

В.А. МАГНИЦКИЙ

# ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО

**ЗНАНИЕ**

ГЕОЛОГИЯ и ГЕОГРАФИЯ

1961

СЕРИЯ XII

7

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО  
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

---

Доктор технических наук профессор  
В. А. МАГНИЦКИЙ

# ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ З Е М Л И

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

---

Москва

1961

В брошюре рассматриваются вопросы строения и развития Земли и земной коры.

Освещены современные данные, связанные с решением этой важной проблемы естествознания.

Автор знакомит с гипотезами о происхождении материков и океанов, о причинах горообразования, магматической деятельности, землетрясений и др. Подчеркивается, что решение этих вопросов имеет большое научное значение и очень важно для практики, например для прогноза землетрясений, поисков полезных ископаемых, планирования строительства крупных гидротехнических объектов в районах больших скоростей движения земной коры и т. п.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение . . . . .	3
Земной шар в целом . . . . .	4
Земная кора . . . . .	13
Оболочка Земли . . . . .	21
Ядро Земли . . . . .	30
Основные представления о процессах развития Земли . . . . .	33
Литература . . . . .	40

---

Автор  
Владимир Александрович Магницкий

Редактор И. Б. Файнбойм  
Техн. редактор А. С. Назарова  
Корректор З. С. Патеревская  
Обложка художника А. Г. Ординарцева

---

A00132. Подписано к печати 19/IV 1961 г. Тираж 19000 экз. Изд. № 68.  
Бумага 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>—1,25 бум. л.=2,5 печ. л. Учетно-изд. 2,54 л. Заказ № 952  
Цена 8 коп.

---

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

## ВВЕДЕНИЕ

Наша планета — Земля находится в состоянии непрерывающегося процесса развития и преобразования. Этот могучий процесс проявляется и в ее глубочайших недрах и на поверхности.

В течение долгой истории все время менялся внешний облик планеты: возникали одни горы и разрушались другие; части суши становились дном океана, другие, наоборот, поднимались над поверхностью морей, становились сушей.

Смещались полюсы Земли — магнитные и географические, менялось поле силы тяжести и магнитное поле.

Из недр Земли на поверхность поступали новые вещества, неся многие необходимые человеку полезные ископаемые.

Движения земной поверхности — плавные и скачкообразные (которые называют землетрясениями) — влияли и продолжают влиять на жизнь и хозяйственную деятельность человека.

Не удивительно поэтому, что возникла необходимость в изучении строения Земли и процессов ее развития.

Несколько столетий назад родилась наука геология, которая занимается изучением строения и процессов развития самых верхних частей земного шара. С течением времени из геологии стали выделяться некоторые разделы, которые позднее становились самостоятельными науками, входящими в геологический цикл. Некоторые области этого же цикла рождались на линиях соприкосновения с другими науками. Так возникла геохимия, появились разделы геофизики, которые изучают твердые части Земли. Роль геофизики особенно возросла за последние десятилетия, когда выяснилось, что основные процессы, преобразующие кору Земли, возникают на больших глубинах. Изучение же больших глубин в настоящее время возможно почти исключительно физическими методами, используемыми геофизиками.

Возникающие в недрах Земли в результате различных процессов электрические токи создают магнитные поля, которые могут быть изучены путем измерений вблизи земной

поверхности. Это позволяет судить о некоторых важнейших процессах, происходящих внутри земного шара. Способность определенных горных пород намагничиваться в магнитном поле Земли и, намагнитившись, создавать свои собственные поля открывает возможность получать данные о размещении этих пород в земных недрах.

По закону всемирного тяготения каждая масса образует вокруг себя поле притяжения, пропорциональное этой массе и зависящее от ее формы и расстояния до притягиваемого объекта.

Изучением поля силы тяжести занимается гравиметрия — часть геофизики. Имеются приборы, позволяющие вести измерения с очень высокой точностью. Изучая притяжение земных масс, мы можем получить ценные сведения о внутреннем строении Земли.

В качестве другого примера возможностей геофизики рассмотрим возможности сейсмологии — науки, изучающей землетрясения. При землетрясениях (или сильных искусственных взрывах) в теле Земли возникают упругие волны, называемые сейсмическими. Они распространяются со скоростями, зависящими от механических свойств среды (плотности, твердости, сжимаемости). Эти волны подчиняются законам, во многом сходным с законами распространения световых волн. Так, на границе двух сред, в которых волны движутся с разными скоростями, они испытывают преломление и отражение. Изучая распространение таких волн, геофизики приходят к ценным выводам о внутреннем строении Земли: положении границ слоев, о свойствах этих слоев, о состоянии вещества.

