукцию и замену переменных и придем к приведенному уравнению Ван-дер-Ваальса:

$$(p' + 3/V'^2) (V' - 1/3) = 8/3T',$$

где  $V' = V/V_c$ ,  $T' = T/T_c$ ;  $p_c, V_c, T_c$  – параметры критической точки. Положим:  $p = p' - 1, x = V' - 1/3, t = T' - 1, (V' = 1/x)$ . Уравнение примет вид

$$x^3 + \frac{8t + p}{3} + \frac{8t - 2p}{3} = 0$$

или

$$x^3 + ax + b = 0,$$

где

$$a = \frac{8t - p}{3}, b = \frac{8t - 2p}{3}.$$

Это уравнение описывает, как мы отмечали выше, поверхность катастрофы сборки (рис. 5).

Согласно [56, с. 420], "в том, что уравнение Ван-дер-Ваальса преобразуется в стандартное уравнение поверхности сборки, нет ничего случайного, случайна здесь лишь алгебраическая простота соответствующего преобразования..."

Авторы книги [56] рассуждают о принципиальной возможности "объединенного" асимптотического анализа, в котором фазовые переходы трактуются как каустики "волн вещества", из которого все состоит. Это рассуждение не столь неправдоподобно для случая, когда интегрирование ведется не по всему объему, а только в окрестности некоторой локальной точки, т. е. сам процесс интегрирования является близкодействующим. Более сложная ситуация возникает, когда необходимо интегрировать объемы принципиально далекодействующие.

#### 1.4. ДАЛЬНИЙ ПОРЯДОК

Одни и те же уравнения, описывающие взаимодействие (в общем случае) вещества и поля, могут давать различные результаты при равновесных и неравновесных граничных условиях. Приведем пример:

квантовая система – лазер, строится в предположении о неравновесности. Предполагается, что есть некоторый механизм, накачивающий атомы и переводящий их из основного в возбужденное состояние. Скорость накачки влияет на некоторый параметр системы (назовем его  $\sigma$ ) таким образом, что если накачки нет,  $\sigma = -1$ , очень быстрая накачка  $-\sigma = +1$ . При промежуточных скоростях накачки  $\sigma$  принимает промежуточные значения. Динамическая диссипативная система может характеризоваться еще каким-либо параметром, например амплитудой поля  $a$ , которая может быть каким-то образом определена через параметр  $\sigma$ . Подобные параметры ("параметры порядка") входят в каноническое уравнение многообразия катастрофы сборки [56]:  $x^3 - Ax - B = 0$ , где  $x$ ,  $A$  и  $B$  являются функциями  $a$  и  $\sigma$ .

Приведем несколько примеров, поясняющих суть понятия "параметр порядка". Если имеется пространственная корреляция микроструктуры вещества в пределах одного образца – имеем дальний порядок (упорядоченная фаза), если в области с конечным радиусом корреляции, – ближний (неупорядоченная фаза). Фазовый переход из неупорядоченной фазы в упорядоченную может быть переходом первого или второго рода. Упорядочение может быть координационное (в расположении частиц вещества), ориентационное (в ориентации частиц), магнитное (упорядочение в ориентации магнитных моментов) [80].

В жидкости вероятность пребывания атома в точке с пространственной координатой  $r$  или ее удельная плотность в среднем одинаковы, т. е. удельная плотность  $\bar{\rho}$  не зависит от  $r$ . В жидкости тем не менее существует корреляция в расположении соседних атомов. Корреляционная функция, описывающая отклонение  $\rho$  от  $\bar{\rho}$  ( $\delta\rho$ ) в различных точках жидкости:  $\varphi(r - r') = \delta\rho(r)\delta(r')$  отлична от нуля при  $r - r' < R_c$  ( $R_c$  – радиус корреляции). Таким образом, атомы жидкости на расстояниях меньше  $R_c$  образуют ближний координационный порядок. Параметр порядка в этом случае – отклонение  $\rho$  от  $\bar{\rho}$ .

При кристаллизации этой жидкости возникает периодическая пространственная модуляция  $\rho$ , так как атомы в кристаллах занимают положения, отвечающие узлам кристаллической решетки. В результате отклонение плотности от средней  $\rho(r) - \bar{\rho}(r)$  становится периодической функцией координат. Это означает, что в кристаллах имеет место дальний координационный порядок.

Другой пример координационного упорядочения дают сплавы. Например, сплав, содержащий равные количества Cu и Zn, имеет простую кубическую решетку. При высоких температурах ( $T > T_c$ ,  $T_c$  – температура фазового перехода) в результате диффузии ее узлы заняты с равной вероятностью атомами Cu и Zn и средняя удельная плотность атомов Cu однородна, т. е.  $\rho_{Cu}$  не зависит от координат узла (неупорядоченная фаза). Если ввести параметр порядка  $\eta(r) = \rho_{Cu}(r) - \rho_{Zn}(r)$ , то при высокой температуре  $\eta(r) = 0$ , а при низкой  $-\eta(r) = \pm 1/2(\bar{\rho}_{Cu} - \bar{\rho}_{Zn})$ . При  $T > T_c$  дальнего порядка нет, но ближний есть, при приближении к  $T_c$  ближний порядок превращается в дальний.

Приведем еще ряд примеров. В изотропной жидкости, состоящей из анизотропных, но случайно ориентированных молекул, может происходить фазовый переход в анизотропную жидкость, в которой молекулы имеют преимущественную ориентацию (жидкие кристаллы). Это так называемое ориентационное упорядочение. Параметром порядка при этом может быть спонтанная поляризация, или константа анизотропии диэлектрической проницаемости. Параметр порядка равен нулю в изотропной жидкости и отличен от нуля в жидком кристалле.

Магнитное упорядочение состоит в том, что магнитные моменты атомов, ориентированные при высокой температуре в разных точках независимо (парамагнетик), при понижении температуры ниже точки Кюри упорядочиваются и имеют одинаковое направление и ориентацию (ферромагнетик). Параметром порядка в ферромагнетике является намагниченность.

Как правило, параметр порядка вычисляется по косвенным экспериментальным данным, однако в ряде случаев возможно его прямое определение: например, намагниченность и спонтанная поляризация. Есть возможность определения параметра порядка, например, при рентгеновском структурном анализе. В случае дальнего порядка рентгенограммы обнаруживают узкие брегговские пики, интенсивность которых пропорциональна квадрату объема образца. В случае ближнего порядка эти пики "размываются" на ширину, обратно пропорциональную корреляционному радиусу  $R_c$ . Методы комбинационного рассеяния света позволяют различать ближний и дальний порядок, если есть возможность исследовать коллективные колебания достаточно низких частот, так как высокочастотные колебания существуют и в случае ближнего порядка (например, сдвиговые волны в жидкости) [80].

### 1.5. ТЕОРИЯ КОНФЛИКТОВ

Представим себе ситуацию: мы убеждены в том, что разобрались в природе, т. е. физике какого-либо явления. Пусть это будет катастрофическое явление, например землетрясение. Мы считаем, что, контролируя тот или иной параметр или сумму параметров, мы можем осуществлять прогноз этого явления. Более того, у нас, например, функционирует эргатическая система контроля этих параметров\*. Происходит катастрофа, а наша система, оказывается, не предупредила нас о ней заблаговременно – возникает явно конфликтная ситуация. Попытаемся разобраться в сути этого конфликта, используя для этой цели теорию конфликта [17].

Что же такое конфликт в том понимании, в котором имеет смысл пользоваться им в нашей задаче? Конфликт – это столкновение между непознанной "Природой" в ее катастрофических проявлениях и системой контроля и предупреждения (прогноза) самого факта катастрофы. Для описания конфликта мы будем пользоваться не только качествен-

---

\* Эргатическая система – сложная система управления, составной элемент которой – человек-оператор.

ными, но и количественными правилами, теоремами и законами. Алгоритмы и логические операции предполагают возможность формализации коллизий конфликта. Сосредоточим свое внимание на оценке возможности предсказания катастрофического явления, так как мы определили выше, что наш конфликт состоит именно в том, возможно или нет, а если возможно, то насколько, предсказать это явление, т. е., иначе, определить его "предсказуемость".

Рассмотрим понятия "предсказуемость" и "слабопредсказуемость", основываясь, с одной стороны, на теории конфликта [17, с. 12], а с другой – на сути поставленной нами задачи. Пусть исследуемая система включает "Природу" в интересующем нас проявлении (землетрясения, вулканы и т. п.) и организацию мониторинга геофизических параметров, включающую блок принятия решения по прогнозу проявлений "Природы". Будем описывать функционирование этой системы уравнением  $Ky = Hx$ , где  $x(t)$  и  $y(t)$  – векторные переменные (изменяющиеся параметры "Природы" и контролируемые при мониторинге геофизические величины), а  $K$  и  $H$  – операторы, т. е. совокупность частных производных этих переменных во времени, например,  $K = \partial/\partial t$ ,  $H = f$ , где  $f$  – вектор-функция,  $y = x, x = f(x)$  при  $t = 0, x(0) = x_0$ .

Возможны три ситуации.

1. Если: 1)  $y = y_1$  при  $x = x_1, x(0) = x_0$ ;

2)  $y = y_1 + \delta(\Delta)$  при  $x = x_1 + \Delta$  (либо  $x = x_1, x(0) = x_0 + \Delta$ ),  $[(\forall \Delta \leq \Delta_0)(\delta \leq \delta_0)]$ , что означает: каждая  $\Delta \leq \Delta_0$  и  $\delta \leq \delta_0$ . В этом случае система детерминированна и предсказуема.

Несколько пояснений. Если регистрируемые изменения геофизических величин ( $y$ ) достигают значений  $y_1$  при изменении параметров "Природы":  $x = x_1$ , начиная с некоторого нулевого уровня  $x_0$ , причем таким образом, что на приращение значения параметра "Природы"  $\Delta(x_1 + \Delta)$ , геофизические величины "отвечают" измеряемым приращением  $\delta$ , которое является зависимым от  $\Delta[\delta(\Delta)]$ , то система детерминированна и предсказуема.

2. Если: 1)  $[\exists !p_1(y_1)] \wedge \langle y \rangle = y_1$  при  $x = x_1, x(0) = x_0$ , где  $p_1$  – распределение вероятностей значений  $y_1, \langle \cdot \rangle$  – математическое ожидание.

2)  $[\exists !p_1(y_1)] \wedge (y = y_1 + \delta(\Delta))$  при  $x = x_1 + \Delta$  (либо  $x = x_1, x(0) = x_1 + \Delta, \forall \Delta \leq \Delta_0$ ),  $\langle \delta \rangle = \langle \delta(\Delta) \rangle$ , то система вероятно предсказуема.

Аналогично предыдущему: существует и единственна некоторая вероятность значений параметра  $y_1$ ; средняя величина (математическое ожидание) этого параметра ( $y_1$ ) есть  $y_0$  при заданном значении  $x = x_1$  и при изменении значения вероятности величины ( $y_1$ ) на  $\delta$ , которая, в свою очередь, имеет некоторую вероятность быть зависимой от  $\Delta$ , причем каждая величина  $\Delta$  не может быть больше некоторой заданной  $\Delta_0$ ; среднее значение (математическое ожидание) величины  $\delta(\langle \delta \rangle)$  может быть оценено через  $\langle \delta(\Delta) \rangle$ , а система вероятно предсказуема.



3. Если: 1)  $y = y_0$  (либо  $[\exists! p_1(y_1)] \wedge (<y_1> = (y_{10}))$ ) при  $x = x_1$ ,  $x(0) = x_0$ ;

2)  $y = y_1 + \delta$  (либо  $[\exists! p_1(y_1)] \wedge (<y_1> = y_{10} + \Delta)$ ) при  $x = x_1 + \Delta$  (либо  $x = x_1$ ,  $x(0) = x_0 + \Delta$ ), но для любого, сколь угодно малого, но конечного  $\Delta \delta < \delta_*$ , причем  $\delta$  не зависит от  $\Delta$ , то система слабопредсказуема.

Так же, как выше, дадим несколько пояснений. Существует и единственна ( $\exists !$ ) некоторая вероятность ( $p_1$ ) наличия величины  $y_1$ , математическое ожидание которой  $y_{10}$ . Если величина  $x$  изменяется на  $\Delta$ , то и  $y$  возрастает (убывает) на  $\delta$ . Причем если  $\delta$  не зависит от  $\Delta$ , то система практически не предсказуема.

Таким образом, если  $\delta$  зависит от  $\Delta$ , то есть возможность однозначно предсказать результат, если  $\delta$  вероятностно зависима от  $\Delta$ , то есть некоторая вероятность его предсказания, если же  $\delta$  и  $\Delta$  независимы, то предсказание результата (в нашем случае – прогноза) невозможно. Очевидно, что в последнем случае построение системы  $ky$  не имеет смысла.

## Глава 2

### КАТАСТРОФЫ НА ЗЕМЛЕ

Обсуждая проблему физики земных катастрофических явлений, мы не можем не остановиться на истории возникновения и развития в геологии научного течения – катастрофизма и его взаимосвязи с антагонистическими течениями, в частности с градулизмом. Мы должны также определить тот класс земных катастрофических явлений, которые в дальнейшем будут рассмотрены нами подробнее.

#### 2.1. УНИФОРМИЗМ И КАТАСТРОФИЗМ

Как известно, один из основателей геологической науки сэра Чарльз Лайель в своей книге "Принципы геологии" (1830-1833 гг.) изложил систему взглядов на Землю и ход ее развития. Он основывался на идеях ньютоновского космоса: "Как все планеты обращаются по круговым орбитам непрерывно и равномерно, бесконечно повторяя свой путь, так должна вести себя и Земля – изменяющаяся, но вечная планета, собственная история которой представляет, выражаясь современным языком, динамический стационарный процесс" [11, с. 13–14]. Согласно мировоззрению Лайеля, история Земли и геологические процессы должны подчиняться двум главным принципам: постепенности (gradualism) и ненаправленности (nondirectionalism).

Лайель провозгласил "принцип единообразия" (униформизм), сделав его своим главным оружием в борьбе против катастрофизма. Хотя, казалось бы, почему не допустить, что поверхность планеты сформировалась преимущественно за счет катастрофических явлений, в частности метеоритных ударов. Это в значительной степени именно так и происходило у планет земной группы и спутников.

Другой основатель современной геологии Джеймс Геттон (1726 – 1797), "...допустив равномерный ход и постоянство природных процессов, ...получил... основание для вывода о том, что для осуществления тех событий, результаты которых мы сейчас наблюдаем, неизбежно требовалось какое-то время [82, с. 44]. В результате анализа геологических данных, отнесенных к истории эволюции Земли, он приходит к неординарному выводу, что "...мы не находим ни следов начала, ни признаков конца" [Там же].

Лайель и Геттон считаются униформистами. Униформизм (единообразие) – научное течение, в котором С. Дж. Гулд выделяет две подкатегории. 1) Единоеобразие закона. Физические законы неизменны во времени и в пространстве. Это очевидное априорное методологическое допущение, необходимое для научных исследований. 2) Единоеобразие процесса (актуализм). Принцип актуализма состоит в том, чтобы объяснять прошлые результаты как следствия факторов, еще действующих на Земле. Это также априорное методологическое допущение, разделяемое большинством ученых. 3) Единоеобразие скорости изменения (градуализм). Лайель и его последователи абсолютизировали этот принцип, хотя очевидно, что это не исходная предпосылка метода. Это определенное эмпирическое суждение об окружающем нас мире. Оно может быть правильным, а может быть и ложным. Его необходимо подвергать проверке, а не принимать на веру. 4) Единоеобразие условий (ненаправленность, динамический стационарный процесс). Единоеобразие условий отнюдь не обязательное допущение, а поддающееся проверке суждение о реальном мире.

Первые два принципа катастрофисты не отвергали, они расходились с униформистами в предметных вопросах – в отношении к третьему и четвертому принципам единоеобразия. Катастрофисты отрицали единоеобразие скорости изменения, так как многие особенности строения Земли они связывали с действием глобальных процессов, происходящих на Земле в целом, а не с накоплением мелких изменений, как это делали униформисты. "Небулярная гипотеза и вытекающее из нее представление о непрерывно остывающей Земле объясняли динамику как направленного развития, так и внезапных глобальных катастроф. По мере остывания Земля сокращалась в размерах и ее более жидкая внутренняя часть отходила от жесткой коры. Нарастание неустойчивости приводило к обрушению коры на сжавшиеся недра, вдоль крупных сколов нагромождались линейные горные пояса, при этом большая часть живых организмов уничтожалась. Новые создания вынуждены были приспосабливаться к менее благоприятному холодному климату, организмы, чтобы выжить в более суровой обстановке, должны были становиться все более сложными" [11, с. 18–19].

Одним из первых геологов, которого не устраивали принципы униформизма, был Жорж Кювье (1769–1832). Он, изучая сравнительную анатомию ископаемых позвоночных, сформулировал "закон корреляций частей организма", в котором "...содержалось сенсационное утверждение, основанное на изучении ископаемых слонов и гигантских ленивцев, что часть организмов вымерла" [82, с. 51–52].

\* Actual (франц.) – относящийся к настоящему времени.

Это открытие в последующих исследованиях находило все большее подтверждение. Далее Кювье в своих работах показал, что "...участки, некогда представлявшие собой сушу, несколько раз затопливались водой в результате вторжений моря или в ходе скоротечных наводнений... Исключительно важно отметить, что эти повторяющиеся вторжения и отступления ни в коей мере не происходили постепенно. Напротив, порождающие их катаклизмы возникали по большей части внезапно..." [Там же, с. 53].

Последователь Кювье Леонс Эли де Бомон (1798–1874), изучая смятые в складки слои горных хребтов, обнаружил, что самое интенсивное горообразование в Пиренеях имело место между меловым и третичным периодами, т. е. в период массового вымирания фауны. В результате обобщений он пришел к выводу, "...что вымирание могло вызываться поднятием горных хребтов, если оно было достаточно резким" [82, с. 55]. Важный вывод, к которому пришел Эли де Бомон, состоит в том, что на Земле "...длительные периоды пассивности внезапно прерывались относительно кратковременными поднятиями суши или стремительными вторжениями моря" [Там же]. Земля по мере охлаждения (по Эли де Бомону) сжимается, что вызывает смятие слоев в складки и поднятие горных хребтов. Вулканизм также проявлялся более интенсивно в прежние времена, когда Земля была сильнее разогрета.

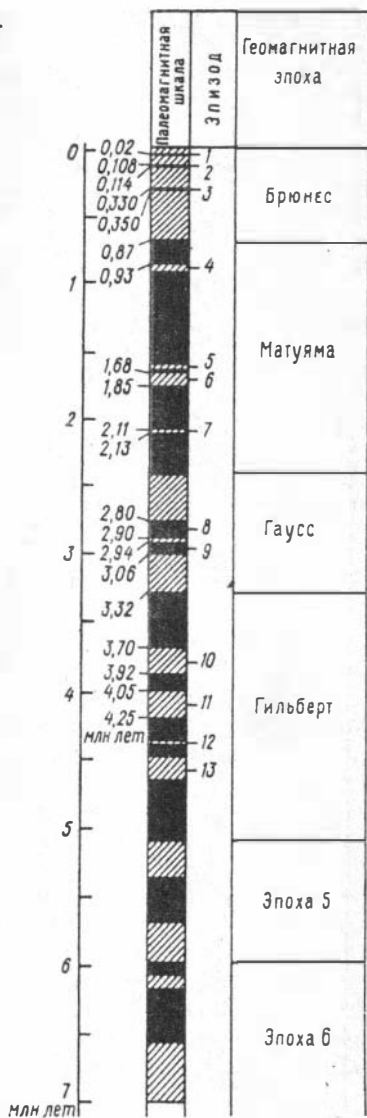
И униформизм, и катастрофизм как научные направления были несвободны от недостатков и подвергались критике их приверженцев. Отметим, что велись эти споры примерно полтора столетия тому назад, причем на ученых в то время сильное влияние оказывали религиозные догмы, особенно великий потоп. Тем не менее современная оценка этих течений, в частности градулизма, по мнению С. Дж. Гулда [11], позволяет считать градулизм серьезным препятствием для развития геологии, не имеющим никаких доказательств на "каменном материале". В противоположность сказанному он считает, что важные процессы развития Земли происходили путем прерывистого изменения, и в этом плане "...катастрофисты с их приверженностью к эмпирическому буквализму сумели постичь существенную черту в развитии природы" [11, с. 22]. Завершая краткий экскурс в область истории геологических споров, процитируем размышления П.И. Гретенера по поводу так называемого "редкого события" в геологии: "В истории Земли обнаруживаются долгие периоды спокойствия, прерываемые моментами действия" [10, с. 97].

## 2.2. КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЛЕТОПИСИ

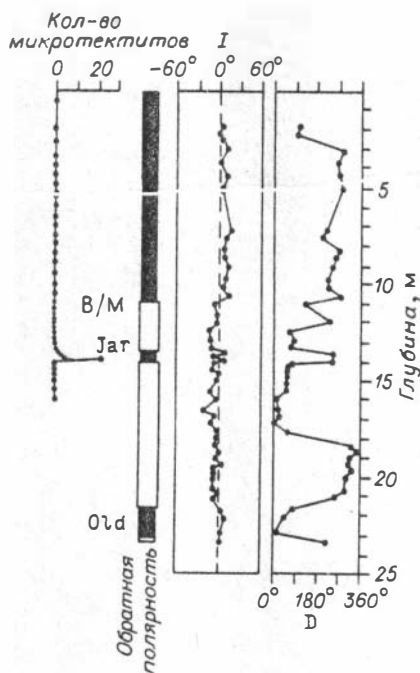
Проиллюстрируем сказанное выше на ряде конкретных примеров катастрофических процессов (КП) из истории эволюции Земли. По возможности будем указывать на процессы, сопутствующие катастрофическим. Как мы выяснили, к КП относятся массовые вымирания, потопа, орогенные процессы, сильные разрушительные землетрясения, вулканические извержения и ураганы.

Р и с. 6. Магнитохронологическая шкала за последние 7 млн лет [55].

Изучение явлений тектогенеза и ритмики геомагнитных инверсий показало, что в течение фанерозоя существовали, сменяя друг друга, три режима геомагнитного поля: относительно стабильное поле обратной полярности, относительно стабильное поле прямой полярности, возбужденное поле с многократными частыми инверсиями. Режим эволюции геомагнитного поля (рис. 6) соответствует геологическим эпохам, несколько опережая последние [2]. Связь режима геомагнитных инверсий с явлениями геотектоники не ограничивается отмеченной корреляцией. Было обнаружено, что этапы быстрых сдвигов палеомагнитных полюсов совпадают с эпохами максимальной тектономагматической активности. Оказывается, что тектономагматическая и вулканическая активность Земли коррелирует не только с ее магнитной активностью, но непосредственно связана и с климатом. Хорошо известно, что вулканизм заметно влияет на прозрачность земной атмосферы. Огромные массы пепла, измеряемые миллиардами тонн, выбрасываются вулканами в верхние слои атмосферы, а затем разносятся воздушными течениями по всему земному шару. Так, например, через несколько суток после извержения в 1956 г. влк. Безымянного его пепел был обнаружен в верхних слоях тропосферы над Лондоном [61]. Пепловый материал, выброшенный во время извержения в 1963 г. влк. Агунг на о. Бали (Индонезия), был найден на высоте 20 км над Сегунг в Америкой и Австралией [Там же]. Загрязнение атмосферы вулканическим пеплом вызывает значительное уменьшение ее прозрачности, кроме этого частицы пепла служат ядрами конденсации, способствуя большому развитию облачности. Увеличение облачности, в свою очередь, заметно уменьшает солнечную радиацию. По расчетам, увеличение облачности с 50 до 60 % приводит к понижению среднегодовой температуры на земном шаре на 2° [Там же].



Эпоха 5  
Эпоха 6

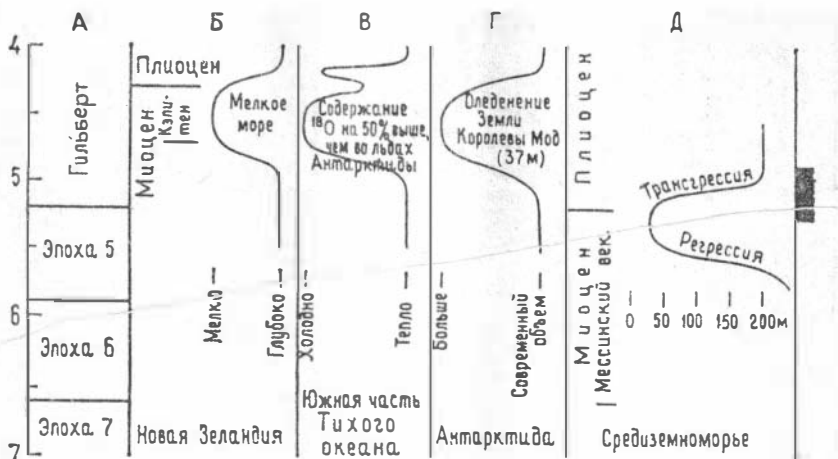


По-видимому, одним из доказательств приуроченности повышения вулканической активности к обратной полярности МПЗ можно считать обнаруженную недавно корреляцию между интенсивностью выпадения микротектитов и обратной полярностью поля в эпоху Брюнес — Матуяма и Харамильо [92]. Сам факт наличия тектитов авторы связывают с увеличением вулканической активности (рис. 7).

Приведем еще несколько примеров геологических корреляций. Так, например, Н.А. Мернер исследовал катастрофическое событие, имевшее место на Земле на рубеже эоцена и олигоцена, когда наблюдалось крупное похолодание, падение уровня моря и

уменьшение разнообразия форм фауны [45]. Он пришел к выводу, что в основе интересующих его явлений лежало изменение формы геоида, которое, по его мнению, могло быть вызвано орогенезом или перемещением плит. Далее Н.А. Мернер рассматривает ряд других катастрофических событий, имевших место на Земле. Все они "укладываются" в общую схему: регрессия — изменение растительности — фаунистическое вымирание. Причины — понижение геоида под континентами, понижение уровня грунтовых вод, засушливость климата.

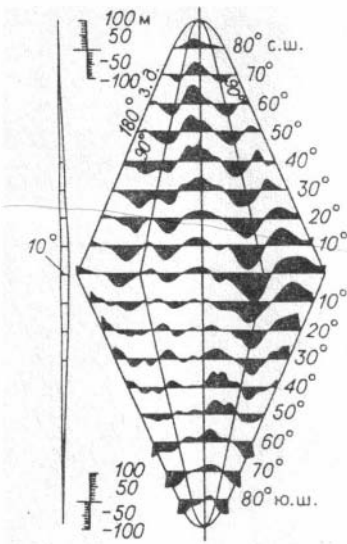
Рассмотрим несколько конкретных примеров геологических катастроф, оставивших "следы" в каменной летописи на Земле за последние 5 млн лет. Однако прежде кратко остановимся на так называемой магнитной "шкале времени". В настоящее время принято "привязывать" геологические события, имевшие место в прошлом, к магнитохронологической шкале (см. рис. 6). Из рисунка видно, что на фоне меняющихся магнитных эпох происходят сравнительно коротко-периодные эпизоды. Так, например, в современную эпоху Брюнес происходило три эпизода, каждый длительностью 8, 6 и 20 тыс. лет (соответственно 1, 2 и 3-й эпизоды). Обратим внимание на то, что в каждом из них происходило либо полное изменение полярности МПЗ — инверсия, либо неполное, называемое магнитологами экскурсом. Согласно магнитохронологической шкале, самое последнее катастрофическое событие, имевшее место на Земле и называемое Лашамп [55] (хотя встречается и другое название — Гетеборг [46]), состоялось



Р и с. 8. Событие на границе миоцена и плиоцена [46].

от 20 до 12 тыс. лет тому назад. К этому периоду оказались приуроченными такие события, как: 1) аномальное понижение уровня моря на 200–240 м и последующий резкий его подъем [46]; 2) понижение температуры и наступление ледников в Северной Америке и на севере Европы [46]; 3) резкое усиление вулканической деятельности, обнаруженное по анализу проб льда на станции Берд в Антарктиде [38]; 4) библейский потоп и возможная гибель Атлантиды [9].

Это событие – единственное, которое происходило на памяти цивилизованного человека, так как предыдущее (Блейк, около 100 тыс. лет тому назад) "попадало" на малоцивилизованное человечество. Событие Блейк происходило примерно от 114 до 106 тыс. лет тому назад: 1) сведения об уровне моря для него противоречивы, а именно – 70-метровая регрессия на Новой Гвинее и 50-метровая трансгрессия на Гавайях, очень слабая регрессия в Средиземном море и практически никакого изменения у о. Барбадос [46] (автор этой работы считает, что подобные незакономерные изменения уровня моря фиксируют изменения формы геоида); 2) зафиксированы изменения параметров Миланковича, однако нет данных об оледенениях в этот период. Наиболее полно в этом плане исследовано событие, которое имело место при смене эпохи 5 на эпоху Гильберт. При этом полярность магнитного поля, как и в предыдущих случаях, изменялась от современной к противоположной (рис. 8). Это событие соответствовало: 1) смене миоцена на плиоцен; 2) регрессии и следующей за ней трансгрессии в Средиземноморье; 3) оледенению Земли Королевы Мод в Антарктиде; 4) похолоданию в Антарктиде; 5) регрессии и последующей трансгрессии в Новой Зеландии (черная полоса у правого края рисунка означает крупную геомагнитную инверсию). Н.А. Мернер связывает возможную причину наблюдаемых явлений с "...изменением в области перехода между ядром и мантией". В свою очередь эти изменения каким-то образом влияют на форму геоида, что в конечном



счете приводит к перераспределению уровня океана и, следовательно, к наблюдаемым регрессиям и трансгрессиям. Одновременно эти изменения вызывают рост вулканизма, что определяет изменение параметров Миланковича, похолодания и оледенения...

Как обнаружил Мернер, в некоторых районах земного шара уровень океана повышался, а в некоторых одновременно понижался. Причина этого, возможно, действительно заключается в изменении формы геоида (рис. 9). Мы не будем сейчас обсуждать, почему может измениться высота геоида, однако, если, к примеру, "надавить" изнутри земного шара в районе Новой Гвинеи, то в этом месте высота

геоида увеличится, а глубина моря уменьшится (регрессия). Одновременно в районах минимальных высот геоида (на Гавайях) будет наблюдаться трансгрессия – увеличение глубины. Вполне возможно, что все подобные изменения могут произойти в Тихом океане, а на о. Барбадос уровень моря не изменится, что и наблюдалось во время события Блейк.

Итак, на Земле происходили глобальные катастрофические явления: массовые вымирания, оледенения, потопа, периоды интенсивного вулканизма, магматизма, сейсмичности и горообразования. Некоторые из этих явлений наблюдаются и в настоящее время. И хотя их масштаб меньше, тем не менее последствия природных катастроф весьма трагичны для человечества. Люди так и не научились ни бороться с катастрофами, ни предсказывать их. Несмотря на то, что ежегодно тратятся значительные средства на познание природы катастроф, понимания физики явлений так и нет. Поэтому, естественно, нет и не может быть эффективного научного прогноза их возникновения, нет и не может быть эффективной защиты от их разрушительного действия.

Мы рассмотрим здесь некоторые из названных явлений: землетрясения, извержения вулканов, образование ураганов и океанических течений. Потопа, оледенения, инверсии магнитного поля, блуждания полюсов будут обсуждаться в контексте общих моделей Земли и солнечно-земной физики. Метеориты, вспышки сверхновых звезд и другие события, причины которых выходят за рамки собственно Земли и Солнца, мы обсуждать не будем. Автор искренне надеется, что предлагаемые им физические модели катастрофических процессов хотя бы немного помогут в решении столь важной и серьезной задачи, как выяснение природы земных катастроф.

Таким образом, анализируя земные катастрофические явления, мы приходим к выводу, что при построении модели Земли, а также при построении моделей процессов, "контролируемых" Землей и Солнцем, мы должны найти возможную причину возникновения на стационарном фоне сравнительно быстрого и интенсивного процесса. Это явление, как мы показали, затрагивает изменение полярности магнитного поля Земли, изменение формы земного геоида, появление интенсивного вулканизма и сейсмичности, изменение климата и т. д.

## Глава 3

### СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

#### 3.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Наша цель – обсудить в этой главе возможные и в то же время физически непротиворечивые модели процессов, происходящих в недрах Земли, в ее ядре, мантии и коре (так называемых эндогенных процессов), а также модели процессов, происходящих на поверхности и в глубине Земли, определяемых в значительной степени Солнцем и его воздействием на Землю, а также воздействием Луны и другими возможными "космическими" причинами. Так как в книге определено, что объект наших исследований – катастрофические явления, то будем обсуждать физические модели именно этих процессов. Однако попутно нам придется затронуть ряд таких важных и принципиальных вопросов, как энергетика процессов, источник энергии, а также суть так называемой модели "холодной" Земли и альтернативной ей развиваемой автором модели "горячей" Земли. Заметим сразу, что наших знаний о рассматриваемых процессах явно недостаточно для однозначной интерпретации наблюдаемых явлений. Поэтому все физические процессы, о которых пойдет речь ниже, как, собственно, вообще любые "объяснения" большинства наблюдаемых на Земле явлений, даже таких, как магнитное поле, движение материков, тепловой поток и т. п., можно (скорее, должно) рассматривать не более чем модели (даже не гипотезы). Мы будем стремиться к тому, чтобы эти модели были физически непротиворечивы и, по возможности, "увязаны" в общую концепцию модели Земли и солнечно-земных связей.

Для того чтобы как-то упростить подход к анализу этих сложных явлений, чтобы у читателя (да и у автора) возникло ощущение элементарного порядка в этом весьма запутанном вопросе, будем обсуждать физику земных катастрофических явлений в такой последовательности: сначала рассмотрим их с точки зрения влияния Солнца. Будем считать, что катастрофы обязаны в основном Солнцу и изменению его активности, Земля при этом пассивна. Затем наоборот –

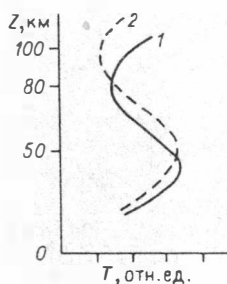


отбросим влияние Солнца и обратим внимание на активность Земли. Здесь нам придется отдельно обсудить поведение Земли с точки зрения двух ее моделей – холодной и горячей. И наконец, суммируя первые два подхода и выбирая в каждом из них рациональное зерно, попытаемся представить взаимосвязанную модель Земли, солнечно-земных связей и взаимных влияний.

### 3.2. ВЛИЯНИЕ СОЛНЦА

По-видимому, одним из первых, кто обратил серьезное внимание на влияние активности Солнца на процессы, происходящие на Земле, был наш соотечественник А.Л. Чижевский. Он считал, что "...Земля находится под непосредственным и вполне мощным влиянием центрального тела системы... Внутренняя жизнь нашего светила протекает не равномерно, а постоянно испытывает ритмические колебания более или менее правильного периода... Все самые разнообразные и разнохарактерные явления на Земле и химические превращения земной коры, и динамика самой планеты и составляющих ее частей, атмосферы, гидросферы и литосферы, протекают под непосредственным действием Солнца" [83, с. 26, 30].

Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами обосновывает в серии своих работ А.Д. Сытинский [74–77] – один из продолжателей идей Чижевского. Он считает, что в основе этой связи лежит механизм, объясняющий корреляцию между числами Вольфа (количество пятен на Солнце, показывающее его активность) и сейсмичностью Земли (суммарная энергия землетрясений). А.Д. Сытинский рассматривает примерный физический механизм взаимодействия: со стороны Солнца во время повышения активности (вспышки) возрастают количество и энергия протонов солнечного "ветра", которые, попадая в атмосферу Земли, поглощаются на высоте примерно 35–40 км, нагревая при этом атмосферу. Происходит изменение температурного профиля (рис. 10), атмосфера расширяется. Высота страто- и мезопаузы увеличивается. Этот процесс способствует увеличению давления, возникает волна плотности, которая воздействует на поверхность Земли, вызывая при этом землетрясение. В этом процессе выделяется энергия порядка  $3 \cdot 10^{27}$  эрг, которой, по мнению автора, достаточно для "организации" землетрясения и что подтверждает "реальность предложенного механизма" [76, с. 68].



На следующий день после солнечной вспышки и изменения температурного профиля действительно происходят (в некоторых случаях) землетрясения с большой магнитудой ( $M=7,0$ ). А.Д. Сытинский обычно использует примерно следующий способ доказательства правомерности своей модели процессов. Строится неко-

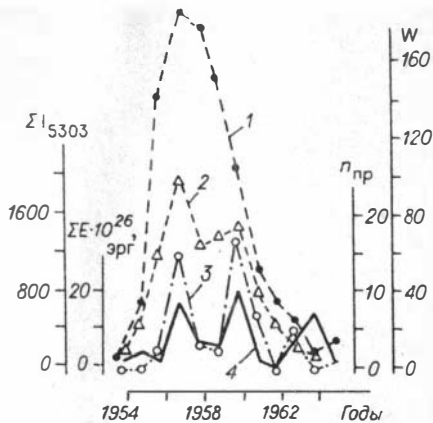
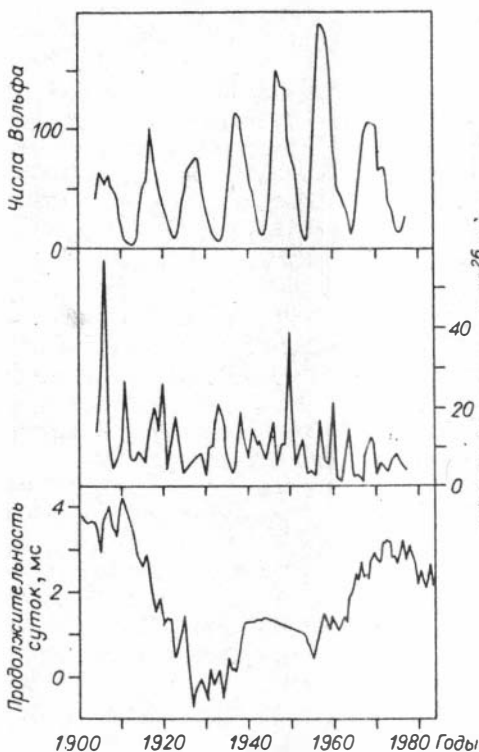
Р и с. 10. Сдвиг температурного профиля в атмосфере при увеличении солнечной активности (от 1 к 2) [76].

Р и с. 11. Циклические кривые солнечных и сейсмических индексов.

1 - числа Вольфа ( $W$ ); 2 - интенсивность линии  $5303 \text{ \AA}$ ; 3 - число протонных вспышек; 4 - суммарная энергия землетрясений ( $\sum E$ ) [76].

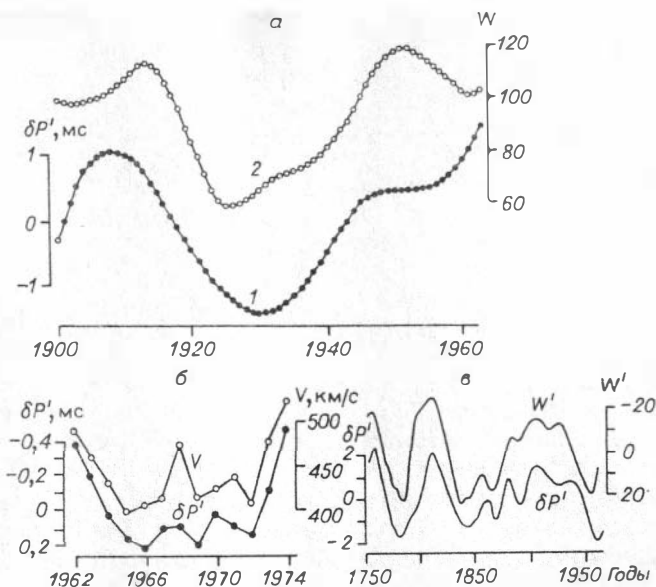
торая временная зависимость, например суммарная солнечная активность в течение ряда лет, относительно некоторого выделенного дня с ее максимальным значением. Затем относительно этого дня определяется ход сейсмичности. В результате оказывается, что средняя сейсмичность отстает

от солнечной активности примерно на сутки. Здесь же строится зависимость так называемого индекса Блиновой - параметра  $10^3 \alpha/\omega$ , или индекса зональной циркуляции атмосферы. В этом параметре  $\omega$  - угловая скорость вращения Земли, а  $\alpha$  - скорость движения атмосферы относительно Земли. Поведение параметра  $10^3 \alpha/\omega$  совпадает по фазе с временным ходом зависимости солнечной активности, что и доказывает (по мнению автора) ее связь с сейсмичностью через атмосферу.



По мнению автора, солнечное влияние на сейсмическую активность Земли может иллюстрировать рис. 11, на котором временной ход зависимости суммарной энергии землетрясений за 20 лет коррелирует (опять же с точки зрения автора [76]) с числом протонных вспышек, интенсивностью линии  $s\lambda = 5303 \text{ \AA}$  и числом Вольфа -  $W$ . Повышение сейсмичности в 1964 г. в минимуме солнечной активности автор объясняет тем, что и в других циклах в это время (при понижении чисел  $W$ ) наблюдалось сильное увеличение сейсмичности. Для наглядности

Р и с. 12. Числа Вольфа, сейсмическая энергия, скорость вращения Земли.



Р и с. 13. Изменение длительности суток и солнечных параметров.

*a* – изменение длительности суток с исключенным линейным трендом (1) и чисел короткоживущих солнечных пятен (2); *б* – вариации скорости солнечного ветра (*V*) и нерегулярной части ( $\delta P'$ ); *в* – низкочастотные нерегулярные вариации длительности суток ( $\delta P'$ ) и чисел Вольфа (*W'*) [32].

на рис. 12 изображены годовые значения суммарной энергии землетрясений и чисел Вольфа, взятые из таблицы в работе А.Д. Сытинского [76]. Здесь же приведена зависимость скорости вращения Земли, так как во многих моделях сейсмичность связывают с изменением именно этого параметра. Беглый взгляд на эти зависимости убеждает в том, что ничего общего в них не наблюдается, однако, как мы выясним позже, многие авторы находят здесь хорошие корреляции и взаимосвязи.

В солнечной активности, как известно, преобладает 11-летняя цикличность. Такой цикличности не наблюдается в зависимости неравномерности вращения Земли. Тем не менее предпринимались неоднократные попытки каким-либо образом увязать эти зависимости. Так, например, А. Стойко и Н. Стойко использовали в качестве индекса солнечной активности значения площади короткоживущих солнечных пятен, которые оказались в хорошей корреляции (по мнению авторов) с изменением амплитуды и частоты чандлеровских колебаний полюса, а также с вариацией скорости вращения Земли (рис. 13, *a*) [32]. Величина *W* представляет собой среднегодовые значения площади солнечных пятен, время жизни которых меньше одного дня, выраженное в  $10^{-7}$  площади видимого солнечного диска. Величины  $\delta p$  определены как сглаженные значения изменений длительности суток (без линейного тренда). Коэффициент корреляции между *W* и  $\delta p$  равен 0,89. Из приведенного рисунка следует, что увеличение солнеч-

ной активности ( $W$ ) соответствует (по знаку) замедлению вращения (увеличению длины суток). В свете того, о чем мы говорили ранее (обсуждая модель Сытинского), это весьма правдоподобно: увеличение солнечной активности вызывает дополнительный нагрев атмосферы, что приводит к увеличению ее момента импульса и соответственно к уменьшению момента импульса твердой Земли, а так как момент инерции Земли постоянен — к уменьшению скорости ее вращения. Все, кажется, разумно, однако в той же книге [32] В.М. Киселев приводит другую зависимость связи скорости вращения Земли с солнечной активностью, где тоже наблюдается высокий коэффициент корреляции (0,88). Здесь неравномерность суточного вращения коррелирует со скоростью солнечного ветра (см. рис. 13, б), причем "...с ростом средней скорости солнечного ветра увеличивается скорость суточного вращения Земли (длительность суток уменьшается)" [32, с. 113].

Из общих соображений, казалось бы, следует, что две такие характеристики, как площадь солнечных пятен (что-то вроде числа Вольфа) и скорость солнечного ветра, должны как-то более или менее однообразно характеризовать солнечную активность. Однако из приведенных рисунков видно, что если под  $\delta P$  в обоих из них авторы подразумевают одно и то же (а у нас нет причин в этом сомневаться), то оказывается, что повышению скорости солнечного ветра соответствует уменьшение  $W$ . Это сопоставление вызывает по меньшей мере определенное недоверие к обоим результатам. Однако мы наблюдаем явное противоречие, которое надо как-то разрешить. Способ его разрешения был предложен также В.М. Киселевым. Соображения были, по-видимому, следующими: если в ходе зависимости  $\delta P$  от времени на ней не наблюдается 11-летний цикл, тогдавайте вычтем из числа Вольфа (т. е. из числа пятен на Солнце) 11-летнюю компоненту, а то, что останется, сравним с ходом  $\delta P$ . Так и сделали, оказалось, что получившееся число  $W'$  может быть и отрицательным (какой оно имеет физический смысл — непонятно), а его временной ход соответствует  $\delta P$  "в нужном направлении": "Нерегулярные изменения длительности суток хорошо коррелируют с вариациями солнечной активности" (см. рис. 13, в) [32, с. 135]. Причем теперь оказывается, что и числа Вольфа (полученные таким образом), и скорость солнечного ветра при их увеличении совпадают с увеличением скорости вращения. Прежний механизм уже "не проходит", а альтернативного нет. Более того, если следовать книге Ю.Д. Калинина [27], то один из результатов рассматриваемой нами книги В.М. Киселева — есть как раз "...установление 11-летней периодичности в изменениях суточного вращения Земли" [27, с. 115]. Из всего сказанного, по-видимому, наиболее правильным был бы вывод, что однозначного доказательства солнечной обусловленности неравномерности вращения Земли и ее сейсмичности в настоящий момент не существует. Нет, похоже, и какого-либо явного физического механизма, который можно было бы рассматривать в этом плане. В частности, "...нет смысла говорить о непосредственном влиянии солнечного ветра на изменение режима вращения Земли" [32, с. 121].

В то же время атмосферная циркуляция явно связана с изменением длительности суток и она же в значительной степени связана с Солнцем, однако здесь пока (об этом подробнее позднее) ограничимся еще одной цитатой из книги В.М. Киселева: "...изменения атмосферной циркуляции не определяют вариаций суточного вращения, а имеют с ним общую причину" [32, с. 126].

Несколько подробнее остановимся на взаимосвязи атмосферы и нерегулярностей вращения Земли. Будем пользоваться результатами исследований Н.С. Сидоренкова [67–69]. Атмосфера вращается вместе с Землей, а также перемещается относительно нее. Момент импульса атмосферы  $L_a$  складывается из переносного момента импульса (или  $\omega$ -момента)  $L\omega$  и относительного момента  $L_u$  ( $u$ -момента):  $L_a = L_\omega + L_u$ . Можно считать (с хорошей точностью), что  $L_\omega = J \cdot \omega$ , где  $J$  – момент инерции атмосферы. Относительный момент импульса атмосферы определяется скоростью зонального ветра  $u$ , радиусом Земли  $R$  и плотностью атмосферы  $\rho$ :  $\int_V \rho \cdot u \cdot R \sin\Theta \cdot dV$  ( $\Theta$  – дополнение широты).

Н.С. Сидоренков считает, что изменение величины  $L_a$  полностью определяется вариацией  $L_u$ , в то время как  $L_\omega = \text{const}$  [67]. Относительный момент импульса  $L_u$  бывает максимальным в мае и декабре и минимальным в августе. Колебания моментов импульса северного и южного полушарий различаются, имея при этом ярко выраженный годовой период. Амплитуда годовых колебаний в северном полушарии почти в 2 раза больше, чем в южном. Колебания находятся в противофазе и взаимоисключают друг друга [67]. Продолжение далее очевидно, так как момент количества движения системы Земля – атмосфера постоянен ( $L_a + L_3 = \text{const}$ ), то увеличение  $L_a$  должно приводить к уменьшению момента импульса Земли ( $\Delta L_a = -\Delta L_3$ ). Величина  $L_3 = J_\omega$ , и если принять, что момент инерции твердой Земли постоянен, изменение  $L_u$  приводит к вариации  $\omega$ , причем  $\Delta\omega / \omega = \Delta L_a / L_a$  или, как было принято в [67]:  $\Delta L_a / L_a = \Delta L_u / L_u$ .

Изменение атмосферного давления имеет периодические и непериодические составляющие. Периодическая часть изменения атмосферного давления связана с изменением солнечной радиации в течение суток и года. Непериодическая часть связана с образованием и развитием циклонов и антициклонов. В северном и южном полушариях максимум давления приходится на зимние месяцы, минимум – на летние. Неравномерно нагретую по поверхности Земли атмосферу обычно рассматривают как тепловую машину, превращающую тепловую энергию от Солнца в кинетическую энергию ветра. В глобальном масштабе нагреватель – атмосфера летнего полушария, а холодильник – зимнего. Кроме этого, имеется ряд других тепловых машин: экватор – полюс, океан – материк, высокоширотные и тропические зоны стратосферы. Все эти машины "работают" далеко не синхронно, подчас увеличивая момент импульса атмосферы или уменьшая его ("работая" в противофазе). Вполне вероятно, что периодические (годовые и су-

точные) вариации момента импульса атмосферы проявляются в соответствующих изменениях скорости вращения Земли. Однако долгопериодические изменения  $\omega$  уже нельзя объяснить сезонными колебаниями  $L_a$ . Например, замедление скорости вращения Земли с 1961 по 1972 г., если его объяснять изменением  $L_a$ , потребовало бы увеличения скоростей ветров по всей Земле в несколько раз, чего на планете не наблюдалось.

Цепочка: Солнце – излучение – атмосфера – Земля – не единственная в солнечно-земных связях. Рассматриваются и другие физические механизмы воздействия на процессы, происходящие на Земле и в ее недрах, со стороны Солнца и планет. Обсудим, насколько правдоподобны возможные механизмы воздействия электромагнитного поля Солнца на изменение суточного вращения Земли [62], полагая при этом, что катастрофические явления с ним связаны. Одна из первых гипотез этого плана принадлежит Э.И. Могилевскому (ссылки в [62]). Согласно этой гипотезе, солнечный ветер представляет собой плазму, в которой существуют отдельные облака (магнитные М-элементы), представляющие собой скрученное магнитное поле с радиальной компонентой порядка 50 Гс. Основная энергия потока от Солнца, согласно гипотезе, представлена не кинетической энергией направленного движения плазмы, а энергией магнитного поля таких М-элементов, которая передается при встрече с Землей магнитосфере и ионосфере, вызывая геомагнитные возмущения. Взаимодействуя с магнитосферой, М-элемент, в зависимости от того, в какое место магнитосферы он попадает, может либо тормозить, либо ускорять вращение Земли.

Эта гипотеза вызвала резкую критику, хотя находила и приверженцев. Например, уже упоминавшийся Н.С. Сидоренков пришел к выводу, что "внезапные" изменения длины суток не связаны с геомагнитной активностью типа бурь и т. п. Исследованиями этого плана было показано, что "...корпускулярные потоки, сопровождающиеся на Земле сильными магнитными бурями, оказываются не эффективными по воздействию на изменения скорости суточного вращения Земли" [62, с. 147]. В качестве примера приведем еще несколько весьма гипотетических и маловероятных механизмов воздействия Солнца на Землю посредством электромагнитного поля. А.И. Лаптуховым предложен механизм, "...связанный с разогревом мантии индукционными токами, последующим расслоением разогретого вещества гравитационным полем, прохождением тяжелой фракции к ядру, что создает уменьшение момента инерции и увеличение скорости суточного вращения Земли [Там же, с. 149]. Таким образом, область электромагнитного взаимодействия "опустилась" до земной мантии.

Еще глубже "опускает" область взаимодействия электромагнитного излучения Солнца с Землей С.И. Брагинский [4]. Суть его гипотезы основана на механизме генерации МПЗ магнитным динамо: в жидком ядре Земли возникают потоки вещества, которые в конечном счете генерируют магнитное поле. Ядро Земли обладает конечной электропроводностью, существенно большей, чем окружающая ее мантия. Солнечное электромагнитное излучение способно, проникая сквозь мантию, взаимодействовать с ядром, изменяя направления и

скорости потоков вещества. Согласно С.И. Брагинскому, образуются магнитогидродинамические колебания крутильного типа в ядре, которые передаются оболочке путем перераспределения вращательного импульса между ядром и оболочкой, что и вызывает изменение скорости суточного вращения Земли. Этот механизм также весьма гипотетичен, так как мы не имеем твердых оснований считать, что описанные процессы, происходящие, согласно модели Брагинского, в действительности, имеют место.

Упомянем еще об одной попытке связать процессы, происходящие на Солнце, со скоростью вращения Земли. Речь пойдет об идее, высказанной G. Windelius, P. Tucker [96] и касающейся возможности перекачки Земле момента сил, связанного с неравномерностью вращения Солнца. Колебания солнечной активности связываются с орбитальным движением Солнца, которое само испытывает влияние непрерывно смещающихся планетных систем. Процесс, связывающий изменения орбитального кинетического момента Солнца с сейсмическими, вулканическими и климатическими изменениями на Земле, начинается с изменений в скорости вращения Солнца, которая меняется под воздействием изменений в крутящем моменте Солнца, возникающих при прохождении светилом критических фаз траектории его движения вокруг центра масс Солнечной системы. В соответствии с законом сохранения кинетического момента системы небесных тел это должно вызвать противоположные изменения общего кинетического момента планет. Можно ожидать, что указанные изменения орбитальной скорости Земли вызовут колебания скорости вращения планеты и изменение давления и трения на границе раздела ядра и мантии. Авторы считают, что имеется хорошая корреляция между кинетическим моментом Солнца и скоростью вращения Земли, хотя между этими параметрами нет простой причинно-следственной связи, поскольку момент Солнца взаимосвязан не только с кинетическим моментом Земли, но также и с моментами других планет.

Гравитационное взаимодействие Солнца, Луны и других планет с Землей всем знакомо, понятно и, пожалуй, более других изучено. Воздействие Солнца и Луны на Землю и образование при этом приливов в океанах, атмосфере и твердой земле общеизвестно, однако тот факт, влияют ли приливы на сейсмичность и вулканизм, далеко не очевиден; по крайней мере мнения специалистов по физике Земли по этому поводу весьма различны. Так, например, француз А. Перре, обработав данные более чем о 23 тыс. землетрясений, еще в середине прошлого века обратил внимание на то, что землетрясения оказываются связанными по времени с фазами Луны и ее расстоянием от Земли. Им было показано, что землетрясения происходят чаще в сизигиях (моменты новолуния и полнолуния), чем в квадратурах (когда угол между направлениями на Луну и Солнце составляет  $90^\circ$ ). Перре показал, что частота землетрясений повышается к перигеям Луны и, наоборот, уменьшается к апогеям и, наконец, землетрясения происходят чаще, когда Луна находится вблизи меридиана, чем когда она отдалена от него на  $90^\circ$ . Эти обнаруженные особенности были названы "законами Перре" [72]. Законы Перре вызвали в свое время

сенсацію. Потребовалось создание специальной комиссии Французской Академии наук, которая подтвердила справедливость выводов Перре. Тем не менее, как это часто бывает, факты связи сейсмичности с фазами Луны были забыты и впоследствии неоднократно открывались заново. Например, уже в наше время астроном С. Килстон обнаружил несомненную связь между землетрясениями в Калифорнии и фазами Луны. Поначалу он был осмеян американскими геофизиками, однако затем убедил их в справедливости своих наблюдений, предсказав землетрясение в Калифорнии в сентябре 1987 г.

Совсем недавно была опубликована работа [88], в которой авторы, анализируя 541 крупное землетрясение (с магнитудой более 7,5), произошедшее в период с 1897 по 1985 г., показали, что землетрясения происходят преимущественно тогда, когда Луна или Солнце находится относительно эпицентра землетрясения под телесным углом примерно в  $45^\circ$  (от  $35$  до  $50^\circ$ ). Они считают, что солнечный и лунный приливы служат своеобразным спусковым механизмом для землетрясения. По всей видимости, это довольно интересный и значительный экспериментальный результат, к которому мы вернемся в следующей главе.

В целом можно, по-видимому, сделать такой вывод: внешние гравитационные поля, по крайней мере Луны и Солнца, оказывают некоторое влияние на сейсмичность Земли. Хотя, надо заметить, этот вывод разделяется далеко не всеми специалистами. Так, например, Стейси считает, что нет и не может быть связи между землетрясениями и лунными приливами. Он приводит такой довод. Если принять, что величина напряжения перед землетрясением достигает  $10^7$  дин/см<sup>2</sup>, а лунный прилив повторяется через 13 ч и сопровождается изменением напряжений с амплитудой около  $5 \cdot 10^4$  дин/см<sup>2</sup>, то скорость нарастания напряжений составляет 7 дин/(см<sup>2</sup> · с). В этом случае землетрясение в одном месте не должно происходить чаще чем раз в месяц, хотя известны случаи, когда они происходят значительно чаще [70]. С другой стороны, Стейси приходит к выводу о том, что "...пожалуй, более вероятно, момент землетрясения не определяется непосредственно величиной напряжений..." [Там же, с. 243]. Этот его вывод находится в очевидном противоречии с предыдущим. Таким образом, категорическое заключение о невозможности связи сейсмичности с приливными эффектами, по-видимому, не обосновано. М.В. Стюас в качестве иллюстрации влияния Луны на катастрофические землетрясения приводит ряд событий, имевших место в 1960 г., который, по его мнению, войдет в историю сейсмологии Земли как "...год небывалых катастрофических землетрясений XX века": Агадирская катастрофа 29 февраля разразилась три дня спустя после новолуния (26 февраля) и вблизи перигея (23 февраля); сильное землетрясение в г. Лора (Иран) произошло 24 апреля, т. е. за один день до новолуния; Чилийская катастрофа, продолжавшаяся с 21 по 27 мая, совпадает с новолунием (25 мая); землетрясение в г. Корча (Албания) 26 мая произошло на другой день после новолуния, а Ассамская катастрофа – через два дня после новолуния. Все катастрофические землетрясения 1960 г. произошли как раз при тех космических условиях, которые

\* Председателем комиссии был Эли де Бомон, членами – Араго, Лиувиль и Ламе.



"вытекают" из законов Перре [72]. По мере увеличения глубины землетрясений уменьшается корреляция их с приливными эффектами. Наиболее "подходящий" для выполнения условий А. Перре слой в Земле находится на глубине 40-80 км. Уменьшение зависимости сейсмичности Земли от лунно-солнечных приливов при увеличении глубины очагов землетрясений интересно в свете работ Н. Стойко. В них показано, что наблюдается высокая корреляция (до 0,9) между энергией изменения угловой скорости вращения Земли и энергией землетрясений, глубина которых превышала 70 км. Причину и следствие в этом случае можно поменять местами, так как изменение ротационного режима – одна из многих причин, порождающих сейсмичность Земли. Этой взаимосвязи мы уже частично касались ранее и далее неоднократно будем к ней возвращаться. Дело в том, что эта взаимосвязь обычно не подвергается сомнению, и поэтому авторы моделей обусловленности сейсмичности Земли солнечно-земными связями считают достаточным обеспечить влияние со стороны Солнца на ротационный режим Земли. Заметим, что с ротационным режимом Земли оказываются связанными не только катастрофы – землетрясения, но и, как будет показано ниже, извержения вулканов, и образование ураганов, и изменение океанических течений.

Остановимся кратко еще на одной работе, посвященной возможности вычисления точного времени землетрясения [52]. Ее автор Э.И. Несмянович считает, что сейсмическая активность Земли связана с гравитационным взаимодействием ее с Солнцем, Луной и планетами. В качестве доказательства такого взаимодействия она приводит "...достоверный эффект усиления активности при прохождении Луной угла в 0,7 рад относительно перигея орбиты" [52, с. 193]. В свою очередь сейсмическая активность Земли и вспышечная активность Солнца (по Несмянович) "...находятся в противофазе. Наибольшая сейсмическая активность коррелирует с максимальным коэффициентом асимметрии вспышечной активности Солнца с соответствующим фазовым сдвигом..." [Там же, с. 195]. Время возможного землетрясения автор предлагает вычислять на основе трех постулатов: 1) резонансных свойств Солнечной системы; 2) суммирования приливного эффекта от небесных тел; 3) пропорциональности суммарного приливного воздействия на Землю возмущающей силы, вызывающей землетрясения. Э.И. Несмянович считает, что "значения возмущений от всех планет усилены резонансными процессами внутри Солнечной системы" (?) [Там же, с. 196]. Автор этой работы убеждена, что она "впервые доказывает не только статистическую, но и функциональную зависимость (закономерность) между временем больших землетрясений, координатами эпицентра, эфемеридами Земли, Луны и планет Солнечной системы" [Там же, с. 202, 203].