Эти и другие методы позволили к настоящему времени получить большое количество данных о строении нашей планеты, изложению которых и будет посвящено содержание последующих разделов брошюры.

## ЗЕМНОЙ ШАР В ЦЕЛОМ

Земля имеет, как известно, довольно сложную форму. Ее поверхность покрыта различными неровностями (горы, континенты, океанические впадины), однако в целом фигуру Земли достаточно хорошо представляет эллипсоид вращения со сжатием  $\alpha = 1/298,3$ . Сжатием называется отношение

$$\alpha = \frac{a - b}{a},$$

где  $a$  — радиус экватора,  $b$  — расстояние от центра до полюса. Радиус экватора принят в СССР равным 6 378 245 м. Можно показать, что вращающаяся планета, вещество которой в состоянии испытывать перетекания (как в вязкой жидкости), должна принять именно форму сжатого эллипсоида

вращения, сжатие которого определится скоростью вращения планеты. В первом приближении сжатие Земли действительно соответствует скорости ее вращения; отсюда делается вывод, что в целом земное вещество по своим свойствам близко к вязкой жидкости. Однако с запуском искусственных спутников Земли была получена возможность уточнить результаты определения сжатия. Оказалось, что в следующем приближении сжатие Земли уже не соответствует фигуре равновесия вращающейся жидкой планеты. Проверка показала, что это уклонение не связано с наличием масс континентов и гор, которые тоже должны давать уклонения от состояния гидростатического равновесия. Таким образом, следует считать, что в глубинах Земли есть заметное уклонение от равновесного состояния, а следовательно, существуют и напряжения, которые не исчезают в течение довольно больших промежутков времени. Отсюда можно сделать вывод, что материал земных недр обладает некоторой прочностью и в этом смысле отличен от жидкости.

Интересно отметить, что и сжатие Луны отлично от равновесного, что было известно уже давно. Однако считалось, что это может быть объяснено более низкими температурами внутри Луны по сравнению с Землей.

О механических свойствах материала земного шара мы можем судить по двум явлениям. Земля в целом под воздействием Луны и Солнца испытывает приливные деформации. Каждая точка земной поверхности в течение суток поднимается и опускается под воздействием приливообразующей силы. Мы не замечаем этих движений, так как они происходят очень плавно, с периодом в сутки и половину суток, но достаточно точные приборы записывают эти движения совершенно четко.

В зависимости от свойств вещества Земли характер приливных движений различен. Поэтому, изучая такие движения, мы приходим к выводу о том, что вещество Земли в целом довольно близко по свойствам к идеально упругому телу. Однако последние наблюдения показали, что приливы в теле Земли несколько запаздывают по отношению к приливообразующей силе. Это указывает совершенно определенно, что недра Земли обладают вязкостью и, следовательно, не могут считаться идеально упругими (Н. Н. Парийский).

Другое явление, которое может быть использовано для определения свойств Земли в целом, состоит в том, что полюсы Земли не остаются неподвижными, а перемещаются около своего среднего положения с периодами в 1 год и 14 месяцев. Изучение этого движения позволяет в среднем для земного шара определить модуль твердости  $\mu = 1,5 \cdot 10^{12}$  *дин/см<sup>2</sup>*.

По закону Гука, между деформацией тела и деформирующей силой существует прямая пропорциональная зависи-

мость. Коэффициентами в этой зависимости служат «упругие модули», характеризующие механические свойства материала. Коэффициент пропорциональности между давлением и изменением объема сжимаемого тела называется модулем сжатия  $K$ . Коэффициент пропорциональности между касательной силой и искажением углов в теле называется модулем твердости  $\mu$ . Так как идеальная жидкость не сопротивляется изменению формы, то ее модуль твердости равен нулю. Модуль твердости Земли очень велик; для сравнения укажем, что для лучших сортов стали  $\mu = 0,8 - 0,9 \cdot 10^{12}$  *дин/см<sup>2</sup>*.

По затуханию амплитуд 14-месячного периода можно определить вязкость Земли; она получилась  $\eta = 10^{19}$  пуаз, однако эти определения очень не надежны. Для сравнения укажем, что вязкость вара при комнатной температуре  $\eta \approx 10^{15}$ , а вязкость льда в ледниках  $\eta \approx 1,2 \cdot 10^{14}$  пуаз.