Подводя итог и оценивая степень влияния Солнца на происхождение земных катастроф, отметим, что, на наш взгляд, наиболее физически обоснованной можно считать приливную модель. Действительно, нельзя не согласиться со Стейси, что прилив не может быть единственной причиной возникновения землетрясения. По всей видимости, приливное воздействие на литосферу может служить "спусковым ме-

ханизмом" какого-то другого, более энергетически мощного механизма. Влияние вспышечной активности Солнца на земные катастрофические явления представляется несколько менее убедительным. Возникает вопрос: возможно ли такое изменение режима "работы" Солнца, которое привело бы к появлению на Земле катастрофического явления, например типа маундеровского похолодания? Дело в том, что солнечный поток в целом, за время инструментального наблюдения за ним, очень стабилен. Природа 11-летних колебаний солнечной активности еще недостаточно ясна. Во время этих колебаний интегральная энергия солнечного излучения меняется весьма незначительно. Неясно, глубинные это процессы на Солнце или, как следует из модели Бэбкока-Лейтона, 11-летняя цикличность солнечной активности определяется суммарным эффектом таких процессов, как «...дифференциальное вращение поверхностных слоев Солнца, "закручивание" и усиление магнитного поля Солнца, всплывание магнитных трубок и дрейф всплывающих полей к полюсам в результате меридиональной циркуляции атмосферы Солнца или диффузии магнитных полей, обусловленной хаотическими движениями плазмы в поверхностном слое» [59, с. 79–80], т. е. определяется процессами, происходящими на поверхности (в атмосфере) Солнца. С другой стороны, пока не доказана неправомочность существования модели, предложенной в начале века Е.В. Брауном, о происхождении цикличности солнечной активности вследствие возникновения вихревых движений в ее атмосфере, порождаемых планетными (сидерический период обращения Юпитера 11, 8 лет) приливными силами...

Возникает естественный и очевидный вопрос о том, способно ли Солнце само, если считать 11-летние циклы внешним возмущением, генерировать катастрофы? Для выяснения этого вопроса используются данные по вариации концентрации радиоуглерода  $^{14}\text{C}$  в деревьях и озерных отложениях. Считается, что имеется связь между  $\Delta^{14}\text{C}$  и числами Вольфа  $W$  [13]. На промежутке в 7 лет изучалась корреляция между  $\Delta^{14}\text{C}$  и геомагнитным полем. Показано, что имеется корреляция между этими параметрами [14]. Изотоп  $^{14}\text{C}$  образуется при бомбардировке космическими лучами атомных ядер верхней атмосферы Земли в виде двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ , который благодаря фотосинтезу попадает в деревья и откладывается в годовых кольцах. При этом сохраняется память об отношении  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  в атмосфере в момент образования. Известно, что интенсивность галактических космических лучей, а следовательно, и скорость образования  $^{14}\text{C}$  в земной атмосфере антикоррелируют с числом солнечных пятен. В работе [13] этот эффект связывается с изменениями солнечного магнитного поля, экранирующего космические лучи. В этом случае  $\Delta^{14}\text{C}$  может быть использован как индикатор солнечной активности.

В работе [6] по временному ряду экспериментальных данных  $^{14}\text{C}$  получена оценка размерности аттрактора динамической системы, определяющей солнечную активность. Данные примерно за 6 тыс. лет усреднялись по 11-летнему циклу (получено около 600 точек). Размерность аттрактора определялась по показателю степени пространственной корреляционной функции экспериментальных данных (метод

Грасбергера–Прокачио, см. гл. 1). Согласно полученной оценке, аттрактор является фракталом, близким по форме к трехмерному тору (степень аттрактора равна примерно 3,3). Солнечная активность, полученная по данным  $^{14}\text{C}$ , характеризует ее стохастическую систему, способную к проявлению катастрофических изменений, подобных, например, маундеровскому похолоданию. (Этот вывод верен при очевидном условии, состоящем в том, что ряд данных по  $^{14}\text{C}$  реально отражает именно солнечную активность, а не поведение магнитного поля, например.) Однако на основании полученных результатов сделать вывод относительно того, что Солнце может являться источником таких катастрофических явлений, как землетрясения, вулканы и т. п., по-видимому, нет достаточных и убедительных оснований.

### 3.3. РОЛЬ ЗЕМЛИ

В работе [7] авторами была выполнена аналогичная предыдущей процедура по оценке размерности аттрактора динамической системы Земля, определяемой экспериментальными данными по неравномерности ее вращения. Было показано, что размерность аттрактора фрактальна и средняя величина его  $\nu = 1,9 \pm 0,2$  на временных интервалах от 2 до 20 лет. Здесь, по мнению авторов, вероятно, реализуется одночастотный режим. В динамической системе это соответствует предельному циклу. В интервале меньших временных масштабов динамическая система (Земля) ведет себя случайным образом. Этот интервал характеризует шум в системе. Амплитуды низкочастотных гармоник (более 100 лет) достаточно велики. Показатель аттрактора оказывается близким к 2, что говорит о наличии двухчастотного режима, или странного аттрактора. Таким образом, полученные оценки показателя аттрактора динамической системы по данным о неравномерности вращения Земли могут быть интерпретированы так: эта система имеет небольшую размерность и на нее накладывается случайный шум. Иначе, можно считать, что система стохастична и способна на малых временах к резкому изменению своего состояния, т. е. способна к катастрофе.

Интерес многих авторов работ по физике Земли к зависимости скорости вращения от времени  $\omega(t)$  не случаен. Исследователи находят в ней корреляцию с поведением во времени: земного магнитного поля [4], сейсмичности [87], вулканизма [47], величины силы тяжести [36], атмосферы [69], уровня озер [36], вращения Солнца [96] и т. п. Вполне возможно, что это не случайно, тогда необходимо найти физические непротиворечивое объяснение взаимосвязи и взаимообусловленности этих параметров... Легко видеть, что в физике земных катастрофических явлений параметр  $\omega(t)$  играет весьма значительную роль. Как же объясняет неравномерность вращения Земли и связь с ней других геофизических параметров модель "стандартной", "холодной" Земли, и есть ли другие модели, ей альтернативные? Постараемся ответить на эти вопросы.

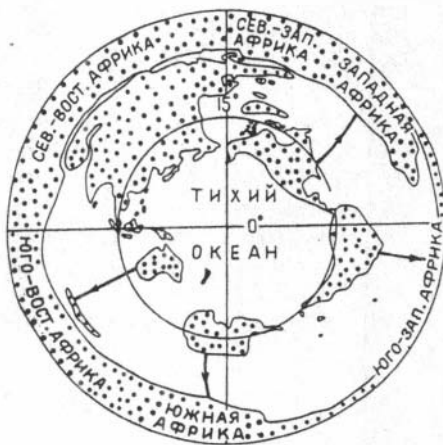
Суть модели "холодной" Земли состоит в том, что ядро Земли – железное, внешнее – жидкое, а внутреннее – твердое. Этот основной постулат определяет однозначно внутреннее устройство Земли: ее температурный градиент, источник теплового потока (радиоактивность) и т. п. В ядре и мантии реализуется конвекция, либо тепловая, либо гравитационная, которая в ядре приводит к генерации магнитного поля, а в мантии — к геодинамике. Суть этой модели состоит также в утверждении постоянства радиуса Земли (этот тезис считается очевидным и не подвергается сомнению), спрединга — как "инструмента" расширения океанов и субдукции — постулированного механизма, необходимого для поддержания неизменности земного радиуса. Эти положения взяты за основу в тектонике плит. Сейсмичность и вулканизм в тектонике плит являются в основном следствием диссипативных процессов, происходящих на границах плит. То, что эти явления имеют место и внутри плит, не находит в плитной тектонике однозначного толкования ("горячие" точки и пр.). Неравномерность вращения в плитной тектонике объясняется обычно двумя факторами: с одной стороны, приливное замедление вращения, с другой — ускорение (либо замедление) атмосферой (ветер Землю ускоряет и тормозит!?).

Холодная модель Земли сопряжена с необходимостью решения нескольких парадоксов. Одним из таких можно считать парадокс Мезервея [90]. Суть его состоит в том, что "собрать" материки в один общий суперконтинент можно, оказывается, только на шаре с радиусом, меньшим, чем современный. Дело в том, что, "собирая" материки, в частности Америку с Европой и Африкой, мы не имеем права (используя одни и те же правила, основанные на магнитной стратиграфии)

а

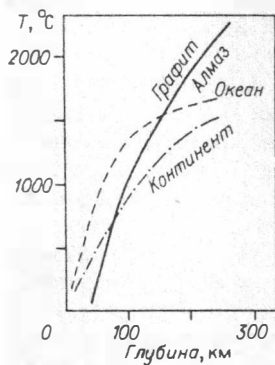


б



Р и с. 14. Парадокс Мезервея [90].

а - предполагаемое первоначальное расположение современных материков относительно Африки; б - экваториальная проекция периметра Тихого океана и направления движений материков, необходимые для получения расположения материков в части а.



Р и с. 15. Диаграмма равновесия системы графит — алмаз (сплошная линия). Показаны геотермы в мантии для континентов и океанов [53].

раздвигать материки, ограничивающие Тихий океан (рис.14). В этом случае "собрать" материки в суперконтинент на шаре современного радиуса невозможно.

Другой не менее интересный парадокс объяснен своим появлением открытию Н.В. Соболевым и В.С. Шацким алмазов, образованных в породах земной коры [95]. Напомним, что для этого необходимо было выполнение вполне определенных  $pT$ -условий: давление не менее 40 кбар, температура около 1000 °С. Можно было бы предположить (как это и делается обычно), что алмазы образовались в мантии, где существуют необходимые условия, а затем были "транспортированы" по "трубке взрыва" на земную поверхность. Однако и здесь возникает непреодолимая (в рамках модели "холодной" Земли) сложность, так как при "транспортировке" алмазы из области  $pT$ -условий устойчивого их существования переходят в область, где они не могут существовать (превращаются в графит — сгорают) (рис. 15). Этот парадокс, один из многих в модели "холодной" Земли, ставит в сложное, неразрешимое положение проблему глобальной мантийной конвекции.

Еще один вопрос из нерешенных в модели "холодной" Земли заключается в том, каким образом на фоне радиоактивного разогрева, медленной мантийной конвекции (если она существует), плавно меняющегося магнитного поля и т. п. возникают быстрые процессы — трансгрессии и регрессии, вулканизм и землетрясения, инверсии МПЗ и непривлинные вариации скорости вращения и т. п.? Заметим, что мы говорим о катастрофических геофизических явлениях, физике которых и посвящена эта книга.

Совершенно естественно, что все эти вопросы ранее неоднократно задавались, на все, без исключения, были получены ответы, так или иначе объясняющие все эти явления и парадоксы. Наша цель не в том, чтобы подвергнуть критике и внимательному разбору различных, подчас противоречивых, объяснений, основанных на модели "холодной" Земли. Цель настоящего и последующих разделов книги заключается в описании возможных физических механизмов рассматриваемых природных катастрофических явлений, базирующихся на разрабатываемой автором модели "горячей" Земли [35, 36].

#### 3.4. МОДЕЛЬ "ГОРЯЧЕЙ" ЗЕМЛИ

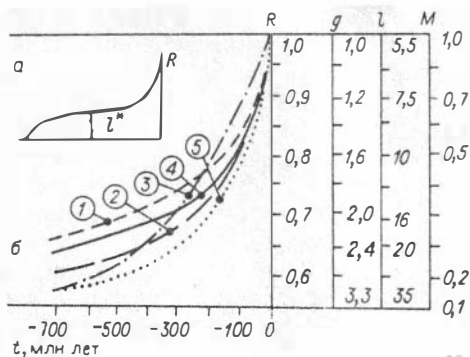
В отличие от модели "холодной" Земли, где гравитационная энергия  $\epsilon = \frac{GM}{R} = 2 \cdot 10^{39}$  эрг при ее образовании тратится постепенно примерно за  $10^8$  лет потому, что в течение именно этого срока тепло, которое могло бы выделиться от прилетающих на Землю "булыганов"

— планетозималей, успевают переизлучиться в пространство, в модели "горячей" Земли она выделяется быстро, без какого-либо ограничения времени за счет гравитационного коллапса. В этой модели звезды, планеты и спутники образуются "по одному сценарию", все различия между небесными телами определяются только величиной их массы. Вещество Земли при таком подходе оказывается нагретым до температуры порядка  $3 \cdot 10^4$  К, причем поскольку удельная гравитационная энергия больше в несколько раз, чем теплота фазового перехода — испарения  $\text{SiO}_2$ , то вещество Земли оказывается в газообразном состоянии. Гравитационное сжатие вещества Земли происходит до тех пор, пока силы гравитации не уравновесятся силами увеличивающегося по мере развития коллапса "газокинетического" давления в центре Земли. В этот момент стабилизируется размер земного шара, образуется первичная земная кора, затем, по мере остывания коры, образовавшееся земное вещество, находящееся в газообразном состоянии, конденсируется и формирует таким образом внешнее ядро (жидкое), вещество которого кристаллизуется, превращаясь в мантию (твердое состояние). Так как плотность вещества Земли в газообразном состоянии при гравитационном сжатии его оказывается выше, чем в конденсированном, Земля в процессе эволюции расширяется [35, 36].

Приведем элементарные оценки параметров Земли, следующие из "горячей" модели, используя единственное предположение: образование Земли произошло за счет гравитационного коллапса и вся гравитационная энергия пошла на нагрев ее вещества. (Заметим, считается очевидным, что звезды были образованы именно при гравитационном коллапсе.) Температуру мы оценили выше:  $T=3 \cdot 10^4$  К. Начальный размер Земли можно оценить следующим образом. Допустим, что наша гипотеза верна и к настоящему времени вещество, из которого Земля была образована, сохранилось в первоначальном состоянии во внутреннем ядре. Это допущение позволяет ориентировочно оценить начальный размер, исходя из критерия Джинса, согласно которому гравитационное сжатие будет продолжаться до тех пор, пока скорость звука в сжимаемой среде не станет равной альвеновской:

$V_G = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ . Полагая  $V_G = 11,2$  км/с, т. е. скорости распространения продольных волн во внутреннем ядре, а  $M$  — равной массе Земли, величина  $R_0$  (начальный радиус Земли) оказывается порядка  $3 \cdot 10^8$  см. Для более точной оценки величины  $R_0$  воспользуемся интересной особенностью Земли, на которую, насколько известно автору, никто ранее не обратил внимания. Оказывается, что площадь поверхности материков Земли равна площади ее внешнего ядра ( $R_0 = 3,5 \cdot 10^8$  см), а согласно нашей модели, именно на этом радиусе прекратилось гравитационное сжатие, стабилизировался размер и образовалась первичная кора, которая впоследствии была разорвана на отдельные материи при расширении Земли, а пространство между ними заполнено океанами. Полученная оценка  $R_0$  позволяет определить плотность вещества внутреннего ядра (и начальную плотность Земли)  $\rho_G \approx 35$  г/см<sup>3</sup>.

Сделаем еще одно достаточно смелое допущение: будем считать вещество внутреннего ядра идеальным газом. Тогда воспользуемся



Р и с. 16. Увеличение радиуса Земли за время ее эволюции (а) и за последние 600 млн лет (б) [36].

1 — по данным С. Кери, 2 — нашей модели. Изменение средней плотности Земли ( $R$ ), ускорения силы тяжести ( $g$ ), относительное увеличение массы мантии (океанов) ( $M$ ) по нашей модели; 5 — увеличение массы океанов по [64].

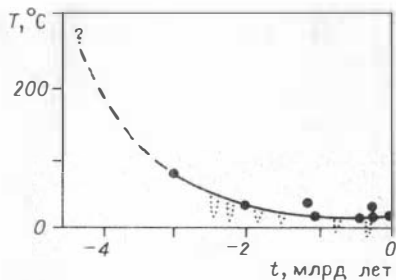
формулой для скорости звука в идеальном газе:  $V = 11,2 \text{ км/с} = \sqrt{\gamma RT}$ , здесь  $\gamma = C_p/C_v$  — адиабатический коэффициент,  $R$  — газовая постоянная,  $\mu$  — молекулярный вес вещества. Величина  $T/\mu$  оказывается порядка  $3 \cdot 10^3 \text{ К}$ , что для определенной нами ранее  $T = 3 \cdot 10^4 \text{ К}$  приводит к значению молекулярного веса  $\mu \approx 10$  (существенно "водородный" состав внутреннего ядра Земли).

Приравнивая давление гравитационного сжатия  $\frac{GM^2}{4\pi R^4}$  "газокинетическому"  $\frac{\rho_G kT}{\mu m}$  ( $k$  — постоянная Больцмана,  $m$  — масса протона), получаем для плотности вещества внутреннего ядра Земли величину того же порядка  $\rho_G \approx 10^5 \frac{\mu}{T} \approx 30 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, согласно "горячей" модели, Земля была образована в результате быстрого гравитационного сжатия — коллапса и представляла собой горячий ( $T \approx 3 \cdot 10^4 \text{ К}$ ), плотный ( $\rho_G \approx 35 \text{ г/см}^3$ ) "газ", сжатый до размера меньшего, чем современная Земля ( $R_0 \approx 3,5 \cdot 10^8 \text{ см}$ ). Разделение "газообразного" вещества в процессе охлаждения на конденсированное (жидкое) и кристаллическое (твердое) за счет реализации фазовых переходов: конденсации и кристаллизации — определило выделяемые нами на Земле области внутреннего ядра, внешнего ядра, мантии и коры.

Процесс эволюции размера Земли от начального к современному шел неравномерно [35, 36]. Поначалу процессы охлаждения определялись теплопроводностью, радиус Земли медленно увеличивался:  $R \sim \sqrt{t}$  ( $t$  — время эволюции). Затем "включился" механизм конвективного охлаждения мантии, она стала наращиваться значительно быстрее, а радиус Земли стал возрастать:  $R \sim t^2$  (парадокс, знакомый в термодинамике: чем толще "шуба", тем хуже она "греет"). Эта зависимость изображена на рис. 16: видно, что в течение примерно  $3,4 \cdot 10^9$  лет толщина мантии увеличилась примерно до 300 км, а за последние  $10^9$  лет — более чем на 2,5 тыс. км. Эта модель качественно согласуется с временной зависимостью возрастания радиуса Земли, построенной С. Кери, О.С. Хильденбергом, Х. Оуэном по палеомагнитным, палеогеографическим, палеоклиматическим и геологическим данным [35, 36].

Расширение Земли противоположно по направлению действию гравитационных сил сжатия. Когда силы, возникающие при разуплот-

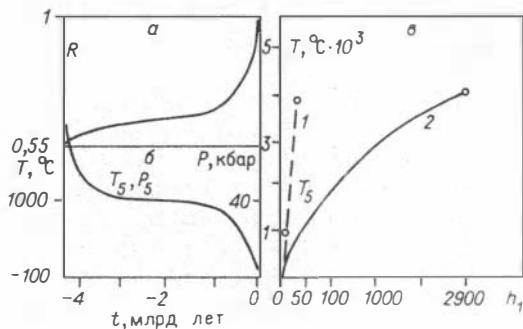
Р и с. 17. Изменение температуры поверхности Земли с течением времени [36].



нении вещества и приводящие к расширению, превалируют над силами гравитационного сжатия, Земля расширяется, в это время реализуется переход вещества из "газообразного" состояния в конденсированное. Если по какой-либо причине этот процесс прекратится и силы сжатия окажутся выше сил расширения, Земля будет сжиматься. Эта цикличность возможна, пока в центре Земли находится вещество в "газообразном" состоянии. В результате мы приходим в нашей модели "горячей" Земли к идее расширяющейся и пульсирующей Земли — гипотезе, неоднократно высказываемой геологами (В.А. Обручев, М.А. Усов, М.М. Тетяев, Е.Е. Милановский).

Развивая модель "горячей" Земли, оценим, как происходила эволюция  $pT$ -условий на ее поверхности. Температура поверхности Земли охлаждалась за счет излучения через плотную (в момент образования) атмосферу. Начальная температура на поверхности Земли примерно через  $5 \cdot 10^8$  лет после образования была, по нашим оценкам [36], порядка  $10^3$  °C. Временная зависимость температуры поверхности Земли от времени ее эволюции представлена на рис. 17. На рис. 18, в изображен ход температуры внутренних слоев Земли вдоль ее радиуса, оцененной нами для модели "горячей" Земли. На начальном этапе эволюции у Земли (согласно нашей модели) мантии практически не было, а если это так, то температурный градиент в коре был значительно выше современного. Грубая ориентировочная оценка его дает значение порядка  $200$  °C/км (см. рис. 18, в).

Обратимся теперь к некоторым вопросам, которые мы затронули выше в связи с тем, что они, по нашему мнению, не находят удовлетворительного решения в рамках модели "холодной" Земли. "Горячая" Земля расширяется от определенного состояния, при котором материи составляли единую кору и были "уложены" один к другому. В течение эволюции материи "расползлись", а пространство между ними заполнилось океанами. При такой схеме эволюции парадокса, замеченного Мезервеем, не возникает в принципе. Тепловой поток в нашей модели определяется теплом, которое выделяется при фазовом переходе (конденсации); при



Р и с. 18. Изменение радиуса Земли в течение эволюции (а), температуры на глубине 5 км (б); температурный профиль (в) на начальном этапе эволюции (1) и современный (2).



этом совершенно очевидна наблюдаемая хорошая симметрия теплового потока. Земля в нашей модели практически не инерционна. Минимальное время перестройки этой механической динамической системы можно оценить как  $R_3/V_p$ , что составляет десятки минут ( $R$  — радиус Земли,  $V_p$  — средняя (по радиусу) скорость продольных сейсмических волн).

Рассмотрим, может ли быть решен вопрос об образовании алмазов практически на поверхности Земли, т. е. вопрос о том, могли ли быть на ее поверхности необходимые  $pT$ -условия, в рамках нашей модели "горячей" Земли. Выше мы оценили температуру Земли как на поверхности, так и по глубине. Если принять, что алмазы были образованы непосредственно в коре, например на глубине 5 км, то, согласно графику на рис.18, б, температура на этой глубине была примерно в течение 3 млрд лет около  $1000^\circ\text{C}$ . Таким образом, одно из требований, необходимых для образования алмазов, — требование определенных  $pT$ -условий, вроде выполняется. Остается теперь "обеспечить" алмазам еще и соответствующее давление в 40 кбар. Давление вышележащих слоев  $p = \rho gh$ , несмотря на то, что величина  $g$  на ранних этапах эволюции Земли (по модели) была в 3,5 раза больше современной, недостаточно для образования алмазов ( $p = 5$  кбар). Оценим порядок давлений, которые могли бы иметь место на Земле во время цикла расширения, когда, как следует из нашей модели, рвались и растягивались материи. Величина давления в этом случае:  $p = \frac{mU}{V}$ , где  $m$  — масса вещества, которое переходит в конденсированное состояние со скоростью  $V_i$  за время  $t$ ;  $m = V_i \cdot t \cdot S \cdot \Delta\rho$  ( $S$  — площадь зоны, в которой происходит этот процесс,  $\Delta\rho$  — разность в плотностях между веществом в "газообразном" и конденсированном состоянии);  $U$  — теплота фазового перехода,  $V$  — объем Земли, где диссипирует энергия фазового перехода:  $V = SR_0$ . Подставляя полученное, оценим величину давления:  $p = 1/R_0 \cdot V_i \cdot t \Delta\rho U$  ( $R_0$  — начальный радиус Земли). Для  $p = 40$  кбар,  $U = 10$  кДж/г,  $\Delta\rho = 30$  г/см<sup>3</sup>,  $R_0 = 3,5 \cdot 10^8$  см, величина  $V_i \cdot t \approx 4 \cdot 10^6$  см. Положив среднюю скорость расширения  $V_1$  равной 0,4 см/год, получаем необходимое для достижения требуемого давления время процесса  $t = 4 \cdot 10^7$  лет, что вполне достижимо и по-своему "разумно". Таким образом, в нашей модели можно, оказывается, выполнить и второе требование условий образования алмазов — по давлению. При этом отпадает необходимость в транспортировке (что представляется нам весьма сомнительным процессом) алмазов к земной коре из мантии.

Однако вернемся к вопросу о том, как же решается проблема катастроф в модели "горячей" Земли. Часть из них мы рассмотрели выше, некоторые подробнее обсудим в следующих главах. Сейчас же обратим внимание на ряд принципиальных моментов. Во-первых, как уже отмечалось, модель позволяет получить малые времена процессов. По-видимому, нет нужды объяснять, что катастрофа — это всегда малые (относительно, конечно) времена. Во-вторых, модель находит естественное объяснение некоторым вопросам, не находящим реше-

ния в "холодной" модели: источник энергии для теплового потока, геодинамики и магнитного поля, неравномерность вращения, парадоксы Мезервея и образования алмазов и т. п.

Однако ряд особенностей поведения Земли, как единой динамической системы, мы еще не отметили. Отнесем к таковым взаимосвязь трансгрессий и регрессий с орогенными процессами и инверсиями магнитного поля, возможные причины оледенений и их взаимосвязь с другими процессами на Земле, роль высоты геоида в геодинамике и т. п.

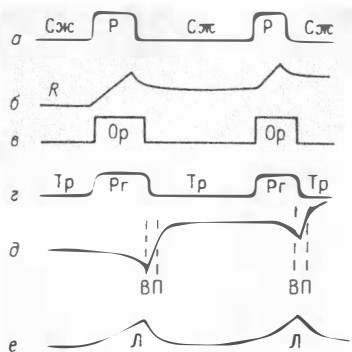
Собственно катастрофическим явлением в этом списке можно считать, по-видимому, всемирный потоп, или, иначе, трансгрессию моря, когда происходило затопление довольно большой части суши за сравнительно небольшие времена. Это явление, как следует из легенд и геологических летописей, связано с орогенным процессом, климатическими изменениями, изменением магнитного поля.

Рассмотрим, каким образом в рамках модели "горячей" Земли может быть сформулирован ответ на вопрос: почему на Земле наблюдаются, по крайней мере на последних этапах ее эволюции, периодические колебания уровня океана, трансгрессии и регрессии моря, оледенения сменяют потепления климата и т. п.? Надо сказать, что обнаружена определенная периодичность этих процессов, связь их с орогенными процессами, причем нигде и никогда не наблюдается строгой временной периодичности: события следуют друг за другом, но временные интервалы значительно меняются.

Согласно нашей модели образования и эволюции Земли, она переживает следующие друг за другом периоды расширения и сжатия, с преимуществом расширения. В течение "импульса" расширения земная кора растягивается, интенсифицируются процессы магматизма и вулканизма, "рождается" новая океаническая кора, что характерно больше для последней — океанической — стадии эволюции Земли. В последующий цикл — сжатия — образуются горы, надвиги, поднятия, реализуется пододвигание океанической коры под континент и т. п. В цикле расширения увеличивается радиус Земли, генерируется (кристаллизуется) вещество мантии, увеличивается количество воды Мирового океана, растет его поверхность. Причем, если поверхность пропорциональна  $R^2$ , а увеличение массы воды  $dR/dt$ , т. е. скорее  $\sim R$  (а не  $R^3$ , например), то глубина океана  $h$ , которая пропорциональна его массе и обратно пропорциональна площади:  $h \sim M/S \sim 1/R$ , уменьшается с ростом  $R$  (несмотря на то, что общее количество воды увеличивается). В цикле сжатия масса воды остается постоянной, а площадь океана уменьшается, следовательно, глубина океана растет. На привычном языке цикл расширения соответствует регрессии, когда уровень суши поднимается быстрее уровня моря, цикл сжатия — трансгрессии (когда наблюдается обратная картина).

Если считать, что орогенный процесс занимает последнюю стадию цикла расширения и начало цикла сжатия, то в целом он следует за более "спокойным" циклом трансгрессии моря...

Каким образом связать трансгрессии, регрессии и орогенные процессы с оледенениями? Очевидно, что оледенения обязаны своим возникновением уменьшению солнечной радиации, попадающей на Зем-



Р и с. 19. Циклы на Земле: а — сжатия (Сж) и расширения (Р); б — изменения радиуса Земли; в — орогенных процессов (Ор); г — трансгрессий (Тр) и регрессий (Рг); д — высоты уровня океана (ВП — "великие потопы"); е — оледенения (Л).

лю. Обратимся к рис. 17, на котором изображена зависимость температуры поверхности Земли от времени. Совершенно очевидно, что мы имеем дело с двумя различными процессами: радиационным охлаждением поверхности Земли (экспоненциальная кривая) и экранировкой солнечной радиации. Последняя должна особенно эффективно сказываться на этапе эволюции Земли, когда температура ее поверхности определяется не внутренней причиной, а нагревом Солнца.

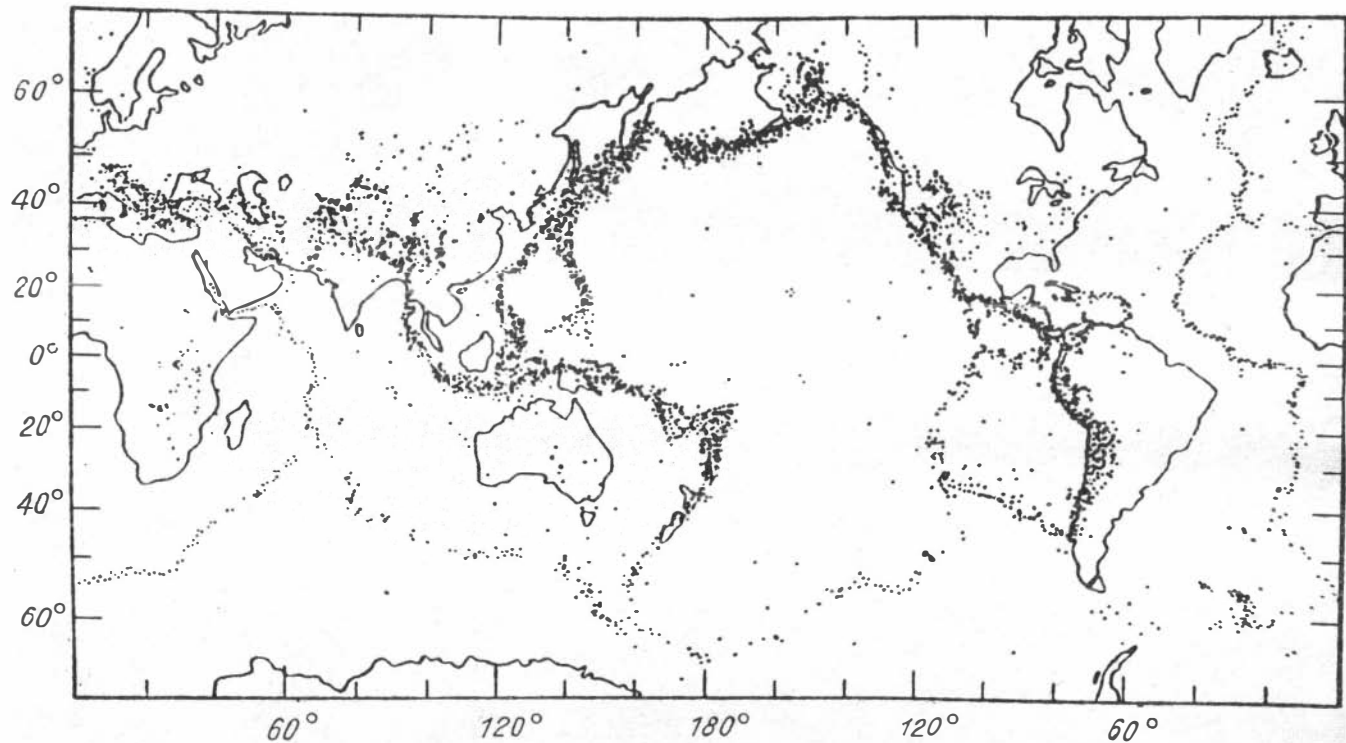
Выше мы уже обращали внимание на соответствия оледенений обратной полярности магнитного поля. Какова же причина такого соответствия, если учесть, что по модели "горячей" Земли именно при обратной полярности магнитного поля происходит расширение, т. е. увеличивается вынос тепла на земную поверхность? Единственной "разумной" причиной эффекта похолодания в момент расширения может быть экранировка солнечной радиации газообразными и пепловыми продуктами вулканизма и магматизма. В подтверждение сказанному сошлемся на книгу В.В. Орленка, который показывает, что "...почти трехсотлетние фенологические наблюдения в сопоставлении с крупнейшими вулканическими извержениями взрывного характера показали, что за большими извержениями температура на земном шаре действительно понижается в среднем на 1 — 0,5 °С" [54, с. 174].