Эти данные показывают, что вещество Земли обладает и вязкостью и модулем твердости, а следовательно, оно не может быть ни идеальной жидкостью, ни идеально упругим телом. Такие материалы принято называть упруго-вязкими. Они обладают интересным свойством: если период силы, действующей на тело, меньше некоторого времени  $\tau$ , то на такую силу тело реагирует как упругое, если же период силы много больше  $\tau$ , то на воздействие такой силы тело будет реагировать как вязкая жидкость. Время  $\tau$  называется периодом релаксации материала и является важной механической характеристикой данного материала.

Именно в этой сложности механических свойств вещества Земли кроется причина ряда, казалось бы, противоречивых явлений. Геологические наблюдения показывают, что при длительных горообразовательных процессах горные породы могут течь, в то же время при воздействии обычных, не слишком долго действующих сил они ведут себя как обычные твердые, упругие тела.

Мы видели, что форма Земли близка к той, которую приняла бы вращающаяся жидкая планета; с другой стороны, колебания полюсов и другие явления протекают в ней как в упругом теле. В действительности дело обстоит еще несколько сложнее. С проявлениями этих сложных свойств мы еще не раз встретимся в дальнейшем.

Кроме уже приведенных средних характеристик Земли, в настоящее время хорошо известны: ее масса, равная  $M = 6 \cdot 10^{27}$  г и средняя плотность— $\rho_m = 5,52$  г/см<sup>3</sup>. Это очень высокая плотность. Достаточно напомнить, что плотность гранита, например, всего  $\rho = 2,6$  г/см<sup>3</sup> и вообще плотность горных пород редко превышает 3,3 г/см<sup>3</sup>.

Наконец, важной величиной, характеризующей Землю, является ее момент инерции  $I = 0,331 Ma^2$  (данные по наблюдениям искусственных спутников; раньше приводилось немно-

го другое значение). Важно подчеркнуть, что для однородного шара момент инерции был бы  $I = 0,400 Ma^2$ . Таким образом, мы имеем прямое доказательство того, что плотность вещества Земли довольно значительно возрастает от поверхности к центру.

Наиболее подробные сведения о строении земного шара дают нам наблюдения за распространением сейсмических волн.

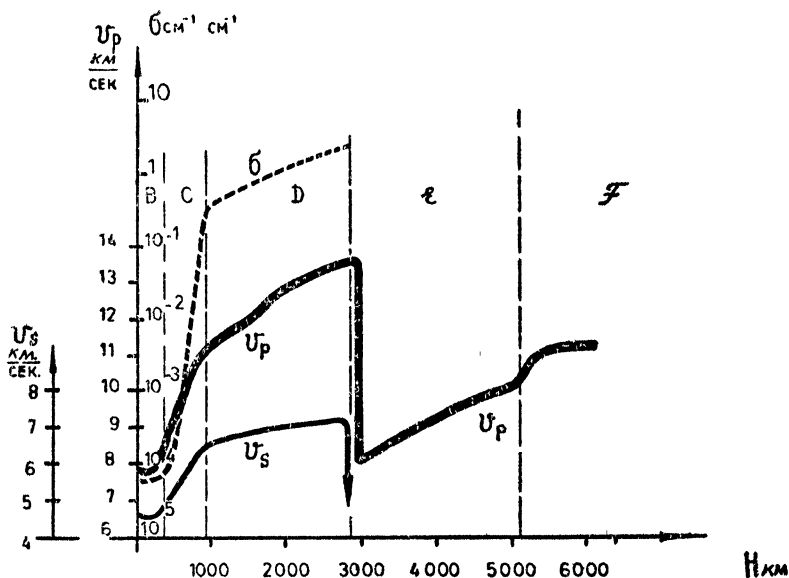


Рис. 1. Скорости сейсмических волн и электропроводность внутри Земли.

Имеется два основных вида сейсмических волн: продольные  $P$ , при которых колебания частиц происходят вдоль сейсмического луча, и поперечные  $S$ , при которых колебания происходят в направлении, перпендикулярном лучу. Есть еще поверхностные волны, но на них мы подробно сейчас останавливаться не будем.

На рисунке 1 приведены графики, характеризующие скорости  $v_p$  продольных и  $v_s$  поперечных волн в зависимости от глубины  $H$ . На этом же рисунке приведены и значения электропроводности  $\sigma$  внутри Земли. Из приведенных графиков хорошо видно разделение внутренних частей Земли на главные оболочки.