Предложим упрощенную схему, основанную на нашей модели "горячей" Земли, в которой чередуются циклы расширения (Р) и сжатия (Сж), увеличение и уменьшение радиуса  $R$ , циклы образования гор (Ор), регрессии (Рг), трансгрессии (Тр), изменение уровня Мирового океана ( $h$ ), (ВП — "великие потопы"), циклы оледенений (Л) (рис. 19). Эта схема следует логике нашей модели, с одной стороны, а с другой — не противоречит обнаруженной В.Н. Саксом последовательности событий, связанных с оледенением: "...крупные оледенения всякий раз следовали за интенсивным проявлением складкообразовательных процессов" [54, с. 29]. Кроме этого, согласно современным наблюдениям, тектоническая активность планеты сопровождается понижением уровня моря, которое, в свою очередь, коррелирует с похолоданием [54].

## Глава 4

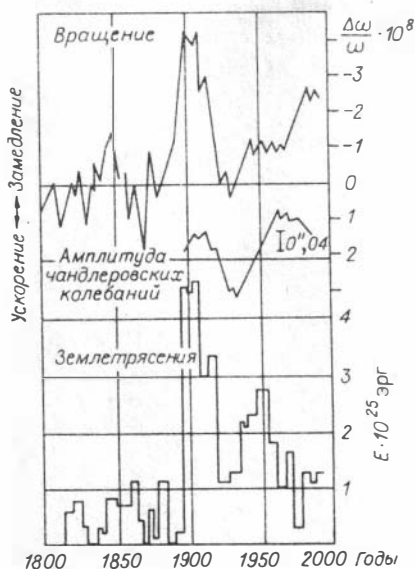
### СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

Сейсмичность, т. е. способность космического тела посредством землетрясения (лунотрясения и т. п.) "разряжаться" и "сбрасывать"



Р и с. 20. Распределение эпицентров землетрясений на земном шаре.

Р и с. 21. Вариации скорости вращения Земли вокруг своей оси за 1800—1980 гг. Изменение амплитуды чандлеровских колебаний, суммарной (за год) энергии землетрясений [87].



ослабленные, либо наиболее напряженные зоны литосферы. Глубины землетрясений варьируют от 5 до 700 км. Известен ряд корреляций, связывающих сейсмичность с параметрами Земли: высотой геоида, скоростью вращения Земли, магнитным полем и т. д. (рис. 21). Рассматривать сейсмичность Земли можно только вместе с ее моделью образования, эволюции и внутреннего устройства. Естественно, что мы будем обсуждать земную сейсмичность в рамках модели "горячей" Земли.

Еще раз обратим внимание на то, что по модели "горячей" Земли источник энергии, в том числе и энергии тектонической, — фазовый переход, реализуемый на границе внутреннего и внешнего ядра. Сюда можно отнести и менее эффективный источник — фазовый переход кристаллизации вещества мантии из ядра. Его эффективность примерно в 30 раз ниже первого. Тектонические движения обязаны действию двух механизмов: локальному или глобальному увеличению земного радиуса за счет "действия" этого источника или уменьшению радиуса под действием гравитационных сил. С этих позиций естественно видится замеченная П.Н. Кропоткиным общая для Земли тенденция к сжатию, наблюдаемая в настоящее время повсеместно на Земле, даже в зонах так называемой субдукции [34]. Развивая модель "горячей" Земли, представим себе, что по той или иной (обратной первой) причине на кору и мантию действуют некоторые эндогенные силы, заставляющие ее либо перемещаться, либо накапливать упругие деформации. В первом случае — движения (например, движения расплава) — диссипация энергии приведет к локальному разогреву и в конечном счете к образованию вулкана, а во втором — к землетрясению.

Изменение режима работы источника и связанное с ним локальное и глобальное изменение земного радиуса будет приводить к вариации

накопленную (?) упругую энергию, по-видимому, общее свойство для планет земной группы и больших спутников. Однако когда мы обратимся к карте землетрясений (рис. 20), становится очевидным, что если это и общее земное свойство, то проявляется оно далеко не равномерно на Земле. На нашей планете сейсмичность проявляется не повсеместно, а сосредоточена в окрестности Тихого океана и существенно меньше в нескольких других выделенных районах как на континентах, так и в океанах. Обычно это либо

момента инерции и связанной с этим вариации параметров вращения Земли (ПВЗ): скорости и величины нутации, высоты геоида, величины магнитного поля, высоты уровня воды в океане и т. п. В этом случае модель предполагает взаимосвязь и корреляцию сейсмичности с этими параметрами. Очевидно, что эта связь должна быть не столь проста, она наверняка осложнена особенностями региона, реологией его среды, влиянием местных факторов и т. д. Обсуждая возможные причины сейсмичности на Земле и собственно физику этого явления, мы обязаны затронуть основные результаты экспериментальных исследований и наблюдений и найти им естественное объяснение. Иначе наша модель окажется несостоятельной. Отнесем к известным результатам исследований сейсмичности Земли такие особенности, как закон повторяемости землетрясений, физические процессы в очаге и характер излучения сейсмических волн, а также механизм разрушений на земной поверхности.

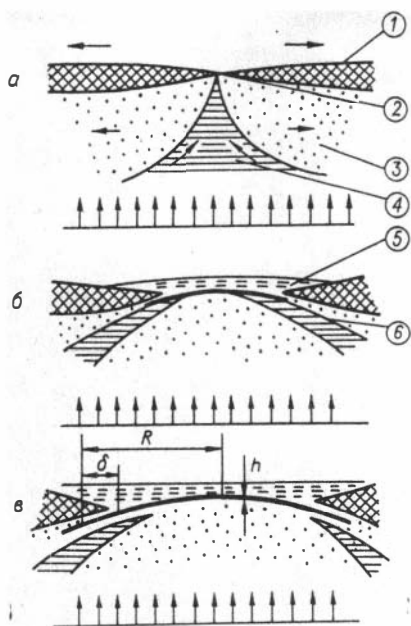
#### 4.1. ПРИРОДА СЕЙСМИЧНОСТИ ЗЕМЛИ

Итак, сейсмичность, по модели "горячей" Земли, обусловлена нестационарностью внутреннего источника энергии. Это в глобальном масштабе. Как же это явление могло бы проявиться в районе Тихого океана, например, и почему именно там? Для того чтобы ответить на этот вопрос, вернемся к модели эволюции Земли и образования океанов [36]. Как мы отмечали выше, первые 3,5 млрд лет эволюции Земли она оставалась практически в том виде, в каком была "изготовлена". Охлаждение горячего ядра происходило за счет кондуктивных процессов: мантии еще не было, не было и современных океанов. Затем, когда толщина мантии возросла до величины, при которой началась конвекция, скорость охлаждения резко увеличилась, мантия начала расти за счет кристаллизации из вещества ядра. С ростом мантии на Земле увеличилось количество воды (как продукт дегазации мантии), стали образовываться океаны. Так как земная кора была еще достаточно тонка и не столь консолидирована, как в настоящее время, то ей оказалось проще растянуться (чем лопнуть, как это, возможно, произошло в Атлантическом океане). Океаническая кора наращивалась около растягиваемой коры континентального типа, здесь образовывались астеносферные зоны. Континентальная кора при растяжении рвалась, ее фрагменты окружались океанической корой. Особенностью такого способа образования океана было то, что он "наращивался" с окраины, так как сначала формировалась его центральная часть. По мере роста океана его кора, особенно в центральной части, консолидировалась, упрочнялась, приобретала высокую жесткость.

Наша модель "горячей" Земли позволяет представить океаническую тихоокеанскую кору, как мы делали это ранее [36], в виде мембраны радиусом  $R$  и толщиной  $h$ . Края этой мембраны жестко не закреплены и уходят под континент на расстояние  $\delta$  (рис. 22). Растяжение и сжатие Земли передается от ядра через мантию на эту "мемб-

Р и с. 22. Формирование коры "океанического" типа.

а-в - различные стадии процесса; 1 - континентальная кора; 2 - место ее разрыва (рифт); 3 - литосфера; 4 - астеносфера; 5 - океан; 6 - океаническая кора.

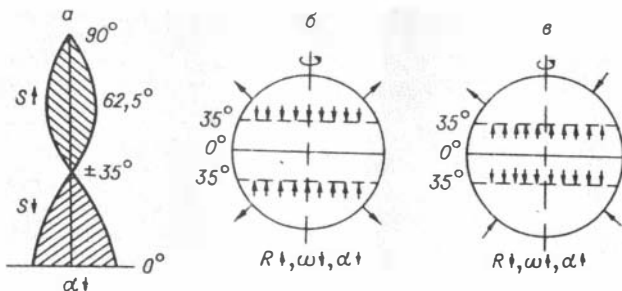


рану", она колеблется, в зонах ее контакта с материком (зоны субдукции) происходят при этом диссипативные процессы, приводящие к выделению энергии. В зоне контакта материков — "мембрана" могут возникать напряжения  $\sigma = \frac{F \cdot k}{S}$ , где  $F = mg$  — сила,  $m$  — масса "мембраны" ( $m = \pi R^2 h \rho$ ),  $S = 2\pi R \delta$  — площадь контакта "мембраны" с материком,  $k$  — коэффициент преобразования механической энергии в сейсмическую.

Оценим величину  $k$ . Известно, что суммарная энергия землетрясений равна примерно  $10^{25}$

эрг/год. Будем считать, что вся она выделяется в зоне контакта "мембраны" с материком. Потенциальная энергия "мембраны"  $P = mgv_R t$  ( $v_R t$  — амплитуда колебаний "мембраны", в настоящее время величина  $v_R t$  ориентировочно  $\sim 0,1$  см для  $t \approx 1$  год) оказывается около  $10^{27}$  эрг/год (для  $R = 5$  тыс. км,  $R$  — радиус тихоокеанской "мембраны",  $h = 5$  км, ее толщина,  $\rho \sim 3$  г/см<sup>3</sup> — (плотность вещества). Величина  $k$  порядка  $10^{-2}$ . Получаемая величина  $\sigma$  (по порядку — килобары) сравнима с напряжением разрушения горных пород.

Разовьем эту модель дальше. "Изгиб" тихоокеанской "мембраны", без сомнения, должен приводить к изменению момента инерции Земли, что, в свою очередь, должно обусловить, с одной стороны, вариацию скорости вращения Земли, а с другой — изменение амплитуды и частоты нутации или, иначе, колебания положения географического полюса. Вполне возможно, что привлечший внимание авторов работы [89] эффект резкого изменения обычно плавной кривой, описывающей положение географического полюса перед сильными землетрясениями, может найти логичное объяснение в рамках нашей модели сейсмичности. Действительно, если подобные явления, такие как глобальные колебания тихоокеанской коры, могут иметь место на Земле, то ряд перечисленных нами факторов, а также тех, которые остались пока без нашего внимания, казалось бы, могут находить непротиворечивое объяснение. Один из последних состоит в следующем. Если еще раз обратить внимание на карту сейсмичности Земли, то становится ясно, что почти вся сейсмичность и практически вся глубинная сейсмичность (до 700 км) сосредоточена на побережье Тихого океана. Хотя, казалось бы, если это вызвано субдукцией, то столько же сейсмической энергии должно выделяться и в зонах спрединга. В этих



Р и с. 23. Изменение площадей эллипсоида по широтным зонам с изменением степени сжатия  $\alpha$  (а). Направление действия сил в цикле расширения (б) и сжатия (в) [72].

зонах тоже должны были наблюдаться глубинные землетрясения (если эти процессы обусловлены конвекцией в мантии, как это следует из тектоники плит), чего на Земле не отмечено. Складывается впечатление, что наша модель действительно находит подход к взаимосвязи таких явлений, как сейсмичность (по крайней мере в районе Тихого океана), скорость вращения, амплитуда нутации, высота геоида, гединамика – движение материков [36].

Принято считать, что оставшаяся доля сейсмичности Земли (около 15–20 %) приходится на Евро-Азиатскую зону, приуроченную к широте, равной примерно  $35^\circ$  (см. рис. 20). Возможная причина сейсмичности этого региона – механизм, наиболее наглядно вскрытый, по-видимому, М.В. Стывасом [71, 72]. Суть его заключается в образовании дополнительных сил, действующих на поверхности Земли в меридиональном направлении и связанных с изменением ее ротационного режима. Стывас показал, что при изменении угловой скорости вращения Земли максимум интенсивности напряжений и деформаций приходится на зоны, близкие к параллелям  $\pm 35^\circ$ . Эти зоны возникают при изменении площадей земного эллипсоида, связанном с вариацией степени сжатия планеты, которая, в свою очередь, определяется скоростью вращения. При уменьшении степени сжатия в зонах эллипсоида от  $\pm 35^\circ$  до полюсов происходит увеличение площади эллипсоида с максимумом, приходящимся на  $62^\circ$ , в зонах от  $\pm 35^\circ$  до экватора – уменьшение ее с максимумом на экваторе.

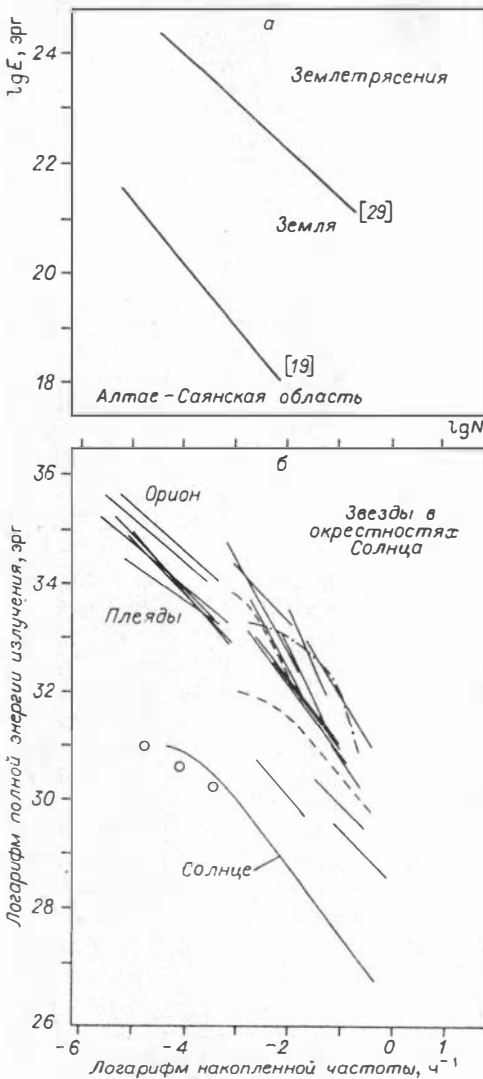
В модели расширяющейся и пульсирующей Земли при расширении ( $R$  увеличивается,  $\omega$  и степень сжатия  $\alpha$  уменьшаются) возникают силы, направленные в районе параллели  $\pm 35^\circ$  от полюсов к экватору; в цикле сжатия – от экватора к полюсам. Таким образом, и в этой модели сейсмичность (и вулканизм, как будет показано в следующей главе) оказывается физически связанной с изменением ротационного режима Земли (рис. 23).

#### 4.2. ОСОБЕННОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ИЗЛУЧЕНИЕ ОЧАГА

Научные основы сейсмологии как науки о физике землетрясений были заложены после того, как Ч.Ф. Рихтером для сравнения одного землетрясения с другим была предложена шкала магнитуд. (Магниту-



Р и с. 24. Повторяемость землетрясений (а), энергетические спектры вспышек (б).



да — относительная величина.) Шкала определяет стандартное землетрясение и "...оценивает другие землетрясения по их максимальным амплитудам относительно этого стандартного масштаба при идентичных условиях наблюдения" [29, с. 20].

Магнитуда землетрясения  $M$  по определению Рихтера:

$$M = \lg [A(\Delta)/A_0(\Delta)],$$

где  $\Delta$  — эпицентральное расстояние,  $A_0$  и  $A$  — максимальные амплитуды записи на определенном сейсмографе для стандартного и измеряемого события соответственно.

Магнитуда связана с энергией землетрясения. Так, например, для землетрясений Южной Калифорнии энергия  $E$ :

$$\lg E = 11,8 + 1,5 M.$$

Кинетическая энергия землетрясения оценивается по интегралу энергии сейсмических волн, излучаемых очагом:

$$E = 4\pi^3 h^2 c \cdot t_0 \cdot \rho (a_0/T_0)^2,$$

где  $h$  — глубина источника,  $c$  — скорость волн,  $t_0$  — длительность цуга колебаний с периодом  $T_0$  ( $t_0 = nT_0$ ),  $\rho$  — плотность среды,  $a_0$  — амплитуда волн.

Изменение магнитуды на единицу эквивалентно повышению (понижению) энергии землетрясения в 32 раза. К примеру, магнитуда  $M = 8,0$  соответствует  $E = 6,3 \cdot 10^{23}$  эрг;  $M = 7,0$  —  $E = 2,0 \cdot 10^{22}$  эрг и т. д.

В сейсмологии для классификации землетрясений кроме амплитуды используется понятие класса землетрясения  $K = \lg E$  (Дж). Землетрясение 14-го класса имеет энергию  $E = 10^{14}$  Дж =  $10^{21}$  эрг.

Одной из чрезвычайно важных и интересных особенностей землетрясений, происходящих на планете, является так называемый закон повторяемости землетрясений. Смысл его состоит в том, что землетрясения с высокой энергией происходят на Земле сравнительно редко, с меньшей — чаще, с еще меньшей — еще чаще. Гутенберг и Рихтер

Таблица 1

	Магнитуда $M$					
	>8	7,9-7	6,9-6	5,9-5	4,9-4	3,9-3
Частота $N$	1	13	108	900	6200	49000
Энергия, $10^{23}$ эрг	13,7	12,0	1,1	0,8	0,2	0,05
Часть полной энергии (год), %	49	43	4	3	1	—

показали, что средняя годовая энергия землетрясений в целом по Земле приходится в основном на землетрясения с магнитудой более 7 (рис. 24) [29].

Б. Гутенберг и Ч. Рихтер предложили связать магнитуду и среднегодовое число землетрясений соотношением [29]:  $\lg N = a + b(b - M)$ , используется также выражение [19]:  $\lg N = a - bM$ , где  $N$  означает число событий. Данные по землетрясениям дают значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , равные 0,48 и 0,9 соответственно. "Исследования для различных групп землетрясений подтвердили, что это весьма общая закономерность, широко применяемая к сейсмической активности, хотя в каждой группе константа  $a$  своя, зависящая от числа событий в этой группе. Константа  $b$  в большинстве случаев принимает значение около 0,9. Это означает, что соотношение между относительной повторяемостью землетрясений и их магнитудой одинаково для всех групп и что повторяемость увеличивается приблизительно в 8 раз при каждом шаге по шкале магнитуд вниз. Несмотря на многие исследования, все еще остается непонятным, почему коэффициент  $b$  стремится принимать значение 0,9 или, что более существенно, почему высвобождение энергии следует закону распределения для такого широкого значения магнитуд землетрясений" [29, с. 33].

В сейсмологии закон повторяемости землетрясений не обойден вниманием. Так, например, в одном из недавних выпусков журнала "Физика Земли" этому вопросу посвящены две работы [18, 39], авторы которых приходят к противоположным выводам. В одной из них, посвященной вариации наклонов графиков повторяемости землетрясений всего лишь одного (но весьма протяженного) геодинамического "объекта", "...значение параметра  $b$  для отдельных сегментов Срединно-Атлантического хребта варьирует от 0,73 до 1,38. Отклонение параметра  $b$  от среднемирового уровня в сторону уменьшения свидетельствует о преобладании в соответствующей зоне трансформных землетрясений, а в сторону увеличения — рифтовых... Аномально низкое значение параметра  $b$  характеризует Азоро-Гибралтарскую зону разломов  $b = 0,44...$ " [18, с. 12, 13]. В другой статье анализируются результаты наблюдений выделения упругой энергии в широком диапазоне размеров и структур от лабораторных образцов до рудников, горных массивов и, наконец, целого района Нурекской плотины. Изу-

чая поведение параметра  $b$ , авторы считают, что "...можно отметить удивительное постоянство этого параметра в среднем. Это отражает автомодельность процессов, протекающих в деформируемых массивах горных пород или их стационарность, которая нарушается локально в определенные периоды времени... Для четырех указанных выше объектов... диапазон энергий... перекрывает около 25 порядков. Тем не менее графики повторяемости не только качественно, но и количественно подобны..." [39, с. 67]. В этой работе определена величина  $b$  для всех исследуемых режимов:  $b = 10^{-2}$  Дж/м<sup>3</sup>.

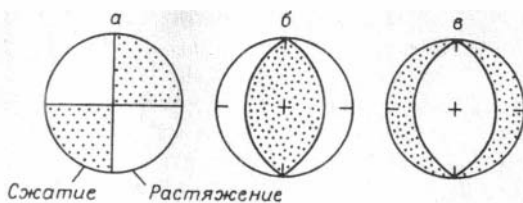
Таким образом, разные авторы совершенно по-разному относятся к этому, по-видимому, действительно нетривиальному параметру. Сошлемся на интересные, на наш взгляд, результаты исследований закона повторяемости, полученные Н.Д. Жалковским [19]. Он считает, что "...в разных районах, не одинаковых и по преобладающему типу подвижек в очагах, и по уровню сейсмической активности, распределение землетрясений по их величине остается неизменным" [Там же, с. 7]. Автор приходит к выводу, "...что магнитуды последовательных землетрясений между собой не связаны и что каждое зарождающееся землетрясение в процессе своего развития способно достичь любой возможной величины с определенной, наперед заданной вероятностью. Иначе говоря, любой толчок, в том числе самый слабый, в этом случае можно рассматривать как очередную попытку возникновения сильного землетрясения" [Там же, с. 8]. Для проверки своей идеи автор выполнил такую процедуру... Если события (землетрясения) независимы, то их статистика должна удовлетворять схеме испытания Бернулли. Для проверки отбирались землетрясения двух энергетических классов  $K$  ( $K_i$  и  $K_j$ ). Вероятности  $P(K)$  появления события, согласно испытания по схеме Бернулли, должны удовлетворять:  $P(K) = P(1 - P)^K$ , где  $K = 0, 1, 2, \dots$  Такие распределения землетрясений были построены для различных эпицентральных зон и разных значений  $K_j - K_i$ , все они в пределах случайного разброса оказались одинаковы. Н.Д. Жалковский приходит к выводу о том, что "...предположение о взаимной независимости магнитуд последовательных землетрясений... не противоречит результатам дополнительного целенаправленного анализа фактических данных..." [19, с. 9].

Отметим еще ряд интересных моментов. Автор считает, что нечувствительность закона повторяемости землетрясений к условиям их возникновения с достаточной определенностью указывает на то, что любые реальные воздействия на среду и изменения ее состояния и свойств, независимо от того, будут или не будут они отражаться в движениях земной поверхности, геофизических полях и т. д., должны вести к изменению только общего количества землетрясений, генерируемых в единицу времени, а не к изменению их распределения по величине. Фактически это означает, что вероятность возникновения сильного землетрясения в том или ином районе может увеличиться (уменьшиться) при соответствующем увеличении (уменьшении) сейсмической активности данного района.

Исследуя важный вопрос о величине предельного землетрясения в какой-либо крупной сейсмической зоне, Н.Д. Жалковский считает,

Р и с. 25. Простейшие типы разломно-плоскостных диаграмм.

*а* – разлом с подвижкой по простираанию (сдвиг); *б* – разлом с подвижкой по падению (обращенный сброс); *в* – разлом с подвижкой по падению (нормальный сброс) [29].



что его нельзя рассматривать в отрыве от

вопроса о предельной величине энергии землетрясения в целом. Однако этот вопрос, насколько известно, решения пока не имеет.

Таким образом, закон повторяемости землетрясений однозначного толкования в рамках существующих в настоящее время моделей очага землетрясения не имеет. Точки зрения разных авторов на этот вопрос принципиально различаются. Вполне возможно, что этим законом "ухвачено" некоторое общее свойство природы, так как экспоненциальное распределение вероятностей появления событий той или иной энергии встречается не только в рассматриваемом нами сейчас случае. Так, например, возвращаясь к рис. 24, видим, что аналогичный вид имеют и энергетические спектры вспышек на звездах, в том числе и на Солнце.

Что касается сейсмичности, а точнее, очага землетрясения, интересен характер излучения им волн, выражающийся в том, что сейсмоприемники, расположенные вокруг землетрясения, воспринимают колебания, идущие от него, неслучайным образом. Полярность первого импульса *P*-волны, излучаемого при землетрясении, принимает одно из двух противоположных значений: смещение направлено либо к эпицентру (соответствует сжатию), либо от него (соответствует растяжению). Расположение полярности первых импульсов по азимуту подчиняется определенной системе. Отметим, что при взрыве источник генерирует первую волну сжатия. Районы сжатия отделяются (условно, конечно) от районов растяжения так называемыми нодальными линиями, характеризующимися тем, что около них амплитуда смещения меняет направление. Основные и простейшие типы диаграмм излучений первых импульсов приведены на рис. 25 [29]. Практически единственный способ интерпретации наблюдаемого явления в настоящее время базируется на гипотезе образования землетрясения разломом и, в частности, на теории упругой отдачи (предложенной еще в 1906 г. Дж. Рейдом). В этой связи и к типам приведенных на рисунке диаграмм применима терминология принятой модели.

Таким образом, так же, как и в первом случае, предлагая принципиально новую модель происходящих в недрах Земли процессов, приводящих к землетрясению, необходимо найти непротиворечивое и естественное объяснение рассматриваемому экспериментальному факту.

#### 4.3. УДАРНО-ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. ОБРАЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ

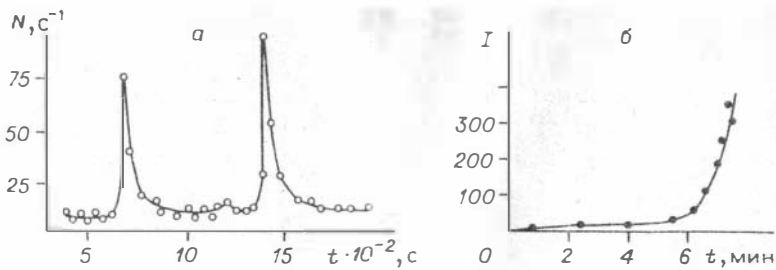
Один из важнейших вопросов сейсмологии заключается в выяснении природы механизма землетрясения, т. е. физики процессов в его

очаге. Несмотря на то, что этот вопрос стоит перед исследователями не один десяток лет, современные представления базируются тем не менее на идеях, заложенных 80 лет назад Дж. Рейдом. Суть теории Рейда состоит в накоплении упругих деформаций при постепенном нарастании перемещения блоков, образовании разрыва и резкого смещения сторон разрыва в положение, в котором отсутствуют упругие деформации. Разрыв, трещина, собственно очаг землетрясения, по Рейду, могут либо выходить на поверхность – и тогда мы наблюдаем сильное землетрясение, либо находиться под ней – во всех случаях слабых землетрясений. Несмотря на неоднократные попытки критики этих положений, другие известные модели очага землетрясения, основанные на дилатансии, и так называемой модели лавинного трещинообразования, которые недалеко "ушли" от модели Рейда, ничего принципиально нового в модели очага землетрясения так и не было сделано.

Возникает естественный вопрос: возможно, теория Рейда полностью удовлетворяет существующую сейсмологическую практику и не находит противоречия? В действительности это совсем не так. Сошлемся на Ф. Стейси, который, например, обсуждал теорию Рейда, и в частности ее положение, касающееся того, что напряжения на разломе линейно растут со временем и землетрясение происходит тогда, когда достигается определенный предел [70]. Если принять, рассуждает дальше Стейси, интервал времени между землетрясениями равным 100 годам, предел напряжения перед землетрясением порядка  $10^7$  дин/см<sup>2</sup>, то получается скорость роста напряжения  $3 \cdot 10^{-3}$  дин/(см<sup>2</sup> · с), что в 1000 раз меньше скорости изменения напряжений при лунных приливах в земной коре (7 дин/(см<sup>2</sup> · с)). Тогда, казалось бы, лунный прилив должен абсолютно четко проявляться в периодичности появления землетрясений, чего в действительности не наблюдается.

Далее, Стейси считает, что нужно отказаться и от предположения Рейда о том, что движения в очаге землетрясения представляют собой скольжение по поверхности разрыва (или, как еще говорят, вспарывание трещины), и приводит такие оценки. Для осуществления скольжения по поверхности разрыва необходимо, чтобы касательное напряжение на разрыве превосходило нормальное. Нормальное давление литосферы примерно равно давлению вышележащих слоев и составляет для пород средней плотности  $3 \cdot 10^8$  дин/см<sup>2</sup> на каждый километр глубины. Предел прочности обычно принимается равным  $10^8$  дин/см<sup>2</sup>, что и "...ограничивает возможность скольжения по разломам глубиной около 300 м" [70, стр. 243].

Возражения Стейси против теории Рейда представляются автору настоящей работы весьма убедительными и вполне достаточными для того, чтобы считать возможным высказывать альтернативные, принципиально новые идеи в сейсмологии. Несколько предваряя объяснение нашей модели, скажем, что сильное землетрясение, когда происходит разрушение горных пород, без всякого сомнения можно отнести к области физики высоких плотностей энергии, учитывая,

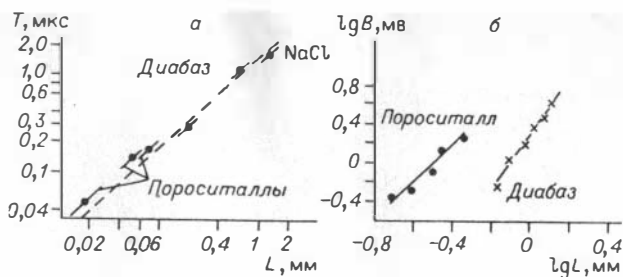


Р и с. 26. Нестационарный характер поведения звуковых и электромагнитных импульсов.

*a* – скорость образования трещин в диабазе при действии постоянного одноосного напряжения [22];  
*б* – изменение интенсивности электромагнитного излучения от диабаза при действии постоянной нагрузки [40].

естественно, определенную специфику. Есть и другая область физики, которая стала чрезвычайно бурно развиваться в последние двадцать лет, – нелинейная волновая физика, в значительной степени "захватившая" такие области физики, как радиофизика и физика плазмы, оптика и акустика и т. д. Она частично проникла и в сейсмологию, но лишь в те ее разделы, которые касаются вопросов распространения сейсмических волн в "мутных", нелинейных средах. По-видимому, было бы несправедливо по отношению к физике Земли не воспользоваться богатым опытом, приобретенным в физике нелинейных волновых явлений: физике образования и распространения уединенных волн, солитонов, ударных волн и т. д.

Особенности процесса хрупкого разрушения горных пород наиболее наглядно проявляются во временной зависимости скорости образования трещин. Скорость образования трещин, как было выяснено в лабораторном эксперименте [5], весьма неодинакова во времени, несмотря на действие постоянной нагрузки. На рис. 26, *a* [22] видно, что в некоторые моменты времени скорость образования трещин резко возрастает, а затем восстанавливается до прежнего уровня. Авторы этой работы считают маловероятным, чтобы во всем объеме нагруженного образца резко повысилась активность трещинообразования. По их мнению, это возможно лишь в некоторой области нагруженного образца, оказавшейся по каким-то причинам в особом положении. Активность трещинообразования образца горных пород, как следует из экспериментов, стабилизируется, однако эта выделенная область (по мнению авторов [22]) может впоследствии играть в разрушении образца особую роль, так как она (область) является очагом с повышенной концентрацией трещин. Надо сказать, что замеченное авторами явление не нашло объяснения, хотя "...такие локальные вспышки активности разрушения представляют интерес, поскольку они моделируют разрушение некоторой области в "стесненных" условиях, характерных для разрушения в земной коре. В связи с этим более детальное изучение кинетики развития такого локального разрушения может помочь в выяснении причин появления форшоков и афтершоков, а возможно, и объяснить природу некоторых предвестников землетрясений" [22, с. 83]. (Заметим, что предположение авторов о



Р и с. 27. Связь размеров образующихся под нагрузкой трещин ( $L$ ) с длительностью (а) и амплитудой акустических сигналов (б) [40].

локализации трещинной активности образца в некотором ограниченном объеме осталось также недоказанным.)

В дальнейшем развитии этих экспериментов изучалась акустическая эмиссия нагруженных образцов. При этом регистрировались параметры упругих волн разгрузки при образовании трещин, а также размер трещин [40]. Акустические сигналы, возникающие при микроразрывах, принимались пьезоэлектрическим преобразователем давления. Датчик и образец помещались в жидкость, что позволяло регистрировать продольные волны, не искаженные наложением поперечных и отраженных волн. В экспериментах была обнаружена единая в целом для различных испытуемых образцов материалов зависимость между длительностью ( $t$ ) и амплитудой ( $B$ ) акустических сигналов и размерами образующихся трещин ( $L$ ) (рис. 27). Это означает, что в реальной геологической среде будут образовываться трещины со скоростью  $V_{\text{ТР}} = L/t$ , одинаковой для различных образцов при равной нагрузке. Более того, в этой работе экспериментально достаточно четко зафиксирован факт, показывающий, «...что образование трещин сопровождается излучением электромагнитного импульса. Специальными модельными экспериментами было установлено, что электромагнитный импульс формируется ускоренным движением зарядов, появляющихся на "берегах" образовавшегося разрыва сплошности» [40, с. 28]. В описываемых экспериментах наблюдалась также зависимость интенсивности электромагнитного излучения во времени при постоянном одноосном сжатии. Как и в случае акустической эмиссии, временная зависимость интенсивности электромагнитного излучения при действии постоянной нагрузки на образцы горных пород имеет явно нестационарный характер (см. рис. 26,б).

В этих экспериментах величина нагрузки по всему сечению образца составляла примерно  $10^8$  дин/см<sup>2</sup>. Сейсмическая энергия, или (в нашем случае) энергия акустической эмиссии, линейно возрастает с увеличением нагрузки, причем энергия эмиссии меняется не очень сильно при изменении скорости деформации. Так, при изменении скорости деформации на 6 порядков (от  $10^{-3}$  до  $10^{-9}$  с<sup>-1</sup>) [5] сейсмическая энергия уменьшалась менее чем на 2 порядка. Гораздо сильнее меняется средняя величина сейсмической энергии, выделяющейся в единицу времени (т. е. мощность). Мощность сейсмической эмиссии

линейно возрастает с ростом скорости деформации [5, с. 126]. В этой работе была определена также доля сейсмической мощности по отношению к мощности деформирования. Эта доля для различных испытуемых образцов не превышает сотых долей процента ( $10^{-4}$ ).

Сделаем несколько замечаний общего характера, которые потребуются нам в дальнейшем. Образование трещины и ее рост представляют собой некоторое движение сплошной среды. Уравнение движения частицы этой среды, записанное в проекции на координатные оси, будет:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \sum_{\kappa=1}^3 \frac{\partial f_{\kappa}}{\partial x_{\kappa}} \quad (i = 1, 2, 3),$$

где  $\rho$ ,  $u$ ,  $f$  – соответственно плотность среды, скорость частицы и действующая сила.

Величины напряжений зависят от степени деформации среды. Эта зависимость выражается реологическим уравнением состояния:

$$f_{ik} = \lambda \sum_{j=1}^3 u_{ij} \cdot \delta_{ik} + 2\mu u_{ik}.$$

Здесь  $\lambda$  и  $\mu$  – постоянные Ламе,  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера. Подставляя второе уравнение в первое, получаем уравнение Навье–Стокса:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \text{grad div } u + \mu \nabla^2 u.$$

Это уравнение распадается на два независимых волновых уравнения:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 u \quad \text{и} \quad \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 u,$$

которые описывают возмущения, распространяющиеся со скоростями

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{и} \quad v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}.$$

Таким образом, движения частиц в сплошной среде приводят к появлению возмущений, распространяющихся со скоростью звука в этой среде.

Звуковая волна (амплитуда волны, точнее, амплитуда смещения частиц среды –  $A$ ), распространяясь по среде, создает волновое поле, частицы среды в котором приобретают колебательную скорость (скорость смещения)  $u' = \partial u / \partial t = i\omega u$ . Амплитуда колебательной скорости равна  $i\omega A$  (умножение на  $i$  означает сдвиг фаз между смещением и скоростью на  $\pi/2$  – скорость опережает смещение). Деформация равна  $\omega A / c$ , где  $c$  – скорость звука в среде.

Распространение акустической волны сопровождается увеличением давления (напряжения) в среде, при этом амплитуда напряжения равна  $\rho c \omega A$ . Частицы среды под действием волн приобретают ускорение  $\omega^2 A$ . Плотность энергии акустической волны в единице объема среды равна  $1/2(\rho \omega^2 A^2)$ , интенсивность звука равна энергии, переносимой через единичную площадку в единицу времени  $I = 1/2(\rho c \omega^2 A^2)$ .



Вернемся к результатам экспериментов по исследованию процессов образования трещин и предпримем попытку найти объяснение весьма интересного экспериментального результата, приведенного на рис. 26,а. Напомним, что этот результат не нашел какого-либо правдоподобного объяснения. Итак, трещина со временем растет при постоянной, не изменяющейся нагрузке на образец. При этом увеличивается и длительность акустического импульса. Анализ рис. 27 показывает, что скорость роста трещины  $v_{тр} = L/t = \text{const}$  ( $v_{тр} = 10^5$  см/с). Акустический импульс (волна), образующийся вместе с трещиной, распространяясь в среде, взаимодействует с ней. Импульс несет определенную энергию и способен создавать давление  $p = \rho c \omega A$ , прибавка которого к общему статическому напряжению  $\sigma_0$  (вызываемому внешними силами) будет усиливать эффект образования новой трещины и ее интенсивный рост, что вызовет генерацию следующего акустического импульса и т. д. Казалось бы, очевидным условием такого резонансного взаимодействия: трещина – волна – трещина должно было бы быть равенство скорости образования трещины  $v_{тр}$  и скорости смещения частиц под действием волны в сплошной среде  $\omega A$ :  $v_{тр} = \omega A$ .

Скорость развития трещины можно оценить из кинетической теории прочности:

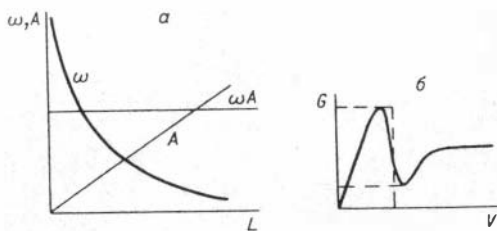
$$v_{тр} = c \cdot e^{-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}},$$

где  $c$  – скорость звука в среде,  $U_0$  – энергия активации разрушения (имеет смысл предела прочности и равна теплоте сублимации вещества),  $\sigma$  – напряжение разрыва,  $\gamma$  – показатель концентрации напряжений в нагруженном образце,  $kT$  – тепловая энергия образца. Скорость смещения частиц среды под действием акустической волны, как мы отмечали, складывается из частоты  $\omega$ , имеющей смысл обратной длительности звукового импульса:  $\omega = 1/t$  или, как мы показали выше,  $\omega = c/L$ . Величина  $A$  – амплитуда смещения частиц среды под воздействием звуковой волны. Подставим полученное в наше условие:

$$c \cdot e^{-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}} = c \frac{A}{L}, \text{ или } A = L \cdot e^{-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}},$$

причем так как  $e^{-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}} \ll 1$ ,  $A \ll L$ , но  $A = b \cdot L$ , где величина  $b$  – почти константа. Отсюда следует, что если при  $\sigma_0 = \text{const}$

происходит увеличение размера трещины (см. рис. 27), то должна увеличиваться и амплитуда коле-



Р и с. 28. Амплитуда ( $A$ ) и частота ( $\omega$ ) колебаний в зависимости от длины трещины ( $L$ ) (а); зависимость силы,двигающей трещину ( $G$ ), от скорости разрыва ( $V$ ) (б) [49].

баний  $A$ , но для выполнения требования:  $\omega A = \text{const}$  частота должна уменьшаться обратно пропорционально  $L$ :  $\omega \sim 1/L$  (см. рис. 28, *a*).

Таким образом, если в системе, нагруженной не изменяющимся во времени давлением ( $\sigma = \text{const}$ ), выполняются определенные условия:  $v_{\text{тр}} = \omega A$ , то возможна, в принципе, передача упругой энергии по цепочке: трещина – волна – трещина. Это может привести к самопроизвольному возрастанию количества образующихся трещин, что, вполне возможно, и наблюдалось в эксперименте, изображенном на рис. 26. С точки зрения нашей модели в экспериментальном образце возникают условия, типичные для активной нелинейной среды, в которой могут образовываться положительные обратные связи, что в конечном счете приводит к генерации; в рассматриваемом нами случае – к генерации лавинного трещинообразования, связанного с генерацией звукового поля.

Возможно, что предлагаемый нами механизм образования акустически активной среды действительно может быть причиной спонтанного роста количества трещин (и соответственно звуковых импульсов) в нагруженном статической нагрузкой образце. Вполне возможно, что он (этот механизм) проявляться будет эффективнее при сравнительно небольших скоростях роста трещины, при которых, согласно [49], сила,двигающая трещину, сначала возрастает с увеличением скорости ее роста, затем убывает и, наконец, выходит на некоторый стационар (см. рис. 28, *б*). В области зависимости, в которой сила уменьшается с ростом скорости образования трещины, возможно, что "...часть энергии для разрушения материала у края трещины может доставляться немеханическим путем" [49, с. 10]. В нашей модели возможно, что эту роль выполняют акустические колебания, возникающие при образовании и росте трещин.

Оценим, насколько рассматриваемая нами модель образования акустически активной среды чувствительна к направлению приложения сил, вызывающих образование трещины в образце горной породы. Для начала сошлемся на широко известный экспериментальный факт из механики разрушения горных пород [33].

Образец горной породы в виде куба сжимался по вертикальной оси до его разрушения. "Геофизики проделывали эту процедуру над тысячами образцов пород и всякий раз убеждались, что картина разрушения включает как элементы закономерности, так и случайности. Разрушение происходит в виде микроразрывов, располагающихся под углом  $45^\circ$  или чуть меньше к вертикальной оси. Эта особенность носит систематический характер..." [33, с. 236].

Объяснение этому факту находит механика разрушения [63]. Для оценки степени насыщенности образца трещинами вводится параметр  $\omega$ , монотонно растущий с увеличением плотности микротрещин (в начале опыта  $\omega = 0$ , в момент разрушения  $\omega = 1$ ). Этот параметр определяется через  $l_x$  – деформацию в момент разрушения и  $p$  – параметр разрушения:  $\omega = p/l_x$ . Критерий разрушения состоит в равенстве:  $l_x = p$ . Таким образом,  $\omega$  – однородная функция, имеющая первый

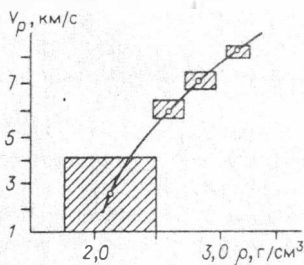
порядок и показывающая состояние среды:  $\omega = 0$  – далеко до разрушения;  $\omega = 1$  – разрушение.

Будем считать, что разрушение образца обязано действию механизма кратковременной ползучести. Механизм ползучести вызывается растрескиванием, в отличие, например, от пластичности. Как и ранее, будем считать, что в образце имеется некоторое выделенное направление, соответствующее приложению разрушающих сил. Направление, в котором преимущественно будут распространяться трещины при разрушении образца, составляет с первым углом  $\varphi$ , причем  $\text{tg}\varphi = \pm \sqrt{1 - \omega}$  [63]. Отсюда следует, что для образца горной породы, в котором нет предварительно созданных трещин для механизма кратковременной ползучести (кратковременная ползучесть – это увеличение значительных деформаций (2–3 %) за сравнительно малые времена (секунды)), разрушение происходит под углом  $45^\circ$  и меньше (если  $\omega > 0$ ). Эта особенность поведения среды – разрушаться под углом в  $45^\circ$  к направлению действия на нее нагрузки, по-видимому, может быть использована в модели "организации" землетрясения при векторном суммировании нагрузок различного типа, как геодинамических, так и приливных, атмосферных и прочих, играющих роль "спусковых".

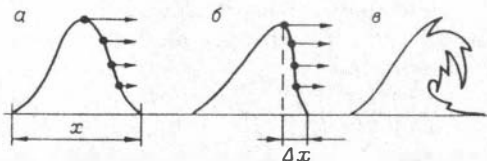
#### 4.4. ВОЗНИКНОВЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Рассмотрим процессы, связанные с образованием трещин и генерацией волн, которые могут происходить в коре и верхней мантии Земли, базируясь на представлениях об акустически активной среде. Представим, что некоторый объем твердой породы подвергнут упругому воздействию с напряжением  $\sigma_0$ . (Не будем касаться вопроса о причине появления  $\sigma_0$ , будем считать, что это напряжение не меняется во времени.) Учтем известный факт, согласно которому в литосфере Земли с увеличением глубины возрастает величина скоростей распространения сейсмических волн (скоростей звука), а также увеличивается плотность вещества. Выясним характер зависимости  $v_p = f(\rho)$  в литосфере Земли: производная положительна (рис. 29), а среда нелинейна.

Будем следовать книге [23], где, в частности, показано, что волна, распространяясь в нелинейной среде, изменяет свою форму от сим-



Р и с. 29. Скорость  $p$ -волн в зависимости от плотности пород.



Р и с. 30. Укручение (б) и опрокидывание (в) волны (а – исходная волна). Стрелками показано направление движения волнового профиля [23].

метричной вначале к волне с крутым фронтом (рис. 30). Укручение волны связано с тем, что материальные частицы среды, находящиеся в ее пучности (где плотность выше), движутся быстрее, чем соседние частицы вне пучности волны, где плотность среды ниже. Этот эффект возможен, если наблюдается зависимость  $dv_p/d\rho > 0$ , что имеет место при распространении сейсмических волн в литосфере Земли. Волновой профиль укрущается и, в принципе, может привести к опрокидыванию волны. "Существует множество примеров опрокидывания волн, из которых, может быть, самым наглядным является образование барашков на поверхности моря при сильном разгоне волн ветром" [23, с. 188].

Опрокидывание волны возникает тогда, когда ширина фронта волны  $\Delta x$  становится бесконечно малой, а наклон профиля волны становится перпендикулярным к оси  $x$  распространения волны. Можно задать вопрос: всегда ли в нелинейной среде возникает эффект опрокидывания волны? Оказывается, есть по крайней мере два механизма, сдерживающих опрокидывание волны. Это, во-первых, механизм диссипации среды. Когда вязкость среды не бесконечно велика и не слишком мала, возникает конкуренция двух противоположных процессов: укручение волны из-за нелинейности и затухание из-за вязкости. Этот процесс описывается так называемым уравнением Бюргерса:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2},$$

где  $\nu$  – коэффициент вязкости, строгое решение которого, когда "...опрокидывание не происходит, является примером образования ударной волны. Действительно, в ударной волне могут существовать скачки плотности и скорости, нормальной к фронту волны. Это и происходит в данном случае" [23, с. 192].

Процесс остановки опрокидывания волны и образования ударной волны определяется, как уже ранее отмечалось, конкуренцией между нелинейностью и затуханием. Это взаимоотношение выражается с помощью безразмерного числа Рейнольдса ( $Re$ ), которое равно отношению нелинейного члена уравнения к вязкому. Для оценки воспользуемся его определением:  $Re \sim \frac{v_x}{\nu} \sim \frac{x^2}{\nu t} \sim \frac{x_0}{\Delta x}$ , где  $x_0$  – размер "длины волны",  $\Delta x$  – ширина фронта ударной волны. "Разумные" значения числа  $Re$  лежат в пределах  $0 \ll Re \ll \infty$ . Для их достижения "потребуются" вполне определенные значения коэффициента вязкости  $\nu$ . Принимаемые обычно для оценок коэффициента вязкости вещества литосферы значения  $\nu \approx 10^{17}$  П, по-видимому, "выводят" число  $Re$  из интервала "разумных" значений, что ставит под сомнение этот механизм стабилизации фронта ударной волны.

Нам остается обратиться ко второму механизму, сдерживающему опрокидывание волны. Этим механизмом может быть дисперсия волн, т. е. нелинейная зависимость частоты фурье-гармоник от волнового числа  $k$ :  $\omega_k = \omega(k)$  [23]. В линейном случае, при отсутствии диссипации, закон дисперсии обычно имеет вид  $\omega_k^2 = \omega^2(k^2)$ , что в акустичес-

ком приближении дает  $\omega(k) = kc - \beta k^3$ , где  $c$  и  $\beta$  – константы и  $c$  имеет смысл скорости звука.

Нелинейный член ограничивает укрупнение ударной волны. Выяснение физического смысла члена  $\beta k^3$  сопряжено с решением уравнения Кортевега де Вриза:

$$v_t + (c + v)v_{xx} + \beta v_{xxx} = 0.$$

Решение этого уравнения дает либо периодическую стационарную волну, либо уединенную волну – солитон. В последнем случае дисперсия приостанавливает укрупнение фронта волны. Характерная ширина фронта ударной волны – солитона имеет порядок  $\Delta x \sim \sqrt{\beta/\alpha}$ , где  $\alpha$  имеет физический смысл как увеличение скорости распространения ударной волны  $u$  по отношению к местной скорости звука  $c$ :  $\alpha = (u - c) > 0$ . Чем быстрее (по отношению к  $c$ ) движется ударная волна (солитон), тем короче становится ширина фронта  $\Delta x$ , и чем выше дисперсия среды, тем шире фронт ударной волны.

Разложение нелинейной ударной волны в ряд Фурье показывает, что в ее спектре имеют место гармоники высших порядков, наличие которых (дисперсия) и стабилизирует опрокидывание ее фронта. В книге [23] показано, что энергия ударной волны (ее амплитуда), период волны и ширина спектра оказываются взаимозависимыми.

Таким образом, мы показали, что в акустически активной среде, которая, по-видимому, в принципе может образоваться в литосфере под действием внешних напряжений, могут также формироваться отдельные ударные волны (солитоны) за счет укрупнения фронтов этих волн. Скорость распространения ударных волн выше, чем местная скорость звука. Укрупнение фронта волны обязано нелинейности среды ( $\partial v_p / \partial \rho > 0$ ), а ограничение этого укрупнения – ее дисперсионным свойствам. Очевидно, что для образования ударной волны в среде в ней должны возникнуть весьма специфические условия, иначе может образоваться либо очень слабая ударная волна, либо она "опрокинется" (возможно, это и есть форшоки и афтершоки).

Теперь несколько слов о направлении распространения ударной волны. Для этого воспользуемся решением аналогичной задачи, в которой исследовалось распространение ударных волн в неоднородной атмосфере с неравномерным (экспоненциальным) распределением плотности [24]. Здесь была решена задача распространения ударной волны сильного точечного взрыва в неоднородной атмосфере. Показано, что при движении волны в разных направлениях ее интенсивность изменяется неодинаково. В сторону увеличения плотности (вниз) ударная волна ослабляется и замедляется быстрее всего. Напротив, при движении вверх, в сторону резкого уменьшения плотности, она ускоряется и усиливается. Двигаясь в горизонтальном направлении (без градиента плотности), волна ослабляется, но медленнее, чем при движении вниз. Ускорение ударной волны примерно пропорционально корню квадратному из отношения плотностей:  $\sqrt{\rho_0/\rho_n}$  ( $\rho_0$  – плотность среды на той глубине, где образовалась ударная волна,  $\rho_n$  – плотность коры в том месте, где она вышла на свободную поверхность). В дальнейшем

будем использовать этот результат, нашедший вполне правдоподобное объяснение, в нашей модели очага землетрясения.

#### 4.5. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

Согласно нашей модели, землетрясение обязано образованию (генерации) ударных волн (УВ). Физически – это генерация поверхности разрыва термодинамических характеристик в определенный момент времени. Именно с этого момента к поверхности Земли начинает двигаться ударная волна по всем правилам распространения УВ, которые несколько отличаются от обычной акустики и сейсмоки [23, 24, 81].

Ударная волна, волна плотности, распространяется в сплошной среде, на ее фронте ряд термодинамических величин претерпевает разрыв. Однако разрыва в принципе не может быть: 1) в потоке вещества  $[\rho v] = 0$  (где  $[\rho v] = \rho_1 v_1 - \rho_2 v_2$ ); 2) в потоке энергии  $[\rho v (\frac{v}{2} + \omega)] = 0$ ; 3) в потоке импульса  $[P + \rho v^2] = 0$ . Написанные уравнения представляют собой систему граничных условий на поверхности разрыва [41]. На этой поверхности могут реализовываться разрывы двух типов: в первом нет потока вещества, возможен разрыв скорости, это так называемый тангенциальный разрыв; во втором есть поток вещества, скорость неразрывна, а плотность и давление претерпевают скачок. Разрывы этого типа называют ударными волнами [41].

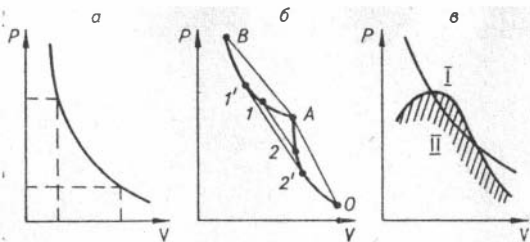
Перепишем полученные условия, имея в виду, что обозначения 1 и 2 соответствуют характеристикам среды по обе стороны скачка:

$$\begin{aligned} \rho_1 v_1 &= \rho_2 v_2 = j, \\ \rho_1 + \rho_1 v_1^2 &= \rho_2 + \rho_2 v_2^2, \\ W_1 + v_1^2/2 &= W_2 + v_2^2/2, \end{aligned}$$

где  $j$  означает плотность потока вещества через поверхность разрыва.

Введем удельные объемы:  $V_1 = 1/\rho_1$ ;  $V_2 = 1/\rho_2$ , тогда  $v_1 = jV_1$ ;  $v_2 = jV_2$  или  $\rho_1 + j^2 V_1 = \rho_2 + j^2 V_2$ , что приводит к  $j^2 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{V_1 - V_2}$ . Величина  $j^2$  положительна, следовательно,  $\rho_2 > \rho_1$ ;  $V_1 > V_2$ . Оценим разность скоростей  $v_1 - v_2$ :  $v_1 - v_2 = \sqrt{(\rho_2 - \rho_1)(V_1 - V_2)}$ . Используя полученное, определим зависимость  $\omega_1 - \omega_2 + 1/2(V_1 + V_2)(\rho_2 - \rho_1) = 0$ . Введем, согласно [41], вместо тепловой функции внутреннюю энергию  $\varepsilon$ :  $\varepsilon = \omega - pV$ , тогда полученное соотношение можно написать в виде  $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + 1/2(V_1 - V_2)(P_1 + P_2) = 0$ .

Эти формулы определяют связь между термодинамическими величинами по обе стороны поверхности разрыва. При заданных  $\rho_1 V_1$  имеется возможность определить  $\rho_2 V_2$ , воспользовавшись ударной адиабатой (адиабатой Гюгонио). Графически она изображается кривой в плоскости  $pV$  (рис. 31). Зная  $\rho_1 V_1$  и  $\rho_2 V_2$ , можно оценить величину  $j$  и соответственно скорость УВ, так как  $j^2 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{V_2 - V_1}$ .



Р и с. 31. Адиабаты: а – Гюгонио; б – вещества, испытывающего фазовые превращения; в – двухфазной системы [24].

Наряду с другими термодинамическими величинами в УВ испытывает разрыв и энтропия. В силу закона возрастания энтропии, она больше у вещества, через которое прошла УВ:  $S_2 > S_1$ . Наличие УВ приводит к возрастанию энтропии, что означает необратимость движения УВ и его диссипативный характер. Собственно диссипация происходит в тонком слое вещества, представляющего физическую ударную волну. Величина диссипации определяется внешними условиями: законами сохранения массы, энергии и импульса. Изменение энтропии для большинства не слишком сильных УВ существенно меньше скачка давления. Поэтому адиабатическая сжимаемость вещества  $-(\partial V/\partial p)$  практически всегда падает с увеличением давления, т. е. вторая производная  $(\partial^2 V/\partial p^2) > 0$ . Это правило нарушается в том случае, если в среде возможен фазовый переход.

До сих пор под УВ понималось явление сжатия вещества на фронте волны, однако в природе возможно также образование УВ разряжения (расширения).

Из физики УВ известно, что ударная волна при распространении по твердому телу может расщепляться и образовывать УВ сжатия и УВ расширения. Причем известно также, что в изотропном однофазном теле такого расщепления происходить не может. Принципиальным требованием для того, чтобы УВ могла расщепиться, является наличие у вещества, через которое волна проходит, аномальных термодинамических свойств. Если вещество обладает нормальной адиабатой — расщепления не происходит. При этом вторая производная  $(\partial^2 p/\partial V^2)$  положительна на всей адиабате, также положительна производная  $(\partial p/\partial S) > 0$ , что означает увеличение давления с ростом энтропии при постоянном объеме  $V$ . Это, в свою очередь, характеризует нормальное состояние вещества.

Другая картина бывает в том случае, если на адиабате имеется изменение знака производной, как, например, на рис. 31, б. На адиабате вещества, испытывающего фазовые (полиморфные) превращения в районе точки А, ход адиабаты аномален. В области этой точки  $(\partial^2 p/\partial V^2) < 0$ . Физически это выглядит, возможно, следующим образом. В некотором диапазоне давлений по телу, способному испытывать фазовые (полиморфные) превращения, распространяются не одна, а две УВ, следующие одна за другой. В первой УВ вещество сжимается от исходного состояния О до состояния А, соответствующего началу фазового перехода, причем скорость распространения первой УВ по невозмущенному веществу определяется наклоном прямой ОА:

$$D_1 = V_0 \sqrt{\frac{p_A - p_0}{V_0 - V_A}}. \text{ За первой волной следует вторая УВ, в которой}$$

вещество сжимается от состояния А до состояния В. Скорость распространения ее, аналогично первому:  $D_2 = V_A \sqrt{\frac{p_B - p_A}{V_A - V_B}}$ . Первая волна бежит по веществу с большей скоростью, чем вторая. Эта ситуация довольно устойчива. Если  $D_1 = D_2$ , то волны сливаются в одну.

В области А ход адиабаты аномален. Хотя во всех точках, где адиабата не имеет особенностей, вторая производная ( $\partial^2 p / \partial V^2$ ) положительна, тем не менее имеется участок, где хорда, соединяющая точки 1 и 2, целиком лежит ниже адиабаты. Среднее значение второй производной на участке 1—2 отрицательно:  $(\partial^2 p / \partial V^2)_{1-2} < 0$ . В действительности во всех точках участка 1—2, кроме точки излома А,  $(\partial^2 p / \partial V^2) > 0$ , но в самой точке  $\partial^2 p / \partial V^2 = -\infty$ , так что среднее значение производной отрицательно.

Представим себе ситуацию, когда вещество предварительно сжато УВ до состояния 1. В веществе имеется область, в которой давление и объем плавно изменяются от состояния 1 до состояния 2:  $p_2 < p_1$ ;  $V_2 > V_1$ , что эквивалентно образованию волны разряжения. Образуется скачок — ударная волна разряжения, которая будет распространяться по веществу, при этом точки 1 и 2 расходятся: верхнее начальное давление повышается, а нижнее конечное — понижается до тех пор, пока верхняя точка скачка бежит по веществу перед скачком со сверхзвуковой скоростью, а нижняя — бежит по веществу за скачком с дозвуковой скоростью. Процесс роста скачка прекратится тогда, когда вещество перейдет в состояние 1', 2'. Скорости распространения разрыва 1'—2' по веществу перед ним  $u_1$  и после него  $u_2$  определяются наклоном прямой 1'—2':

$$u_1^2 = V_1^2 \frac{p_1' - p_2'}{V_2' - V_1'}, \quad u_2^2 = V_2^2 \frac{p_1' - p_2'}{V_2' - V_1'}$$

На практике волна разряжения возникает обычно, когда УВ выходит на свободную поверхность тела. Возможно возникновение УВ разряжения и при взаимодействии УВ с веществом в области фазового перехода. В экспериментах с выходом УВ на свободную поверхность фиксировались откольные явления при подрыве зарядов взрывчатого вещества на поверхности железных образцов [24]. Отколы наблюдались также и в тех областях вещества, в которых имелась возможность к фазовым превращениям.