Самая верхняя оболочка носит название земной коры (слой  $A$ ). Нижней границей коры служит поверхность, названная границей Мохоровичича в честь известного югославского геофизика, впервые установившего ее в начале нашего столетия. На этой границе сейсмические волны испы-



тывают заметное преломление и отражение. Непосредственно ниже этой поверхности скорости продольных волн принимают значение 8 км/сек.

Толщина земной коры не одинакова в разных местах, однако она нигде не превышает 100 км, поэтому на рисунке 1 земная кора не могла быть показана. Все величины на рисунке 1 приводятся, начиная с глубины 100 км.

Ниже земной коры начинается оболочка или мантия Земли. Как видно из чертежа, по характеру кривых скоростей и электропроводности оболочка может быть подразделена на три части: верхняя часть, или слой *B* от подошвы коры до начала крутого подъема кривых скоростей и электропроводности, т. е. до глубины 200—400 км. Переходный слой *C*, который характеризуется быстрым нарастанием в нем скоростей сейсмических волн и электропроводности; он простирается до глубины 900 км. Этот переходный слой играет очень большую роль в жизни и развитии Земли; достаточно сказать, что очаги самых глубоких землетрясений не выходят за пределы этого слоя. Начиная с глубины 900 км и до глубины 2900 км расположен нижний слой оболочки, или слой *D*. На глубине 2900 км происходит резкое, скачкообразное падение скоростей продольных волн и исчезновение поперечных волн. Эта резкая граница носит название границы земного ядра. Часть земного шара, расположенная глубже, называется ядром Земли, или слоем *E*. На глубине 5100 км (см. график скоростей продольных волн) есть еще одна граница, которая выделяет самую внутреннюю часть Земли, получившую название внутреннего ядра, или субъядра.

Таково в основных чертах строение внутренних частей нашей планеты.

Ряд характеристик внутренних частей Земли может быть получен лишь при рассмотрении земного шара в целом. К ним относятся: плотность, сила тяжести и давление внутри Земли, а также температура земных недр.

Скорости продольных и поперечных сейсмических волн зависят от плотности  $\rho$ , модуля сжатия  $K$  и модуля твердости  $\mu$  среды, в которой они распространяются:

$$v_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

Поскольку скорости  $v_P$  и  $v_S$  нам известны, мы можем найти отношения любых величин, входящих в эти формулы. Однако для определения этих величин по крайней мере одна из них должна быть найдена с помощью дополнительных данных. Обычно такими данными служат: плотность самых верхних частей Земли (эта величина может быть найдена из зна-

чения плотности горных пород), масса или средняя плотность Земли  $\rho_m$ ; момент инерции Земли.

По этим данным и значениям скоростей сейсмических волн ученые вывели закон изменения плотности внутри Зем-

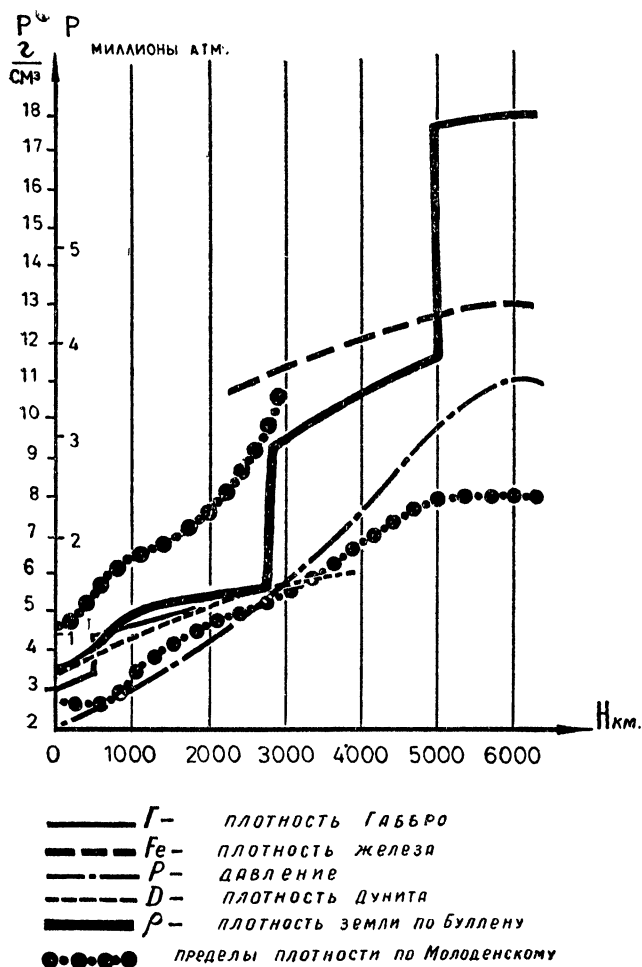


Рис. 2. Плотность и давление внутри Земли.