Аналогичное явление происходит с УВ, проходящими через вещество в двухфазном состоянии: жидкость — газ. В области критической точки жидкость — газ вещество ведет себя аномальным образом. Еще задолго до критической точки изотермы имеют перегиб, в критической точке перегиб становится горизонтальным. Адиабаты также будут иметь в этой области перегиб. На рис. 31, в изображена адиабата с аномальной выпуклостью. Заштрихована область двухфазных систем [24]. В точке 1:  $(\partial^2 p / \partial V^2)_s = 0$ , в области 11:  $\partial^2 p / \partial V^2 < 0$ .

Ударные волны при всех их особенностях подчиняются и некоторым общим правилам геометрической оптики. Этот раздел физики УВ подробно исследован Ф.Фридлендером [81] и называется геометриче-

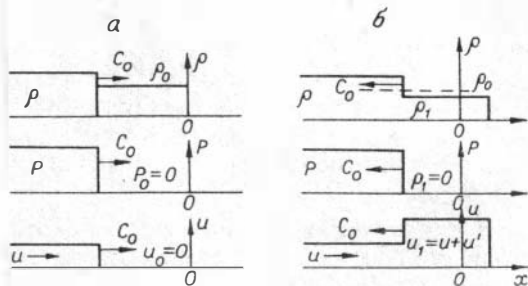


ской акустикой. Часть свойств УВ мы рассмотрели, добавим, что они способны фокусироваться, отражаться и т. п. Исследованы особенности сходящихся УВ, одномерных УВ и т. д. К большинству подобных явлений можно применить некоторый общий принцип: в акустическом приближении значительную часть проявлений УВ можно определить по законам геометрической оптики [81]. Теорию акустических скачков и разрывов можно рассматривать отдельно, изолированно от теории интегрирования волнового уравнения.

#### 4.6. ВЫХОД УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА СВОБОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Рассмотрим процессы, сопутствующие выходу ударной волны на свободную поверхность, так как именно этот механизм сопровождается разрушением поверхности и, согласно нашей модели, является собственно землетрясением — катастрофой. Так же как и раньше, будем следовать работе [24], где этот вопрос достаточно подробно рассмотрен. Упростим по возможности ситуацию и будем считать, что ударная волна, распространяющаяся по твердому телу, плоская и постоянной амплитуды (давление  $p$ , массовая скорость  $u$ , объем  $V$ , который лишь немного меньше нормального объема  $V_0$ ). В определенный момент времени волна выходит на свободную поверхность, которую в первом приближении считаем параллельной поверхности фронта ударной волны. Ударная волна распространяется по твердому телу со скоростью, немного превышающей скорость звука в среде. Давление в волне (в акустическом приближении)  $p = \rho_0 c_0 u$ , где  $\rho_0 = 1/V_0$ .

Начиная с некоторого момента (обозначим его  $t = 0$ ) выхода ударной волны на свободную поверхность, по телу назад распространяется волна разгрузки, которую тоже можно считать акустической. Она бежит по веществу со скоростью звука  $c_0$ . Давление в волне падает от начального до нуля, а вещество приобретает скорость  $u'$ , связанную с изменением давления  $\Delta p = -p$ . Легко показать, что скорость, приобретенная веществом при разгрузке  $u'$ , равна массовой скорости в ударной волне  $u$ , т. е. при выходе ударной волны на свободную поверхность скорость вещества удваивается:  $u + u' \approx 2u$  (рис. 32). Обратим особое внимание на то, что после отражения ударной волны сжатия от свободной поверхности в теле возникают отрицательные давления, т. е. на тело действует растягивающее усилие — волна разряжения. Если растягивающее напряжение превышает предел прочности вещества на разрыв, то в соответствующем месте поверхности



превышает предел прочности вещества на разрыв, то в соответствующем месте поверхности

Р и с. 32. Профили плотности ( $\rho$ ), давления ( $P$ ) и скорости ( $u$ ) при выходе ударной волны на свободную поверхность. а — до момента выхода; б — после момента выхода [24].

среды происходит разрыв, "откол" – от поверхности тела откалывается пластина материала и отделяется от остального тела, отлетая от поверхности с определенной скоростью.

Заметим, что в экспериментальной сейсмологии известны отколы пород в эпицентрах землетрясений, известны также подъемы земной поверхности во время и после землетрясений. Так, например, после печально известного Спитакского землетрясения в Армении земная поверхность поднялась на 1 м 20 см, а по сохранившимся в г. Спитаке трубам и канавам вода потекла в противоположную сторону. Подобная ситуация может возникнуть в том случае, если волна отражается в направлении, обратном к первоначальному, строго вниз. Если ударная волна приходит под некоторым углом к свободной (дневной) поверхности, а также если прочность поверхности неодинакова в горизонтальном направлении, т. е. есть ослабленные зоны, то отраженная волна может изменить направление, а следующая за ней волна разряжения вызвать образование трещин, сдвигов и других нарушений поверхности, обычно фиксируемых при землетрясениях. Все это свидетельствует в пользу предлагаемой нами модели самого механизма "очага" землетрясения, по крайней мере ей не противоречит.

Может ли ударная волна "вынести" на поверхность Земли такую колоссальную энергию, которую фиксируют при крупных разрушительных землетрясениях, достигающих до  $10^{25}$  эрг? Необходимо привести соответствующие оценки.

Воспользуемся для этого приведенными в книге В.А. Магницкого [43] количественными оценками энергии упругих деформаций, возникших во время землетрясения 1954 г. в Неваде. Сдвиг  $\Delta x$  достигал 150 см и экспоненциально убывал на расстоянии порядка  $R \approx 50$  км. Оцененная различными способами энергия этого землетрясения колеблется от 2 до  $7,5 \cdot 10^{22}$  эрг [43, с. 126]. Принимаемая в этих оценках величина  $\sigma \approx 3 \cdot 10^7$  дин/см<sup>2</sup>.

С точки зрения нашей модели ударная волна, разгружаясь на свободной поверхности, приводит к разуплотнению некоторого объема  $\Delta V$ . Ее кинетическая энергия может быть оценена как  $\epsilon \approx \rho \Delta V$ , где  $\rho = \sigma$ . Величина  $\Delta V = \pi R^2 h \cdot \Delta x / R = 3 \cdot 10^{15}$  см<sup>3</sup>, где  $h$  – глубина землетрясения ( $h \approx 30$  км),  $\Delta x / R$  – линейное удлинение, возникшее во время землетрясения. Величина  $\epsilon \approx 3 \cdot 10^{22}$  эрг, что попадает в интервал доверия энергии землетрясения, полученной на основе теории упругости, энергии объемной деформации и деформации сдвига.

Развиваемый нами "акустический" подход позволяет сделать еще ряд энергетических оценок ударной волны, являющейся причиной землетрясения. Например, примем величину удельной сейсмической энергии, характерную для сильного землетрясения, порядка  $\epsilon_s \approx 10^{10}$  эрг/см<sup>2</sup>, волновое сопротивление среды (литосферы)  $\rho c \approx (5 - 10) \cdot 10^5$  г/(см<sup>2</sup> с). Воспользуемся данными, полученными в лабораторных экспериментах с образцами горных пород (рис. 27), и положим скорость роста трещин  $v_{тр} \approx 10^5$  см/с. В соответствии с нашей моделью величина  $\omega A$  должна быть равной  $v_{тр}$ . Принятые значения величин позволяют оценить два параметра ударной волны. (Заметим, что использование

"акустического" подхода и оценка параметров УВ не совсем корректны.) Интенсивность УВ  $I_{УВ} \approx (\omega A)^2 \rho c = 5 \cdot 10^{15} \text{ г/с}^3$ , а напряжение  $\sigma_{УВ} = 5 \cdot 10^{10} \text{ дин/см}^2$ . Интенсивность можно также выразить несколькими по-другому:  $I = \epsilon_s \cdot \omega$ , но  $I < I_{УВ}$ .

В соответствии с нашей моделью очага землетрясения ударная волна, выходящая на поверхность, отражается и уходит вглубь. Очевидно, что энергия отраженной волны меньше, чем энергия входящей. Разность их идет на формирование волны разряжения и собственно на разрушение поверхности:  $I = I_{УВ} - I_{От}$ . Положим, что величина  $I$  составляет 10 % от  $I_{УВ}$  интенсивности ударной волны:  $I \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ г/с}^3$ . Так как мы приняли, что величина  $\epsilon_s = 10^{10} \text{ эрг/см}^2$ , то, в принципе, можно оценить частоту УВ  $\omega$  ( $\omega = 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  и ниже) и амплитуду смещений в УВ  $A$ : ( $A = 2 \text{ см}$  и выше).

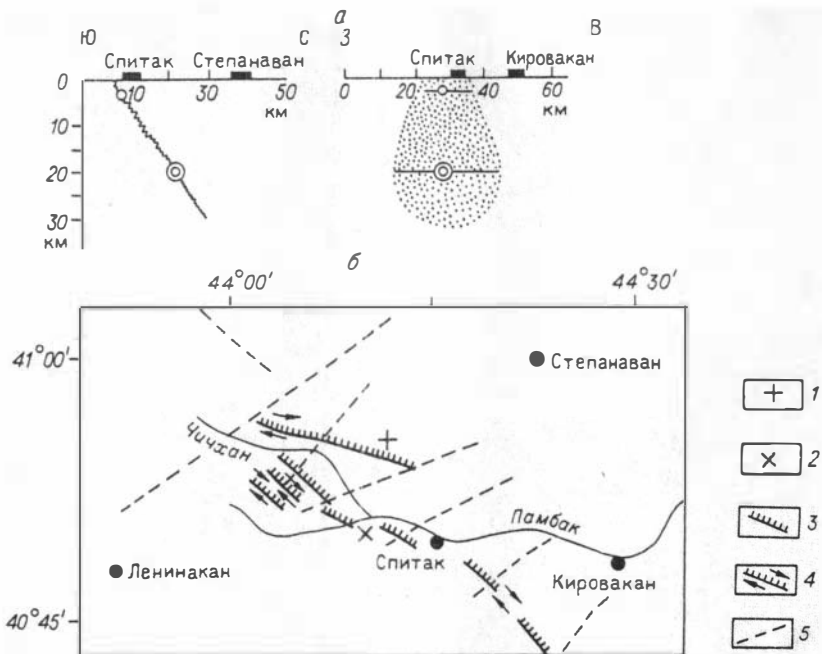
Необходимо сделать несколько замечаний общего характера. Это вызвано тем, что далеко не все моменты, на которых обычно заостряется внимание в физике очага землетрясения, были затронуты в нашей модели.

Очевидно, наша модель применима и для глубокофокусных землетрясений, и для мелкофокусных, для землетрясений разрушительных, а также форшоков, афтершоков и микросейсмов. Все дело в том, какие условия имеются в литосфере для образования акустически активной среды, генерации ударной волны и ее транспортировки к поверхности. Очевидно, например, что если в литосфере имеется инверсия параметра  $\rho c$ , то УВ не может выйти на поверхность. Также очевидно, что если  $\rho c$  на поверхности мало, то УВ и вызываемые ею разрушения только усилятся. (Не этот ли случай имел место при землетрясении, разрушившем Мехико?)

Несколько слов надо сказать об электрических и электромагнитных процессах, сопровождающих образование акустически активной среды. Возможное следствие из нашей модели: если в литосфере происходят те процессы, о которых у нас шла речь, то, в принципе, могут наблюдаться эффекты:

- электрическое поле и вызываемые им явления предшествуют и сопровождают землетрясение;
- никаких электрических эффектов на земной поверхности нет, так как, например, они экранируются высокопроводящим слоем;
- электрические эффекты имеют место, но условия образования УВ не соблюдаются и землетрясений не происходит.

Предлагаемая ударно-волновая модель очага землетрясения включает в себя три основных составляющих элемента. Это, во-первых, формирование под воздействием внешних относительно литосферы сил акустически активной среды, представляющей собой активное взаимодействие образующихся трещин и волн. Отдельные волны объединяются, усиливаются и когерентно распространяются в направлении уменьшения акустического сопротивления, т. е. к земной поверхности. Начальная скорость распространения волн близка к скорости звука. Как только волна, двигающаяся с этой скоростью, превысит местную скорость звука, она становится ударной (второй основной эле-

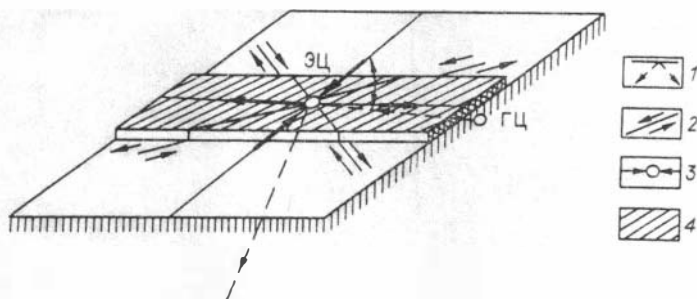


Р и с. 33. Схематические разрезы через очаг Спитакского землетрясения (а); район Спитакского землетрясения [84] (б).

1 - эпицентр главного толчка; 2 - афтершок; 3 - сейсмогенные разрывы; 4 - сдвиги; 5 - поперечные нарушения.

мент модели). Ударная волна, распространяясь в том же направлении, ускоряется и усиливается. Выходя на свободную, земную поверхность, она отражается, возникает волна разгрузки, которая и является причиной разрушения (третий элемент модели). Гипоцентром такого "землетрясения" можно считать некоторую поверхность (плоскость), предполагающуюся в глубине литосферы, на которой волна становится ударной. Ударная волна стремится укрутиться за счет нелинейности среды, этому явлению противодействуют дисперсионные свойства среды. Спектральный анализ сейсмического сигнала, соответствующего прохождению УВ от гипоцентра до выхода на свободную поверхность, должен, в принципе, нести информацию о нелинейных и дисперсионных свойствах среды.

Предложенная модель со всей очевидностью требует дальнейшей значительно более глубокой проработки, однако для того, чтобы оценить, насколько она реалистична в ее современном виде, предпримем попытку использовать основные положения модели на некоторых примерах. Начнем со Спитакского катастрофического землетрясения, о котором мы упоминали и которое считается в настоящее время наиболее изученным. После того как были проанализированы записи основного толчка, состоявшего из трех: первого - слабого, второго (через 5 с) и третьего (еще через 14 с) - сильнейших (по оценкам [84] класса  $K=15,5$ ), и сильнейшего афтершока, последовавшего через 4 мин 22 с



Р и с. 34. Модель распространения и генерации волн при Спитакском землетрясении. 1 - направление движения УВ; 2 - разрывы; 3 - направления волн сжатия и растяжения; 4 - зона разуплотнения.

( $K=14,3$ ), оказалось возможным определить параметры очага: характерные его размеры – примерно 35 км по простиранию и 40 км по падению, азимут простирания  $110-120^\circ$ , угол падения около  $50^\circ$ . Подвижка в главной части представляет собой чистый взброс. На рис. 33,а [84] изображены схематические разрезы через очаг Спитакского землетрясения, а также его карта с разломами и разрывами из работы [3]. Отметим, что если, как следует из рис. 33,а, направление главного "удара" Спитакского землетрясения происходило в направлении с севера на юг, то разломы и разрывы ориентированы под углом примерно  $45^\circ$  к этому направлению. Основной толчок пришелся на Памбакскую зону поднятия, а афтершок – на Базумскую [8].

Основываясь на развитых нами представлениях о физике очага землетрясения, представим геометрическую модель очага Спитакского феномена. На рис. 34 изображено направление удара волны от ГЦ (гипоцентра) к земной поверхности – эпицентру (ЭЦ) и отражение УВ от нее под тем же углом. В зоне действия ЭЦ возникает волна разгрузки (направленная вниз), приводящая к "вспучиванию" и основным разрушениям. В зоне действия ЭЦ УВ расщепляется, возникают волны сжатия, бегущие в направлении движения УВ, и перпендикулярно к нему – волны растяжения. Области между действиями этих волн разделяются нодальными линиями, которые пространственно совпадают с поверхностными разрывами и разломами. Согласно нашей ударноволновой модели очага, акустически активная среда образуется под действием внешней нагрузки, она способна генерировать УВ, следующие одна за другой с любой частотой и обладающие любой энергией. В этом плане наша модель перекликается с результатами исследований Н.Д. Жалковского.

Оценим направление действующих сил в зоне Спитакского землетрясения. Основное направление "удара" в Спитаке, как мы отмечали, с севера на юг и снизу вверх под углом  $50^\circ$  к горизонту. Будем следовать модели разрушения: направление преимущественного образования трещин находится под углом примерно  $45^\circ$  к линии нагрузки, поэтому направление нагрузки в Спитаке должно быть с севера на юг, или снизу вверх (нагружение могло быть и с обоих направлений).

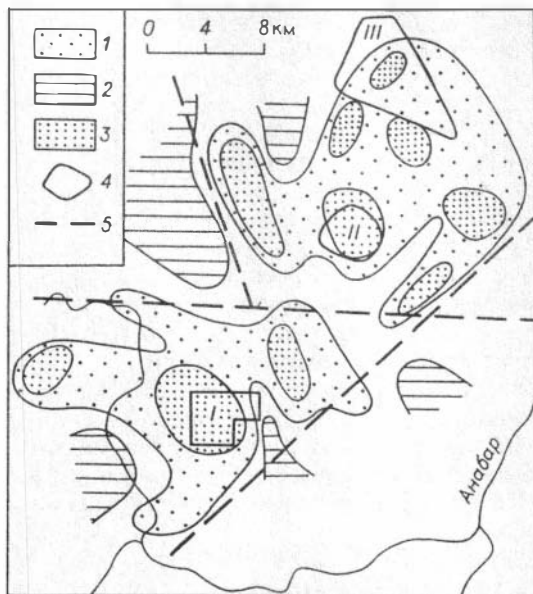
Возникает естественно вопрос: какова же причина появления нагрузок заданного направления? Заметим, что речь у нас может идти только о каких-то глобальных силах, хотя региональные причины и локальные напряжения могут, по всей видимости, значительно искажать идеализированную картину, которую можно представить, исходя из самых общих соображений, следующих из нашей модели. Тем не менее, как мы отмечали, согласно нашей модели, снизу вверх могут возникать и действовать усилия, обязанные своим возникновением глобальному или локальному расширению. Одновременно при этом в целом по Земле скорость вращения и сжатие уменьшатся, возникают силы, направленные с севера на юг и действующие в этом направлении вплоть до  $35^\circ$ . Таким образом, в северной части Земли (севернее  $35^\circ$  параллели) нагрузки снизу и с севера действуют синхронно.

Попутно заметим, что похожая картина может наблюдаться и в зонах субдукции: направление усилий снизу вверх примерно под углом  $45^\circ$  (угол субдукции) при увеличении земного радиуса должно приводить к образованию трещин и акустически активной среды в направлении вертикально вверх, как в основном и происходят землетрясения в этой зоне.

Обсудим вопрос о распределении на поверхности Земли полярностей первых вступлений. По-видимому, можно считать, что одну из задач таких распределений, изображенных на рис. 34, мы решили на примере Спитакского землетрясения. Здесь нодальные линии пересекаются в районе ЭЦ. Встает вопрос: как же должна реагировать среда, чтобы на земной поверхности возникла нодальная линия в виде круга? Это напрямую не следует из рассмотренного нами примера. Почему в случае взрыва регистрируется только волна сжатия? Постараемся ответить на эти вопросы, не выходя за рамки нашей модели с УВ.

Представим себе, что УВ подходит нормально к дневной поверхности, но на ее пути имеется дифрагирующий элемент. Это может быть, например, локальная область в недрах Земли, обладающая плотностью меньшей или большей, чем плотность у окружающего ее вещества. УВ дифрагирует и расщепляется на таком "элементе". В итоге на земной поверхности может наблюдаться результат дифракции — картина, подобная кольцам Френеля (темный или светлый кружок, вокруг которого чередуются светлые и темные кольца). В зависимости от того, собирающее или рассеивающее влияние оказывает дифрагирующий элемент на УВ, в ЭЦ землетрясения будет наблюдаться либо сжатие, либо растяжение. Дифракция, как известно, волновое явление, она возникает в так называемой волновой зоне, которая составляет, как правило, не менее 7—10 длин волн. Если принять основную частоту УВ  $\omega \approx 1\text{с}^{-1}$ , а скорость сейсмических волн 5—7 км/с, то длина волны оказывается порядка 5—7 км, а волновая зона — 35—70 км. Если наши соображения более или менее соответствуют реальной ситуации, то от взрыва, глубина которого всегда меньше длины волны и который не может находиться в волновой зоне, должна наблюдаться на поверхности Земли только картина сжатия.

Как мы отмечали выше, УВ способна фокусироваться при прохождении через фокусирующую "линзу", в качестве которой может быть,



Р и с. 35. Схема аномалий силы тяжести в Анабарском районе.

1 - отрицательные, 2 - положительные, 3 - локальные минимумы; 4 - участки диатрем (I—III); 5 - предполагаемые разломы [48].

например, выпуклая "линза" с меньшей, чем окружающая ее, плотностью. На поверхности Земли такая "линза" должна фиксироваться как отрицательная гравитационная аномалия. Представим себе такую гипотетическую картину: УВ фокусируется на "линзе", причем так, что фокус ее приходится на дневную поверхность. На подходе УВ к поверхности возникает сфокусированная

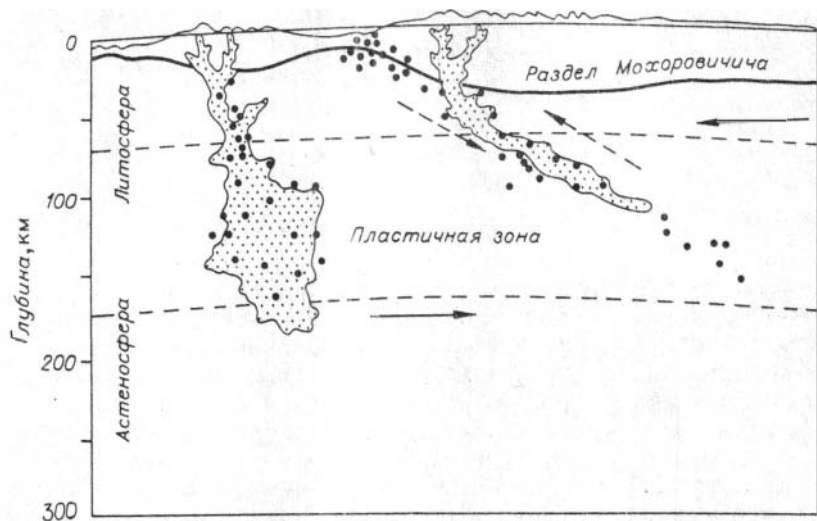
волна разгрузки, которая, распространяясь от поверхности вглубь, будет разрушать — "откалывать" и "выбрасывать" — породу из области фокуса, образуя при этом "ствол" трубки взрыва — диатремы. Возможно, что представленная "картина" процессов образования диатремы весьма далека от реальности, однако если обратиться к рис. 35 из [48], то видно, что диатремы приурочены, как правило, к отрицательным гравитационным аномалиям, а наличие такой аномалии — "линзы" — неперемнное условие фокусировки УВ.

## Глава 5

### ВУЛКАНИЗМ

#### 5.1. ОСОБЕННОСТИ ЗЕМНОГО ВУЛКАНИЗМА

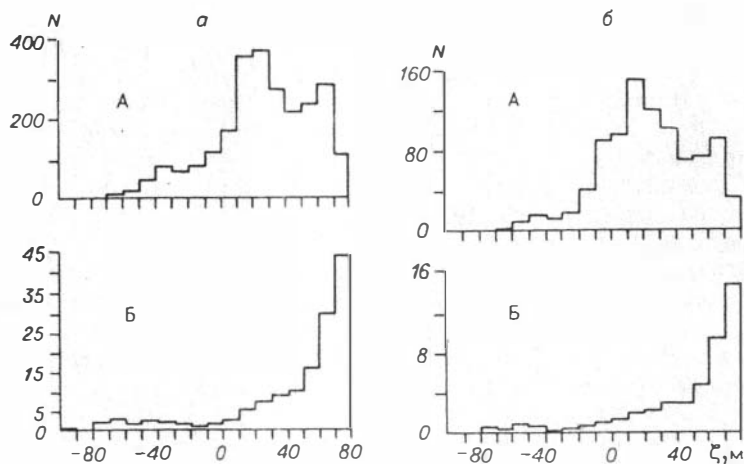
Как отмечалось выше, интегральная энергия земного теплового потока порядка  $10^{28}$  эрг/год, энергия землетрясений и вулканических извержений, как правило, не превышает  $10^{26}$  эрг/год, т. е. если уподобить Землю тепловой машине, а для этого есть основания, то КПД "механической" энергии, выделяемой землетрясениями и вулканами, составит около 1 %. Причем суммарная энергия и землетрясений, и вулканов — одного порядка, что наводит на мысль об общности этих явлений. К аналогичному выводу приходит Х. Йодер, иллюстрируя его рис. 36 [26, с. 184], на котором фокусы землетрясений (черные точки) совпадают с зонами генерации магмы. Более того, он считает, что "...существует строгая связь между землетрясением и вулканическими извержениями" [Там же]. Доказательством этой связи можно считать факт приуроченности сейсмичности и вулканизма к тихо-



Р и с. 36. Землетрясения (точки) и зоны очагов вулканов (закрапленные участки) [26].

океанскому "горячему кольцу". К этому можно добавить зависимость интенсивности землетрясений и вулканизма от формы геоида: увеличение их интенсивности соответствует повышению геоида и наоборот (рис. 37).

Рассмотрим эти рисунки и проследим связь: высота геоида – интенсивность магнитного поля [38] – источник магнитного поля – яд-



Р и с. 37. Распределение по интервалам высот геоида эпицентров сильных землетрясений мира (а) (А – гистограмма распределения по интервалам высот поверхности геоида эпицентров землетрясений, Б – то же, для плотности эпицентров землетрясений) и активных вулканов мира (б) (А – гистограмма, Б – плотность вулканов) [85].



Таблица 2

Вулканические извержения	Раст [60]	Йодер [26]	Землетрясения	Эйби [86] (в скобках указана магнитуда)
Тамбора	$1,5 \cdot 10^{27}$	$8 \cdot 10^{26}$	Колумбия	(8,9) $5 \cdot 10^{26}$
Сакурадзима		$4 \cdot 10^{25}$	Санрико	(8,9) $5 \cdot 10^{26}$
Кракатау	$1,8 \cdot 10^{26}$	$1 \cdot 10^{25}$	Арауко	(8,5) $5 \cdot 10^{25}$
Таравера	$1,4 \cdot 10^{25}$		Анкоридж	(8,4) $2 \cdot 10^{25}$

ро Земли; высота геоида – интенсивность землетрясений и вулканических извержений. Напрашивается очевидный вывод о глубинной, эндогенной природе (ядро Земли) и землетрясений, и вулканизма.

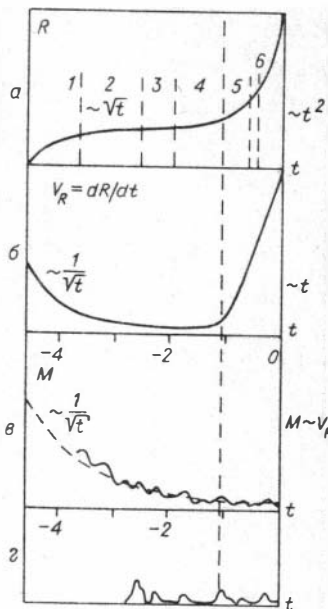
Сравним энергию самых сильных землетрясений и крупнейших катастрофических извержений (табл. 2).

Энергия самых сильных землетрясений и вулканических извержений оказывается одного порядка. По всей видимости, это не случайное совпадение. (Не могу согласиться с Йодером, который утверждает, что "...примерное совпадение величин энергии вулканических извержений и умеренных землетрясений представляется случайным" [26, с. 189].) Далее Йодер говорит о том, что существует "...тесная временная связь некоторых крупных землетрясений с извержениями" [Там же]. Исследованию временной зависимости извержений вулканов посвящена работа [47], авторы которой обнаружили некоторое существенное различие в поведении вулканов различных геодинамических зон: рифтовых (Р) и зон субдукции (С). Оказалось, что в поведении во времени вулканов этих зон "...выявлена устойчивая закономерность", суть которой состоит в том, что циклы активизации рифтовых вулканов и вулканов зон субдукции "...не совпадают во времени, а в ряде случаев попадают в противофазу" [47, с. 67]. Авторы ищут корреляцию между неравномерностью вращения Земли и активизацией вулканизма. С этой целью ими "...сопоставлены графики активности вулканов типа Р (характеризующий активизацию процесса расширения Земли) и изменения угловой скорости вращения Земли. Обнаружено поразительное сходство. Так, повышению активности вулканов типа Р соответствует замедление вращения Земли и наоборот" [47, с. 68]. Авторы приходят к выводу, "...что в настоящее время повышается активизация зон субдукции и уменьшается активизация зон спрединга" [Там же, с. 69].

Вопрос о том, насколько глобальна роль магматизма и вулканизма в эволюции Земли, не имеет однозначного ответа. По этому поводу имеется множество различных мнений, начиная от представления Г. Джеффриса о том, что "...вулканизм явление местное и случайное, а не постоянное и не повсеместное на земном шаре..." [15, с. 434], и кончая крайне противоположной точкой зрения М.А. Усова на вулканизм, который "...является существенным выражением расширения земной коры в процессе саморазвития земной материи..." [78, с. 120]. Этот вопрос не находит должного отражения в принятой на сегодня "холодной" модели Земли.

Р и с. 38. Эволюция интенсивности континентального магматизма.

*a* — изменение радиуса Земли (*R*); *б* — скорости этого изменения ( $dR/dt$ ); *в* — массы магматического расплава (штриховая линия — модель, сплошная — интенсивность континентального магматизма [26]); *г* — периодичность образования на Земле минералов [26]. Цифры на верхней кривой показывают этапы эволюции Земли [66].



Вернемся к зависимости радиуса Земли от времени ее эволюции. На рис. 38 показано изменение радиуса за время  $t$ . Зная зависимость  $R(t)$ , можно определить характер скорости расширения  $v_{R(t)}$  (кривая  $\sigma$ ), причем если на первом этапе  $R \sim \sqrt{t}$ , а на втором  $R \sim t^2$ , то на первом  $v_R \sim 1/\sqrt{t}$ , а на втором  $v_R \sim t$ . Масса вещества мантии  $M_M$  увеличивалась в течение интервала времени  $\Delta t$  со скоростью расширения  $v_R$ :

$M_M = 4\pi R^2 \Delta \rho v_R \Delta t$ ,  $\Delta \rho$  — разность в плотностях между веществом мантии и веществом внешнего ядра. Разрастание мантии (расширение Земли) происходит импульсно в течение периода  $\Delta t$ , а не во все время  $t$ . Генерация вещества мантии (кристаллизация) осуществляется, согласно нашей модели, на границе ядро — мантия. Этот процесс должен приводить к движению вещества мантии от границы ядро — мантия к поверхности Земли. Движение вещества диссипативно, причем чем выше диссипативная функция (ниже механическая добротность среды), тем большая часть энергии движения переходит в тепло. Механическая добротность в коре и мантии распределена неравномерно. Есть зона глубин (30—60 км), где она минимальна. Преимущественно на этих глубинах за счет диссипации энергии движения будет выделяться тепло, которое переведет вещество в частично расплавленное состояние.

Возникает вопрос: почему именно частичный расплав, а не расплав полный? Оказывается, что природе энергетически "выгоднее" приготовить частичный расплав, затем локализовать энергию движения в некотором объеме, избирательно нагреть этот объем, переводя его вещество в полностью расплавленное состояние, и затем транспортировать расплав на поверхность Земли, образуя при этом вулканы, дайки, траппы. Принципиальным моментом в этой схеме оказывается механизм, благодаря которому происходит локализация тепла, выделяемого при диссипативном движении сплошной среды [35].

Таким образом, модели "горячей" Земли свойственно движение сплошной среды, которое в силу диссипативного характера его приводит к вулканизму и магматизму как основному средству и способу эволюции. В качестве доказательства правомерности этого вывода рассмотрим следствия, вытекающие из нашей модели, также рассмотрим, насколько эти следствия соответствуют экспериментальным данным.

Количество вещества, излившегося на поверхность Земли, пропорционально величине  $M_M$  и, следовательно, пропорционально скорости  $v_R$ , которая на первом этапе  $\sim 1/\sqrt{t}$ , а на втором  $\sim t$ . Первый этап в нашей модели характерен для процессов, происходящих на материках, второй – в океанах. Характер излияния континентальных толеитовых базальтов в интервале от 3,5 млрд лет тому назад до наших дней известен [26], он действительно неплохо аппроксимируется кривой  $b$  (см. рис. 38). Что же касается аналогичной зависимости для океанических базальтов, то таких четких, как предыдущие, данных нет, однако известно, что с течением времени массовая скорость излияния их увеличивается [26].

Сошлемся еще раз на книгу В.В. Орленка, в которой он отмечает, что "...резкое увеличение пеплового материала в плиоценовых морских осадках свидетельствует о том, что в последние 2 млн лет вулканическая активность возросла в четыре раза по сравнению с миоценом... Вулканическая активность тяготеет к следующим интервалам: 7 – 5; 3 – 2,4; 0,9 – 0,7 и 0,5 – 0,3 млн лет" [54, с. 174]. Целесообразно сравнить эти этапы с палеомагнитной геохронологической шкалой для последних 4,5 млн лет [55]. Видно, что эпохи тектонической активности приходятся на периоды обратной (к современной) полярности магнитного поля.

"Горячая" модель Земли предполагает поначалу образование тонкой континентальной коры, которая в результате действия магматических и вулканических процессов постепенно утолщалась и упрочнялась. Если на начальном этапе эволюции Земли растянуть и прорвать тонкую кору не представляло большой сложности, то впоследствии ее растяжение приводило к образованию разломов, через которые происходило излияние. По мере развития коры образовывались крупные и прочные платформы. Затем характер эволюции Земли резко изменился, скорость расширения значительно возросла, стали образовываться сначала Тихий, а впоследствии и другие океаны.

В подтверждение модели приведем данные, полученные по анализу "каменной летописи" докембрия [66]: катархей (3,75 – 3,5 млрд лет назад; см. рис. 38, 1 – на кривой  $R$ ) характеризуется высокой подвижностью земной коры; палеопротозой (3,2 – 2,6; 2) – появление глубоких разломов, зон растяжения, вулканические излияния приурочены к зонам разломов; мезопротозой (2,6 – 1,9; 3) – возрастание консолидации земной коры, возникновение платформ; неопротозой (1,9 – 1,0; 4) – рост и консолидация больших платформ, глобальное растяжение земной коры, начало образования Тихого океана; эпипротозой (1,0 – 0,65; 5) – сильное раздробление и расчленение земной коры, раскрытие Атлантического океана; эокембрий (0,65 – 0,57; 6) – начало большой морской трансгрессии. Таким образом, восстановленная картина эволюции Земли в целом соответствует развиваемой модели.

Попытаемся оценить еще один немаловажный параметр магматических и вулканических процессов – вязкость расплава. Конечно, речь может идти только об общих, глобальных тенденциях.

Магматический процесс происходит импульсивно, в период времени  $\Delta t$ . Если принять, что скорость изменения деформации  $\dot{\epsilon} \sim 1/\Delta t$ , а вязкость  $\eta \sim \sigma/\dot{\epsilon}$ , где  $\sigma$  – напряжение, то окажется, что  $\eta \sim \Delta t$ : вязкость магматического расплава тем меньше, чем короче период активного магматизма и вулканизма. Достоверных количественных данных об изменении вязкости магматических расплавов в течение эволюции Земли, по-видимому, нет, однако общий характер магматизма, в котором в начале эволюции наблюдается излияние очень вязких "глыбовых" пород, а на более поздних этапах пород с существенно меньшей вязкостью траппов, подтверждает (по крайней мере, не опровергает) нашу модель.

Известно, что периодам интенсивного магматизма соответствуют периоды формирования эндогенных месторождений полезных ископаемых [26]. Таким образом, если наша модель находит принципиально правильный подход к проблеме вулканизма и магматизма, значит, она может иметь и практическую ценность как для решения задачи предсказания вулканического извержения, так и для понимания особенностей образования и размещения полезных ископаемых.

## 5.2. ВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ РАСПЛАВА

Из наших наблюдений следует, что вулканические извержения происходят с некоторой периодичностью (совсем не обязательно строгой). При этом движение материков сравнительно стабильно во времени. Однако раз извержения происходят не постоянно, должен быть какой-то механизм, действию которого обязан этот режим вулканизма. Очевидно, вулканическое извержение непосредственно связано с генерацией магмы. Представим себе такую модель: материк движется относительно океана (аналогия субдукции) с постоянной скоростью  $v$  ( $v = 1$  см/год). На плоскости скольжения генерируется магма вязкости  $\eta$ . Для начала решим задачу: как оценить время, в течение которого начальный объем магмы  $V_m$  удвоится за счет плавления при диссипации энергии движения.

В соответствии с [35] определим параметр  $\sigma$ , характеризующий скорость ввода энергии в систему:  $\sigma = \frac{Pr \cdot v^2}{U}$ , где  $Pr = \eta/\rho\kappa$  – число Прандтля, показывает отношение вязкости расплава  $\eta$  к его теплопроводности  $\kappa$ ,  $U$  – теплота фазового перехода плавления вещества мантии. Время удвоения первоначального объема расплава может быть оценено [35] как  $t \geq \frac{h_0^2}{\sigma\kappa}$ , где  $h_0$  – толщина начального расплава (в одномерном случае).

Рассмотрим, насколько правдоподобны два случая: 1) генерация магмы происходит за счет диссипации тектонических движений со скоростью  $v_d$  и 2) то же, но за счет паузейлевого движения малых количеств расплава, со скоростью  $v_m$ . Будем считать величину скорости движения магмы порядка 1 см/с, а скорости геодинамических перемещений – 1 см/год. Примем величину вязкости вещества в области генерации магмы – "кристаллической каши" [21] порядка

$\eta = 10^{12} - 10^{14}$  Пз. Вязкость магмы  $\eta_m = 10^7$  Пз, объем магмы, выносимой на поверхность Земли,  $V = 10^{14} - 10^{15}$  см<sup>3</sup>, т. е. характерный размер  $h_0 = 10^5$  см. Примем время удвоения объема магмы порядка одного года ( $t = 10^7$  с). Это время "нормально" соотносится со средним периодом между извержениями (сотни лет) и временем одной порции магмы во время извержения  $t_n$  ("длина" порции 20 км, скорость 1 см/с,  $t_n = 10^6$  с). Полученные выше оценки позволяют определить параметр скорости ввода энергии:  $\sigma = \frac{h_0^2}{t\kappa} = 10^5$  и далее подходящую величину скорости движения  $v_2 = \frac{\sigma U}{Pr} = 1$  см<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

Таким образом, рассмотренный нами пример показывает, что увеличения объема расплава можно добиться только при его собственном движении, а не за счет геодинамического движения, как представлялось ранее [35]. Единственной (как видится) причиной такого движения в толще Земли может быть движение Пуазейля, скорость которого [41]  $v = \frac{\Delta p}{4\eta l} R^2$ , где  $R$  - радиус трубы (в нашем случае  $R = h_0$ ),  $\Delta p$  - превышение давления,  $l$  - характерный размер ( $l$  - несколько длин  $h_0$ ;  $l \approx 10 h_0$ ). Оценим величину  $\Delta p$ , используя полученные нами выше значения:  $\Delta p = \frac{4\pi l v}{R^2} = 1$  кбар, что вполне может иметь место, так как литостатические давления на глубинах, на которых зарождаются вулканы, примерно на порядок выше (40-80 км соответствуют 10-20 кбар).

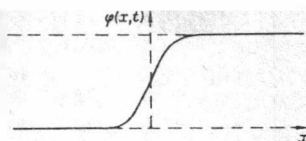
Общая картина протекания процесса генерации магмы может выглядеть следующим образом. В области частичного расплава под действием давления  $\Delta p$  возможно течение расплава со скоростью  $v_m$ . Это течение приводит к локальной генерации тепла и довольно резкому возрастанию температуры, что, очевидно, приведет к понижению вязкости расплава, скорость возрастет, так как  $v \sim 1/\eta$ , что способствует еще большему выделению тепла (поскольку этот процесс пропорционален квадрату скорости  $\sim v^2$ ). Однако, с другой стороны, скорость генерации расплава, которая определяется в нашей модели временем удвоения его объема ( $t \sim 1/\eta$ ), тем больше, чем больше вязкость расплава. При уменьшении вязкости расплава генерация его замедляется и может наступить момент, при котором скорости процессов уравновесятся. Общий вид подобной зависимости должен выглядеть примерно так, как это показано на рис. 39. Изображенная кривая напоминает известную в физике нелинейных явлений функцию, называемую одиночным кинком\* уравнения  $\sin$ -Гордон [16]. Эта функция является решением не менее известного уравнения Бюргерса, которое упоминалось нами в предыдущей главе:

$$v_t + vv_x = \eta v_{xx}$$

$$\text{или } \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}.$$

\* Kink (англ.) - петля, перегиб.

Р и с. 39. Одиночный кинк уравнения sin-Гордон [16].



Уравнение Бюргерса включает нелинейность и диссипацию и "может рассматриваться как нелинейная версия уравнения теплопроводности" [16, с. 43]. Кроме этого, уравнение Бюргерса может быть линеаризовано при помощи преобразования Коула–Хопфа. В этом случае уравнение сводится к простейшему диссипативному обобщению. Простейшим решением уравнения Бюргерса является решение Тейлора в виде ударной волны (см. рис. 39), хотя на самом деле оно непрерывно. По мере того как  $\eta$  стремится к нулю, фронт ударной волны становится все круче, однако наличие даже малого  $\eta$  предотвращает его разрушение. С другой стороны, по мере того как  $\eta$  стремится к нулю ( $\eta = \eta_0 e^{-\alpha T}$ ), возрастает объем расплавленного вещества, увеличивается давление, растет скорость  $v$ , но и уменьшаются диссипативные потери. Система имеет начальный малый расход  $Q_0$ , который увеличивается во время переходного процесса до  $Q_1$ , а затем медленно затухает, при этом происходит отток магмы, а оставшийся расплав постепенно кристаллизуется и система возвращается в исходное состояние.

Сделаем одно существенное для нашей модели замечание. Начало процесса генерации расплава было связано с появлением дополнительного давления  $\Delta p$ . Это давление может быть как внутренним, эндогенным, так и, по крайней мере частично, внешним, экзогенным. Например, в последнем случае  $\Delta p$  может быть обусловлено земными приливами и атмосферными возмущениями ("ударами"), таким образом может быть реализован режим синхронизации и "управления" процессом магнообразования со стороны внешних сил. В этом плане рассматриваемая задача имеет много общих черт с ударно-волновым механизмом генерации землетрясения. Отличие заключается только в одном: в первом случае под действием  $\Delta p$  генерируются трещины и волны, во втором – осуществляется движение расплава. Настоящий подход, возможно, находит путь к решению задач физики этих явлений, к их взаимной приуроченности, к одному порядку выделяющихся величин энергий и т. п.

Мы не затрагивали пока вопроса транспортировки магмы на поверхность Земли. Воспользуемся для этого результатами работ [20, 21], в которых исследуется возможный механизм распространения возмущения, имеющего вид уединенной волны, при течении вязкой жидкости по вертикальному цилиндрическому каналу в более вязкой вмещающей среде. Предполагалось, что такая модель может описывать функционирование магматической системы вулкана. Был предложен подход, согласно которому волна (порция магмы) распространялась вдоль канала при его возмущении. Оценены скорости распространения, длины и амплитуды волн. Автором получено решение этой задачи в случае малых возмущений, совпадающее с известным "солитонным" решением. При больших возмущениях канала скорость распростра-

нения волн гораздо выше, чем в первом случае, а полученные оценки лучше соответствуют экспериментальным данным. В последнем случае обнаружен режим передачи возмущения по типу бесконечной периодической волны. Он формируется в том случае, если расход жидкости на входе канала резко увеличить, а затем зафиксировать на некотором более высоком уровне. Обратим внимание на то, что нами выше был получен именно такой режим образования магмы (см. рис. 39). В этих работах автор делает попытку найти объяснение известному факту периодичности в динамике извержений. Период колебаний составляет 3–10 ч. Например, на Ключевском вулкане этот период в среднем равен 5,5 ч. Наблюдаемую периодичность автор объясняет реакцией вязкодеформируемого очень узкого канала на повышенную величину расхода. Для оценок используются: частота пульсаций  $\omega \approx 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , размер канала 3–6 м, вязкость магмы  $\eta = 10^5 \text{ Пз}$ , вязкость оболочки канала  $\eta = 10^{10} \text{ Пз}$ . В основу формализации задачи положено предположение о малых деформациях канала в процессе распространения "компактного" возмущения или периодической волны.

Представляется, что задачу появления периодических возмущений в режиме извержения можно попытаться решить несколько по-иному. Предположим, например, что при подъеме магмы по узкому каналу возникает турбулентность. Положим число Рейнольдса  $Re$  большим, чем критическое:  $Re > Re_{кр} = 5772$  ( $Re = 10^4$ ). Скорость подъема магмы была определена в работе [21]:  $v_* = 1 \text{ см/с}$ ; примем радиус канала  $h$  равным 1 м. По определению, число Рейнольдса  $Re = \frac{vh}{\eta}$ . С другой стороны, частота колебаний также имеет связь с числом Рейнольдса [41]:  $\omega h / v \approx Re^{-3/7}$ , или примерно  $(\omega h)^2 = Re \cdot v^2$ . Для частот колебаний  $\omega \approx 10^4$  вязкость магматического расплава должна быть порядка вязкости воды  $\eta = 10^{-2} \text{ Пз}$ . Трудно сказать, насколько реалистична предложенная модель.

## Глава 6

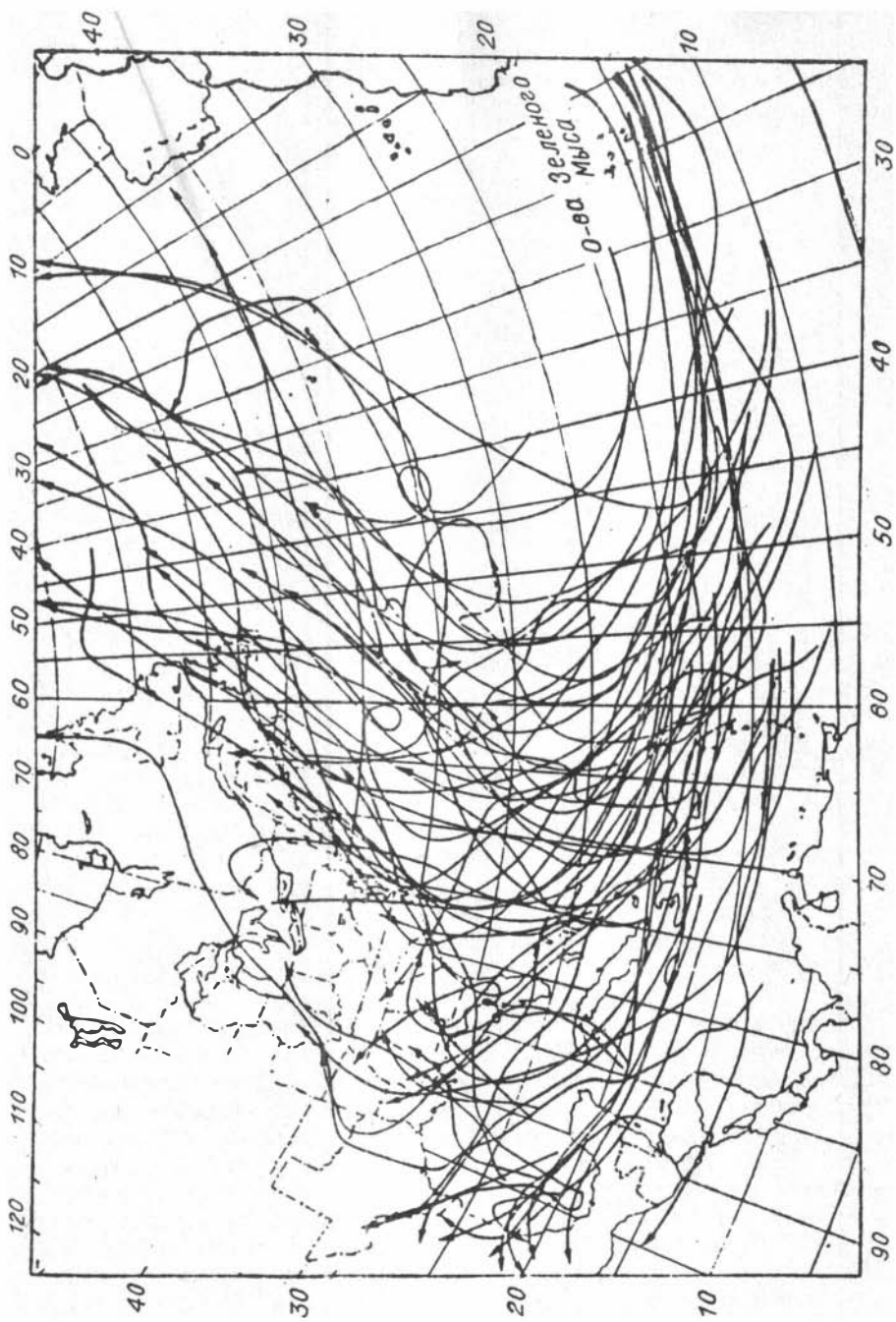
### УРАГАНЫ И ОКЕАНИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ

#### 6.1. КАТАСТРОФЫ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

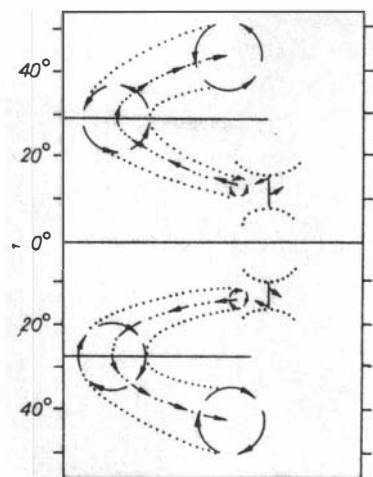
Ураганы, смерчи, океанические течения – катастрофические явления, приносящие человечеству не меньше бед, чем землетрясения и извержения вулканов. "В северном и южном полушариях, между 5° с.ш. и 25° ю.ш. возникают тропические циклоны, сопровождаемые мощными бурями. Область их действия – Карибское море, США (штаты Флорида, Техас, Луизиана), Мексика, Япония, Китай, Филиппины, полуостров Корея и частично советское Приморье, полуостров Индостан, острова Мадагаскар, Реюньон и Маврикий" [61, с. 119]. На

---

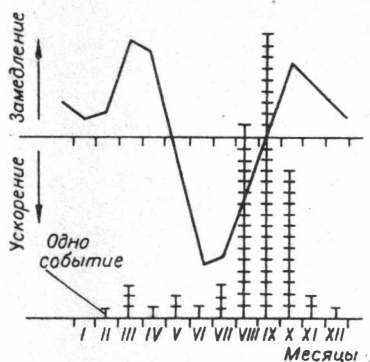
Р и с. 40. Пути атлантических ураганов [50].







Р и с. 41. Пути тропических циклонов в северном и южном полушариях.



Р и с. 42. Сезонное изменение скорости вращения Земли [37]; гистограмма распределения ураганов по времени их появления (за 100 лет).

рис. 40 изображены пути атлантических ураганов. Ураганы зарождаются в районе островов Зеленого Мыса (есть точка зрения, что это происходит в западной части Сахары), перемещаются вначале на северо-запад, затем изменяют свой путь в направлении на северо-восток. Так, например, ураган Керри (2–24 сентября 1957 г.) зародился у берегов Африки, дважды пересек Атлантический океан и распался над Южной Англией. Длина его пути составила около 11 000 км, скорость ветра достигала 150 км/ч. Другой пример – разрушительный ураган Донна (29 августа – 13 сентября 1960 г.), начавшись у берегов Африки 29 августа, он 4 сентября подошел к Антильским островам, вызвал большие разрушения и значительное число жертв. 10 сентября он пересек Флориду, вызвал наибольшие разрушения. Ураган прошел вдоль побережья США, произведя разрушения, и распался у берегов Гренландии [50].

Тропические циклоны (тайфуны и ураганы) в Тихом океане возникают в районе о. Гуам и несколько восточнее его. Начало пути тайфунов (общепринятое название ураганов в Тихом океане) аналогично атлантическим также проходит в северо-западном направлении, при этом они достигают Филиппин, Кореи, Японии, Китая; затем направление их меняется на северо-восточное. Менее известны ураганы в южном полушарии, хотя принято считать, что пути их движения симметричны относительно экватора и обратны тому, что наблюдается в северном. Иллюстрацией сказанному может служить рис. 41 [50]. Обратим внимание на то, что направления движения ураганов и тайфунов совпадают с большими теплыми течениями. "Параболическая форма поясов ураганов и их симметричное расположение по отношению к экватору могут быть объяснены только планетарной причиной – вращением Земли" [50, с. 90]. В этом плане представляет

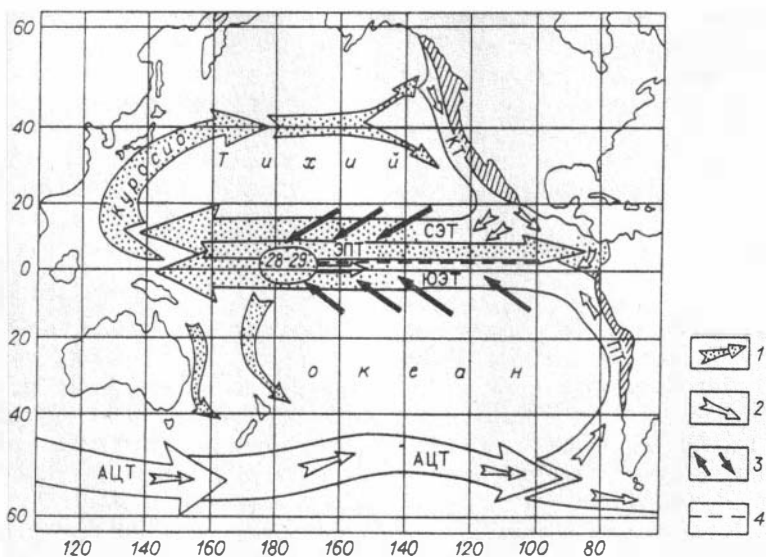
определенный интерес оценка роли вращения Земли, точнее, влияние особенностей и вариаций скорости вращения на характер зарождения и пути урагана. Для решения первой задачи (условия зарождения урагана) из хронологического указателя катастрофических явлений были отобраны все самые мощные ураганы за 100 лет (с 1864 по 1965 г., всего 66 событий). События были просуммированы по месяцам их образования. Оказалось, что ураганы образуются преимущественно в августе, сентябре и частично в октябре, именно тогда, когда Земля замедляет свое вращение за счет так называемого сезонного хода [37] (рис. 42).

Несколько слов о строении и энергии урагана. Ураган – это тропический циклон, у которого давление в центре воронки очень сильно понижается, высота воронки 10–14 км, бока крутые и вращаются с громадной скоростью. Радиус вихря составляет до 300 км, "глаз" урагана (размер воронки) у Земли – около 20 км, на высоте 2 км – 40; на высоте 6 км – 100; на высоте 10 км – 700 км. Толщина стенки воронки достигает десятков километров, средняя продолжительность урагана 9–12 дней, однако известны случаи существования урагана до 5 недель. "По разным подсчетам..., в пределах среднего урагана за день выделяется от 2,0 до  $6,0 \cdot 10^{26}$  эргов в виде тепла..." [50, с. 44].

Казалось бы, если мы нашли довольно много общего между землетрясением и вулканическим извержением, то что может объединить катастрофические ураганы, кроме, естественно, названия? Оказывается, общее есть. Во-первых, это несомненная связь с режимом вращения Земли, причем так же, как и землетрясения, и вулканы, ураганы возникают в моменты замедления вращения Земли. Во-вторых, как мы выяснили, явно прослеживается еще одна тенденция – порядок энергии. Во всех случаях (землетрясения, вулканические извержения, ураганы) величина предельной выделяемой энергии находится примерно на одном уровне – несколько единиц на  $10^{26}$  эрг. Складывается впечатление, что на Земле есть какой-то ограничитель, не позволяющий беспредельно увеличивать энергию катастрофы. В случае землетрясения, принято считать, существует ограничение за счет конечной величины прочности среды, в случае вулканического извержения – за счет конечного объема и температуры магмы, но что лежит в основе ограничения энергии урагана? Это не ясно.

Имеются ли еще общие свойства катастрофических явлений? Есть, конечно, и одно из главных – это переход скачком. Как мы отмечали, землетрясение (по нашей модели) – это формирование УВ, извержение вулкана – так называемый кинк. Скачком формируется и ураган и также резко распадается. Одно из общих свойств рассматриваемых катастрофических явлений – проявление сингулярности. Повидимому, к общим свойствам можно отнести и определенную географическую приуроченность. В случае ураганов это так называемые "параболы ураганов", отсутствие их в приполярных районах и на экваторе и т. д.

Последним из рассматриваемых нами катастрофических явлений будет явление в океане, называемое Эль-Ниньо, что по-испански означает младенец. Так иронически называли аномальное потепление



Р и с. 43. Основные течения Тихого океана.

1 - Антарктическое, 2 - Перуанское (Гумбольтово), 3 - Северное-экваториальное, 4 - Южное - экваториальное [79].

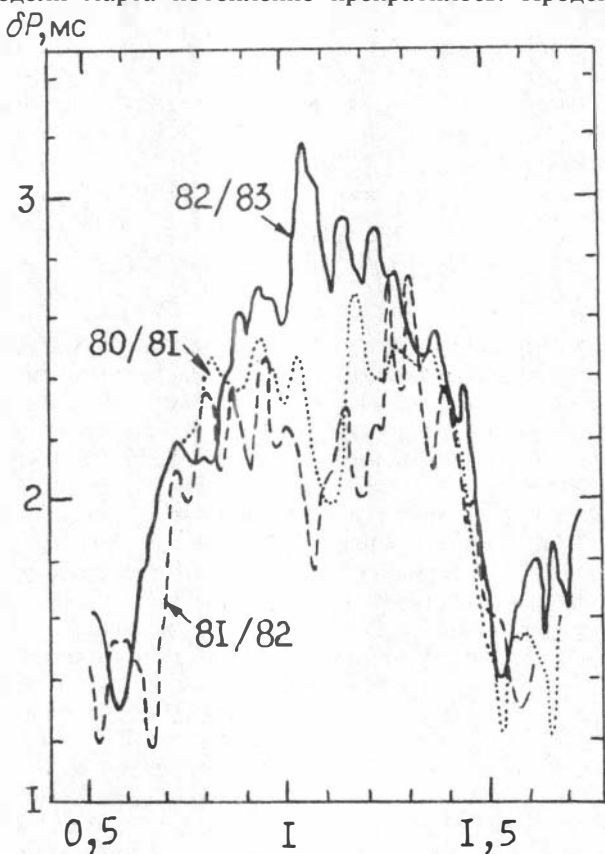
вод у побережья Эквадора и Перу, случающееся раз в несколько лет. Это ласковое название отражает только тот факт, что Эль-Ниньо приходится на рождественские праздники (конец декабря). В самом явлении, однако, ничего доброго нет, это катастрофическое потепление вод океана (на 10–14 °С) вызывается исчезновением Гумбольтового (Перуанского) холодного течения, которое омывает Тихоокеанское побережье Южной Америки и берет свое начало из Антарктического течения, вызывая подъем холодных глубинных вод – апвеллинг (рис. 43). Гумбольтово течение стабилизирует температуру на побережье Эквадора и Перу на уровне 15–19 °С, в то время как Эль-Ниньо повышает ее до 25–29 °С.

Особенно сильное, катастрофическое явление Эль-Ниньо наблюдалось в 1982–1983 гг. Начавшись в сентябре – октябре 1982 г., оно не закончилось к августу 1983 г., превысив все временные, температурные и географические масштабы [79]. Надо сказать, что конец 1982 и начало 1983 гг. отмечены многими другими необычными природными явлениями и аномалиями [79], однако наиболее ярким было именно Эль-Ниньо, в большей степени, чем другие эффекты, характеризующееся аномалией температуры поверхности океана (ТПО). В свою очередь "...аномалия ТПО в океане и аномалия ветра в атмосфере развивались удивительно синхронно" [79, с. 74]. Атмосфера получила из океана столь огромное избыточное количество тепла, что в январе 1983 г. на всем западном полушарии на высоте 9 км наблюдалась гигантская положительная температурная аномалия (до 4 °С). Это обстоятельство вызвало существенное изменение силы и направления ветров: засуха в Австралии, проливные дожди на Северо-Атлантичес-

ком континенте, не замерзало Охотское море, ливневые дожди в Эквадоре и Перу и т. п.

Событие Эль-Ниньо было столь грандиозным, что привлекло внимание многих специалистов-метеорологов, океанологов, гидродинамиков и др. Геофизическая лаборатория гидродинамики Национального управления США по изучению океана и атмосферы (НОАА) разработала математическую модель, воспроизводящую гидрометеорологический режим тропической зоны Тихого океана. Модель позволила воссоздать обстановку 1982–1983 гг., когда наблюдалось Эль-Ниньо. В нее была заложена информация о всех прошлых явлениях, всех температурных, океанографических, атмосферных и прочих режимах. На основе анализа данных мониторинга и математической модели явления было предсказано возникновение Эль-Ниньо зимой 1986/87 г. [57, 93].

Действительно, в феврале 1986 г. температура вод, омывающих западное побережье Южной Америки, несколько повысилась, но уже в первые недели марта потепление прекратилось. Предсказанной и



Р и с. 44. Изменение длины суток для трех зимних периодов. Вертикальная шкала в мс [91].

ожидаемой катастрофы Эль-Ниньо 1986–1987 гг. не произошло, оно "...на этот раз обмануло ожидание ученых" [58, с. 117].

Неудача с прогнозом явления Эль-Ниньо, несмотря на всеобъемлющую математическую модель, возможно, связана с одним обстоятельством, которого, как следует из литературы [28, 69, 91], модель не учитывала. Дело в том, что в сезон 1982/83 г. на Земле произошло необычное событие – отсутствовало так называемое январское сезонное ускорение вращения Земли. Катастрофа началась в период летнего замедления (в сентябре) и продолжалась в течение длившегося все это время замедления до февраля – марта (рис. 44). Вполне возможно, что небывалый характер именно этого явления (Эль-Ниньо) объясняется столь необычным поведением Земли. Эта связь отмечалась рядом авторов, однако они расходятся в причинах и следствиях катастрофы Эль-Ниньо. Так, уже упоминавшийся нами ранее Н.А. Мернер считает, что изменение ротационного режима привело к столь грандиозному явлению 1982–1983 гг. В противоположность этому Н.С. Сидоренков считает, что "...при явлениях Эль-Ниньо температура воды и воздуха в тропической части Тихого океана растет. Контраст температуры экватор – полюса становится большим и, как следствие, увеличиваются момент импульса атмосферы и длительность суток" [69, с. 111]. У.Е. Картер и Д.С. Робертсон [28], не выясняя специально, что является причиной, а что следствием, подчеркивают неслучайный характер взаимосвязи скорости вращения Земли и катастрофы Эль-Ниньо.

## 6.2. НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Обратим внимание еще раз на рис. 41, на котором показано, что в северном полушарии ураганы закручиваются против часовой стрелки, а в южном – по часовой (это, по всей видимости, обусловлено действием кориолисовых сил) и имеют весьма специфическое направление распространения, которое изменяется в районе 35-й параллели.

Примем в качестве исходной предпосылки, что изменение режима вращения Земли определяется внутренними процессами (по нашей модели "горячей" Земли – процессами в ядре). Атмосфера и океан воспринимают резкое торможение (замедление вращения); возможно, именно это и является причиной (при естественном соблюдении других требуемых условий) образования и урагана, и Эль-Ниньо.

Обратимся к рис. 43, на котором видно, что Гумбольтово течение можно считать, с одной стороны, продолжением Антарктического течения, а с другой – его продолжение – Южное экваториальное. Таким образом, холодное течение в обычном режиме обращается в Тихом океане в южном полушарии против часовой стрелки. Явление Эль-Ниньо есть смысл рассматривать как противотечение Гумбольтову, причем противотечение "закручивается" по часовой стрелке. В этом можно увидеть формальное сходство между ураганом и Эль-Ниньо.

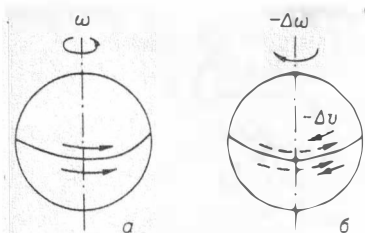
Предположим, что торможение Земли может приводить к появлению сил в области экватора, способных взаимодействовать с экваториальным геострофическим течением, которое, в свою очередь, взаимодействуя с Гумбольтовым течением, вызывает явление Эль-Ниньо. Ясной картины происходящих процессов как в океане, так и в атмосфере в настоящее время, по-видимому, нет.

Сделаем несколько замечаний. Суть их сводится к оценке влияния скорости вращения Земли на процессы в атмосфере и океане. Критерий оценки – малость числа Россби:  $R_0 = v/2\omega L < 1$  (тогда необходимо учитывать скорость вращения), где  $v$  – гидродинамическая скорость,  $L$  – характерный размер,  $\omega$  – частота суточного вращения Земли. Для океанических течений ( $v = 100$  см/с) характерный размер должен быть больше 2 км, для переносов в атмосфере ( $v = 20$  м/с) – более 100 км. В геофизической гидродинамике используется также локальное число Россби:  $Ro/\sin\Theta$ , где  $\Theta$  – широта, но не в экваториальной зоне, где  $\Theta = 0$  и  $\sin\Theta = 0$ . Крупномасштабные течения никогда не бывают безвихревыми.

Для оценки вихря используется радиус Россби:  $r_R = \frac{c_0}{\omega}$ , где  $c_0$  – скорость звука. Радиус Россби в атмосфере (на средних широтах)  $r_R = 3000$  км. В динамике атмосферы и океана, кроме масштаба  $r_R$ , принципиальную роль играет второй масштаб – так называемый внутренний, или бароклинный, радиус Россби  $r_i$ . В отличие от радиуса  $r_R$ , который называется баротропным и относится к среде, однородной по вертикали, масштаб  $r_i$  используется в том случае, если мы имеем дело со стратифицированной средой [51]. Обычно  $r_i$  меньше  $r_R$ , так, например, для земной атмосферы  $r_i = 500$  км, в океанах  $r_R = 2000$  км,  $r_i = 50$  км.

Принято делить вихри на крупномасштабные, с характерным размером, большим  $r_R$  и  $r_i$ , и мелкомасштабные. К первым относят медленные атмосферные циклоны и антициклоны, а также крупные океанические течения, такие как Гольфстрим и т. п. Принято считать, что отличительные признаки таких явлений – малое число Россби и большой линейный масштаб. Для таких вихрей существенным оказывается влияние на их структуру вращения Земли. Ураганы и тайфуны – это вихри нескольких меньших масштабов, в их физической модели особенности вращения Земли, как правило, не учитываются [51]. Тем не менее, как мы видим на рис. 41, этот эффект явно имеет место.

И еще одно замечание общего порядка. В поле силы Кориолиса, неоднородной вдоль меридиана (так как параметр Кориолиса  $f = 2\omega\cos\Theta$ ,  $\Theta = 90 - \alpha$ ), вихрь должен дрейфовать вдоль параллели – это одно из проявлений гироскопического эффекта (геострофическое движение) во вращающейся планете: градиентные течения в атмосфере и океане направлены от экватора к полюсам, поэтому направления геострофического движения и земного вращения совпадают (рис. 45, а). Если Земля тормозится, этот эффект эквивалентен появлению об-



Р и с. 45. Модель возникающих на Земле противоречий ( $-\Delta v$ ) как следствие торможения Земли ( $-\Delta\omega$ ).

ратно направленной скорости  $-\Delta v$  (см. рис. 45,б), что может вызвать и противотечение  $-\Delta v$  (см. рис. 45). Вполне возможно, что этот механизм лежит в основе генезиса ураганов и

тайфунов; возможно также, что подобный эффект может вызвать образование океанического вихря (по часовой стрелке) в южной части Тихого океана, который, взаимодействуя с вихрем Гумбольтового течения, направленного против часовой стрелки (см. рис. 43), разрушит (нейтрализует) его по правилам взаимодействия уединенных волн – солитонов: слияние однонаправленных вихрей и аннигиляция разнонаправленных.

Заметим, что упоминаемое нами геострофическое движение (течение в океане и перемещение воздушных масс) направлено перпендикулярно градиенту давления. Жидкость движется вдоль, а не поперек линий постоянного давления. Дело в том, что каждая частица, участвующая в движении, ведет себя как вращающийся волчок: толкаемый в некотором направлении силой давления, он движется под прямым углом к этой силе и скорости вращения.

Несколько слов о характере движения ураганов. Пути следования ураганов и тайфунов изображены на рис. 40, 41. Из рисунков видно, что точка поворота в их движении приходится примерно на 35-ю параллель. Для объяснения возможной причины этого явления цитируем М.А. Стоваса: «...движение циклонов связано с общим движением атмосферы, т. е. с распределением атмосферного давления, которое имеет широтную зональность "затропического барического" максимума около 35-й параллели в обоих полушариях и две зоны минимума: экваториальную и полярную (между 65–70°)» [72, с. 115]. И на предыдущей странице: "...нормальное состояние атмосферы заключается в ее движении, связанном с вращением Земли, и поэтому... в зоне 35-й параллели атмосфера Земли вращается синхронно с твердой корой, в то время как в экваториальной зоне вращение атмосферы несколько отстает от вращения твердой оболочки Земли, а в высоких широтах несколько опережает его...". Эта цитата, по всей видимости, не нуждается в комментарии, она, возможно, правильно объясняет форму движения ураганов и тайфунов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ноябре 1985 г. мир был потрясен гибелью 30 000 человек в результате извержения вулкана Невало-дель-Руис в Колумбии. Между тем американская вулканологическая станция, расположенная у подножия этого вулкана, за неделю до катастрофы предупредила власти и население о приближающемся извержении. Накануне извержения была послана радиограмма представителям местной гражданской обороны. Но предостережениями "этих очкариков" дружно пренебрегли и власти, и население. В результате город Армеро был уничтожен горячим селом, с колоссальной скоростью скатившимся с вершины горы... Ученые не молчат, но их не слушают те, кто принимает решения. А наука не навязчива.

Таких примеров, если задаться целью, можно привести очень много, но это не является нашей задачей. Здесь этот пример должен иллюстрировать, по мнению автора, два момента: во-первых, это научный аспект – был сделан правильный прогноз ожидаемого явления, во-вторых – социальный: власти и те, кто принимает решения, не хотят прислушиваться к мнению ученых. Так как второй момент не является предметом наших исследований, поговорим о первом – прогнозе. Естественно, ценность своевременного и точного прогноза катастрофы безусловно велика. Однако посмотрим, как сегодня строится концепция прогноза. Первое, по мнению автора, заключается в том, что прогноз катастрофы не имеет достаточно надежной научной базы. Так, землетрясение, как и 80 с лишним лет назад, представляется как разрыв, который выходит на земную поверхность (с глубины 700 км). Не перечисляя все нелепости такого подхода, приведу для примера известный случай (далеко не единственный), когда землетрясение 1870 г. в Южной Греции продолжалось ни много ни мало – три года. Какой уж здесь разрыв и сброс напряжений... Другой пример: как 100 лет назад, так и в настоящее время предлагаются модели работы вулкана, не "ушедшие" дальше "бутылки шампанского". В то же время высокого уровня достигли физика нелинейных явлений и математическая теория катастроф. Второе, что бы хотелось отметить, это тот факт, что подчас физические модели катастроф не рассматриваются в контексте с физической моделью Земли, хотя они плоть от плоти ее и продукт ее деятельности. Третье это то, что практически нет (за редчайшим исключением) работ по физике катастрофических явлений,

\* Из статьи Г.А. Скоробогатова "Кинетика, кибернетика, перестройка". – Химия и жизнь. – 1990. – №6. – С.18.



учитывающих их физическую и математическую общность. И, наконец, четвертое – в физике земных катастрофических явлений имеются лишь единичные случаи использования математического аппарата теории катастроф, в то время как, казалось бы, где же его использовать, как не здесь.

Концепция прогноза (на примере прогноза землетрясений) строится на нескольких очевидных принципах, в основу которых положено предсказание поведения системы типа "черный ящик". Так, например, если интенсивность сейсмичности увеличивается, – жди сильного землетрясения. Если оно случается в данном районе раз в десять лет и с последнего прошло уже девять, – надо ждать его в этом году. Если сильным землетрясениям предшествовали некоторые явления и они отмечены вновь, – жди катастрофу. Такой подход, очевидно, и не нуждается в знании природы явления. Он, как можно понять из гл. 6, использовался для прогноза катастрофы Эль-Ниньо, но неудачно. Представляется очевидным, что только знание физики катастрофических явлений позволит подойти к их прогнозу квалифицированно.

В настоящей книге сделана попытка показать, что "горячая" Земля – естественный источник катастрофических явлений. В принципе, модель позволяет резко, за малые времена, меняться магнитному полю, форме геоида, а следовательно, и скорости вращения Земли, и величине силы тяжести, и динамике материков. Надо сказать, что эта модель, несмотря на то, что она имеет корни еще в работах Декарта и его последователей, очень далека в настоящее время от признания. Однако, кроме обычного в таких случаях неприятия, у оппонентов нет ни одного возражения, которое бы не допускало физического явления, положенного в основу модели. Нет также возражений и по геологическим данным, за исключением утверждения, что "мы же видим, что Земля не расширяется, значит, она расширяться не может". Заметим, что такие геологи, как В.А. Обручев, М.А. Усов, М.М. Тетяев, считали расширение и пульсацию Земли очевидным фактом.

Вернемся еще раз к одной высказанной ранее мысли. Земля нелинейная и диссипативная система. Это, по-видимому, не надо специально доказывать. В этом случае вызывает естественное удивление, почему до сих пор, несмотря на такое большое количество ученых, работающих в этой области, практически нет исследований, базирующихся на достигнутом прогрессе в физике нелинейных, волновых явлений. Как представляется, многие из задач физики катастрофических явлений могут быть приведены к решаемым уравнениям типа Кортевега де Вриза и Бюргерса.

Наверняка полезным может оказаться широкое использование методов математической теории катастроф и конфликтов. Например, данные мониторинга (сейсмического, атмосферного или океанического) обрабатываются с целью определения текущего значения параметра размерности аттрактора. Если этот параметр достигает критического значения – возможна катастрофа. В этом плане, по-видимому, особый интерес представляет размерность аттрактора системы данных, показывающих изменение параметров вращения Земли. Использо-

ние теории конфликтов, возможно, будет полезным при оценке предсказуемости катастрофы.

Закончим книгу цитатой из статьи известного геофизика, академика В.И. Кейлис-Борока, посвященной динамике литосферы и прогнозу землетрясений. Он считает возможным предсказать некоторые особенности поведения такой хаотической системы, как литосфера, однако его общая оценка положения дел состоит в том, что "...первые шаги в этом направлении носят феноменологический характер: проблема пока находится в той начальной стадии, в которой было изучение гравитации до Кеплера" [31, с. 14, 15].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнольд В.И. Теория катастроф.— М: Изд-во МГУ, 1981.— 80 с.
2. Белоусов В.В. Основы геотектоники.— М.: Наука, 1975.— 262 с.
3. Борисов Б.А., Рогожин Е.А. Сейсмогенный разрыв // Природа. — 1989. — № 12. — С. 26–31.
4. Брагинский С.И. Магнитогидродинамические крутильные колебания в земном ядре и вариации длины суток // Геомагнетизм и аэрономия. — 1970. — Т. 10. — С. 312.
5. Виноградов С.Д. Исследование процессов разрушения образцов в условиях одностороннего сжатия // Физика очага землетрясения. — М.: Наука, 1975. — 243 с.
6. Гиззатулина С.М., Рукавишников В.Д., Рузмайкин А.А., Тавастшерна К.С. Радиоуглеродное свидетельство глобальной стохастичности солнечной активности. — М., 1988. — 22 с. (Препр. / ИЗМИРАН; № 40).
7. Гиззатулина С.М., Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. и др. Размерность геодинамического аттрактора по данным о вариации суток.— М., 1988. — 25 с. (Препр. / ИПМ; № 95).
8. Годзиковская А.А. Сейсмологическая служба Кавказа в дни спитакской трагедии // Природа. — 1989. — № 12.— С. 24–25.
9. Головкин В.П. Память о катастрофах // Земля и Вселенная.—1978.— № 5.— С. 52–56.
10. Гретенер П.И. Размышления о редком событии и связанных с ним представлениях в геологии // Катастрофы в истории Земли. — М.: Мир, 1986. — С. 89–100.
11. Гулд С.Дж. В защиту концепции прерывистого изменения // Катастрофы в истории Земли. — М.: Мир, 1986. — С. 13–41.
12. Гущенко И.И. Цикличность извержений вулканов мира // Вулканология и сейсмология. — 1982.— № 2.— С. 27–48.
13. Дергачев В.А., Ковалев Г.Е. Концентрация радиоуглерода в атмосфере Земли и астрофизические и геофизические явления // Изв. АН СССР. Сер. физ. — 1977. — Т. 41, № 2. — С. 422–430.
14. Дергачев В.А., Туйчев Н. Взаимный спектральный анализ данных по концентрации  $^{14}\text{C}$  и напряженности магнитного поля. — Там же. — С. 431–438.
15. Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение.— М.: Изд-во иностр. лит., 1960. — 484 с.
16. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. — М.: Мир, 1988.— 694 с.
17. Дружинин В.В., Конторов Д.С., Конторов М.Д. Введение в теорию конфликта. — М.: Радио и связь, 1989. — 288 с.
18. Друмя А.В., Гинсарь В.Н., Шумила В.И. Вариации наклона графиков повторяемости землетрясений — характеристики сейсмического режима и типа геодинамических процессов // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1990.— № 6.— С. 5–13.
19. Жалковский Н.Д. Закон повгоряемости землетрясений и некоторые его следствия. — Новосибирск, 1988.— 29 с. (Препр. ИГиГ СО АН СССР; № 21).
20. Жаринов С.Е. Модель уединенной волны в задаче о подъеме магмы по вязкодеформируемому цилиндрическому каналу (численный подход) // Вулканология и сейсмология. — 1990.— № 1.— С. 3–16.
21. Жаринов С.Е. Периодические волны в вязкодеформируемом магматическом канале // Вулканология и сейсмология. — 1990.— № 3. — С. 72–81.

22. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений. – М.: Наука, 1980. – 282 с.
23. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. – М.: Наука, 1988. – 368 с.
24. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
25. Интенсивные атмосферные вихри / Под ред. Л.Бенгссона, Дж.Д.Лайтхилла. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
26. Йодер Х. Образование базальтовой магмы. – М.: Мир, 1979. – 238 с.
27. Калинин Ю.Д. Вековые геомагнитные вариации. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1984. – 158 с.
28. Картер У.Е., Робертсон Д.С. Исследование Земли с помощью интерферометрии со сверхдлинной базой // В мире науки. – 1987. – № 1. – С. 16–25.
29. Касахара К. Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
30. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 462 с.
31. Кейлис-Борок В.И. Динамика литосферы и прогноз землетрясений // Природа. – 1989. – № 12. – С. 10–18.
32. Киселев В.М. Неравномерность суточного вращения Земли. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1980. – 160 с.
33. Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. – М.: Мир, 1989. – 427 с.
34. Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н., Макеев В.М. Напряженное состояние земной коры и геодинамика // Геотектоника. – 1987. – № 1. – С. 3–24.
35. Кузнецов В.В., Семаков Н.Н., Доровский В.Н., Котляр П.Е. Физика Земли: новый взгляд на некоторые проблемы. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1989. – 128 с.
36. Кузнецов В.В. Физика Земли и Солнечной системы. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1990. – 216 с.
37. Куликов К.А. Вращение Земли. – М.: Недра, 1985. – 159 с.
38. Кукал З. Великие загадки Земли. – М.: Прогресс, 1988. – 395 с.
39. Куксенко В.С., Мансуров В.А., Манжиков Б.Ц. и др. Подобие в процессе разрушения горных пород на различных масштабных уровнях // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1990. – № 6. – С. 66–70.
40. Куксенко В.С., Мирошниченко М.И., Савельев В.Н. и др. Физические принципы прогнозирования разрушения лабораторных образцов из горных пород. Экспериментальная сейсмология. – М.: Наука, 1983. – 248 с.
41. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
42. Ланфорд О.Е. Странные аттракторы и турбулентность // Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности / Ред. Х. Суинни, Дж. Голлаб. – М.: Мир, 1984. – С. 22–46.
43. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
44. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. О вычислении размерности странных аттракторов // Журн. вычисл. математики и мат. физики. – 1988. – Т. 28, № 7. – С. 1021–1037.
45. Мернер Н.А. Обмеление моря, засухи и вымирание млекопитающих // Катастрофы и история Земли / Под ред. У. Берггрена и Дж. Ван Кауверинга. – М.: Мир, 1986. – С. 388–393.
46. Мернер Н.А. Эвстазия, изменение геоида и взаимодействия многих геофизических факторов // Там же. – С. 394–412.
47. Мехтиев Ш.Ф., Халилов Э.Н. Отражение геодинамических процессов в пространственно-временном распределении извержений вулканов мира // Изв. АН ТаджССР. – 1987. – № 2. – С. 65–70.
48. Милашев В.А. Трубки взрыва. – Л.: Недра. Ленингр. отделение, 268 с.
49. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А. и др. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 243 с.
50. Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1969. – 487 с.
51. Незлин М.В., Снежкин Е.Н. Вихри Россби и спиральные структуры. – М.: Наука, 1990. – 238 с.
52. Несмянович Э.И. Возможности вычисления точного времени землетрясений // Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 193–204.

53. Озима М. Глобальная эволюция Земли. – М.: Мир, 1990. – 164 с.
54. Орленок В.В. Физика и динамика внешних геосфер. – М.: Недра, 1985. – 182 с.
55. Палеомагнитология / Под ред. А.Н.Храмова. – М.: Недра, 1982. – 312 с.
56. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложение. – М.: Мир, 1980. – 607 с.
57. Природа. – 1987. – № 1. – С. 117.
58. Природа. – 1987. – № 6. – С. 117.
59. Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л. и др. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1977. – 312 с.
60. Раст Х. Вулканы и вулканизм. – М.: Мир, 1982. – 343 с.
61. Резанов И.А. Великие катастрофы в истории Земли. – М.: Наука, 1985. – 175 с.
62. Ривин Ю.Р. Циклы Земли и Солнца. – М.: Наука, 1989. – 165 с.
63. Робитнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
64. Рудич Е.М. Расширяющиеся океаны: факты и гипотезы. – М.: Недра, 1984. – 250 с.
65. Сакс В.Н. Климаты прошлого на севере СССР // Природа. – 1947. – № 12. – С. 19–33.
66. Салоп Л.И. Геологическое развитие Земли в докембрии. – Л.: Недра, 1982. – 460 с.
67. Сидоренков Н.С. Исследования момента импульса атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. – 1976. – Т. 12, № 6. – С. 579–587.
68. Сидоренков Н.С. Исследование роли атмосферы в возбуждении многолетних изменений скорости вращения Земли // Астрон. журн. – 1979. – Т. 56, вып. 1. – С. 187–199.
69. Сидоренков Н.С. Новые результаты исследования природы неравномерности вращения Земли и движения полюсов // Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии. – Киев: Наук. думка, 1988. – 280 с.
70. Стейси Ф. Физика Земли. – М.: Мир, 1972. – 342 с.
71. Стюас М.В. Некоторые вопросы тектоники // Проблемы планетной геологии. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 222–274.
72. Стюас М.В. Избранные труды. – М.: Недра, 1975. – Т. 1. – 155 с.
73. Странные аттракторы. Сб. статей / Ред. Я.Г. Синай, Л.П. Шальников. – М.: Мир, 1981. – 253 с.
74. Сытинский А.Д. О связи сильных землетрясений с параметрами солнечного ветра // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 249, № 4. – С. 821–824.
75. Сытинский А.Д. Об одном солнечно-атмосферном эффекте во время сильных землетрясений // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 245, № 6. – С. 1337–1340.
76. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 99 с.
77. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 2. – С. 13–30.
78. Усов М.А. Геология магматических пород // Основные идеи М.А. Усова в геологии. – Алма-Ата: АН КазССР, 1960. – С. 120–124.
79. Федоров К.Н. Этот капризный младенец Эль-Ниньо! // Природа. – 1984. – № 8. – С. 65–74.
80. Физическая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – Т. 1. – 704 с.
81. Фридлидер Ф. Звуковые импульсы. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 232 с.
82. Хэллем Э. Великие геологические споры. – М.: Мир, 1985. – 215 с.
83. Чижевский А.Д. Физические факторы исторического прогресса // Химия и жизнь. – 1990. – № 1–3.
84. Шебалин Н.В., Борисов Б.А. Спитакское землетрясение // Природа. – 1989. – № 4. – С. 69–72.
85. Штенгелов Е.С. Связь проявлений современной геотектонической активности с формой поверхности геоида // Геотектоника. – 1984. – № 5. – С. 95–100.
86. Эйби Дж.А. Землетрясения. – М.: Недра, 1982. – 263 с.
87. Anderson D.L. Earthquakes and the rotation of the Earth // Science. – 1974. – Vol. 186, № 4158. – P. 49–50.
88. Lopes R.M.C., Malin S.R.C., Mazzarella A., Palumbo A. Lunar and solar triggering of earthquakes // Rhys. Earth and Plan. Int. – 1990. – Vol 59, № 3. – P. 127–129.
89. Mansinha L., Smylie D.E., Chapman C.H. Seismic excitation of the Chandler wobble revisited // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. – 1979. – Vol. 59. – P. 1–17.
90. Meservey R. Topological inconsistency of continental drift on the present-sized earth // Science. – 1969. – Vol. 166, № 3905. – P. 609–621.

91. **Morner N.-A.** ENSO – events, Earth's Rotation and Global Changes // *Journal of Coastal Research*.– 1989. – Vol. 5, № 4.– P. 857–860.
92. **Schneider D.A., Kent D.V.** Iroly coast microtektites and geomagnetic reversals // *Geophys. Res. Lett.* – 1990. – Vol. 17, № 2. – P. 163–166.
93. *Science News*.– 1986. – Vol. 129, № 12. – P. 184.
94. *Science News*. – 1986.– Vol. 129, № 23. – P. 357.
95. **Sobolev N.V., Shatsky V.C.** Diamond inclusion in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation // *Nature*. – 1990. – Vol. 343, № 6260.– P. 742–746.
96. **Windelius G., Tucker P.** Solar motion, seismicity, climate //1988.– *Fact 17011*. Drottningholm, Sweden. – 41 p.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора.....	3
Глава 1. ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ И КОНФЛИКТОВ.....	5
1.1. Общие представления.....	—
1.2. Бифуркации и аттракторы.....	7
1.3. Ударные волны и фазовые переходы.....	10
1.4. Дальний порядок.....	12
1.5. Теория конфликтов.....	14
Глава 2. КАТАСТРОФЫ НА ЗЕМЛЕ.....	16
2.1. Униформизм и катастрофизм.....	—
2.2. Катастрофические процессы в геологической летописи.....	18
Глава 3. СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	23
3.1. Цели и задачи.....	—
3.2. Влияние Солнца.....	24
3.3. Роль Земли.....	34
3.4. Модель “горячей” Земли.....	36
Глава 4. СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ.....	42
4.1. Природа сейсмичности Земли.....	45
4.2. Особенности землетрясений: повторяемость и излучение очага.....	47
4.3. Ударно-волновая модель очага землетрясений. Образование акустически активной среды.....	51
4.4. Возникновение ударной волны.....	58
4.5. Некоторые особенности распространения ударных волн.....	61
4.6. Выход ударной волны на свободную поверхность.....	64
Глава 5. ВУЛКАНИЗМ.....	70
5.1. Особенности земного вулканизма.....	—
5.2. Волновая модель образования расплава.....	75
Глава 6. УРАГАНЫ И ОКЕАНИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ.....	78
6.1. Катастрофы в атмосфере и океане.....	—
6.2. Некоторые физические модели.....	84
Заключение.....	87
Список литературы.....	90

Научное издание

*Кузнецов Владимир Валерьевич*

**ФИЗИКА  
ЗЕМНЫХ  
КАТАСТРОФИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ**

Редактор издательства  
Е.И. Тимофеева

Художественный редактор  
Л.В. Матвеева

Художник  
А.И. Смирнов

Технический редактор  
Л.П. Минеева

Корректор  
С.М. Погудина

Оператор набора  
Н.Н. Проненко

Оператор электронной верстки  
Е.Н. Зими́на

---

ИБ № 42913

Сдано в набор 05.09.91. Подписано к печати 19.05.92. Формат 60х90 1/16.  
Бумага типографская № 2. Гарнитура таймс. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 6. Усл. кр.-отг. 6,25. Уч.-изд. л. 7,5. Тираж 410 экз.  
Заказ № 1057. С131.

---

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Наука",  
Сибирское отделение. 630099 Новосибирск, ул. Советская, 18.  
Оригинал-макет изготовлен на настольной издательской системе.  
4-я типография издательства "Наука".  
630077 Новосибирск, ул. Станиславского, 25.



## **Вниманию заказчиков!**

Для получения книг почтой заказы просим направлять по адресам:

- 480091 Алма-Ата, Казахстан, ул. Фурманова, 91/97;
- 370005 Баку, Азербайджан, ул. Коммунистическая, 51;
- 720000 Бишкек, Кыргызстан, бульвар Дзержинского, 42;
- 232600 Вильнюс, Литва, ул. Университето, 4;
- 690088 Владивосток, Россия, Океанский проспект, 140;
- 320093 Днепропетровск, Украина, проспект Гагарина, 24;
- 734001 Душанбе, Таджикистан, проспект Ленина, 95;
- 620151 Екатеринбург, Россия, ул. Мамина-Сибиряка, 137;
- 664033 Иркутск, Россия, ул. Лермонтова, 289;
- 420043 Казань, Татарстан, ул. Достоевского, 53;
- 252208 Киев, Украина, проспект Правды, 80-а;
- 277012 Кишинев, Молдова, проспект Штефана Великого, 148;
- 343900 Краматорск, Украина, Донецкая обл., ул. Марата, 1;
- 220012 Минск, Беларусь, Ленинский проспект, 72;
- 117393 Москва, Россия, ул. Академика Пилюгина, д. 14, корп. 2;
- 630090 Новосибирск, Россия, Морской проспект, 22;
- 142292 Пущино, Россия, Московская обл., мкр. "В", д. 1;
- 443002 Самара, Россия, проспект Ленина, 2;
- 197345 Санкт-Петербург, Россия, ул. Петрозаводская, 7;
- 700043 Ташкент, Узбекистан, ул. Дружбы народов, 6;
- 450059 Уфа, Башкортостан, ул. Рихарда Зорге, 10;
- 310078 Харьков, Украина, ул. Чернышевского, 87.