ли. Однако и этих данных недостаточно для окончательного решения вопроса, и поэтому исследователи, используя ряд добавочных гипотез, получили несколько законов изменения плотности с глубиной. На рисунке 2 приводится закон плотности, выведенный австралийским геофизиком Булленом, который вычислил и другие законы плотности при несколько иных предположениях.

При вычислении этой кривой было принято, что все слои Земли однородны по своему составу и состоянию вещества; исключением является только переходный слой С, в котором предположено изменение химического состава или изменение состояния вещества. Однако приведенный закон изменения плотности Буллена нельзя считать сколько-нибудь твердо установленным. Сейчас уже есть основания считать, что плотность под земной корой, т. е. в начале кривой, равная  $3,32 \text{ г/см}^3$ , занижена; гораздо вероятнее значения 3,4 или  $3,5 \text{ г/см}^3$ ; при этих значениях плотность Земли гораздо лучше согласуется с плотностью других планет, а также с последними предположениями о составе оболочки Земли.

Для сравнения укажем, что кривая плотности в оболочке, построенная на основе предположения, что вся оболочка однородна по составу, требует допущения гораздо большей начальной плотности — около  $3,7 \text{ г/см}^3$ , что хотя и возможно, но маловероятно.

На рисунке 2 приведены также предельные значения плотности, допустимые на каждой глубине; они получены М. С. Молоденским без каких-либо гипотез. Любой закон изменения плотности Земли должен быть ограничен этими пределами.

Зная плотность хотя бы приближенно, можно просто получить величину изменения силы тяжести внутри Земли. Дело в том, что применение разных законов плотности сравнительно мало влияет на значения силы тяжести. Сила тяжести сначала слегка возрастает с глубиной, достигает по крайней мере одного максимума, а затем от границы ядра равномерно уменьшается к центру, где и обращается в ноль. Следует отметить, что в оболочке изменения силы тяжести столь незначительны, что в большинстве расчетов силу тяжести можно считать постоянной.

Давление внутри Земли тоже довольно слабо зависит от распределения плотности. Поэтому на рисунке 2 мы приводим только одну кривую давлений, которая показывает, что на границе ядра давление достигает 1,5 млн. *атм*, а в центре Земли оно принимает значение в 3—4 млн. *атм*.

Одним из наиболее сложных вопросов внутреннего строения Земли является вопрос о температуре земных глубин. До сих пор наука не располагает методами непосредственного измерения температуры на значительных глубинах. Измерения в буровых скважинах пока еще относятся к глубинам меньше 10 км. О температурах на больших глубинах приходится пока судить по косвенным данным, по расчетам, основанным на измерениях других величин, в той или иной мере связанных с температурой.

В настоящее время достаточно хорошо измерена величина теплового потока, поступающего из внутренних частей Земли.

Оказывается, через каждый квадратный сантиметр земной поверхности в среднем в одну секунду проходит из земных недр одна миллионная доля калории тепла. Для всей поверхности Земли мощность теплового потока составляет 25 млрд. квт. Таким образом, теряемая тепловая энергия недр Земли огромна. Естественно поэтому стремление использовать эту энергию. Однако низкая концентрация тепловой энергии около поверхности Земли делает использование этой энергии в большинстве случаев экономически невыгодным. Области высокой концентрации энергии находятся, как правило, на больших глубинах, использование этой энергии пока еще наталкивается на огромные технические трудности.

Однако есть области, где очаги большой концентрации находятся на вполне доступных глубинах. Это области молодого вулканизма или сравнительно недавних проявлений вулканизма; здесь сама природа обеспечила вынос энергии с больших глубин. В таких районах человек давно в той или иной форме использует внутреннее тепло Земли.

В Исландии, например, нагретые подземные воды широко применяются для отопления домов, парников, в производстве. Известны электростанции, работающие на земном тепле, — Лардерелло в Италии. В СССР также имеются большие запасы таких источников энергии, например недавно открытые термальные воды в Западной Сибири.

Возникает вопрос: что же является источником этих запасов тепловой энергии?

Еще несколько десятилетий назад полагали, что тепловая энергия Земли это остаток тепла, которое Земля захватила от Солнца. Однако в настоящее время взгляды на этот вопрос существенно иные. Сейчас почти все космогонисты сходятся на том, что Земля возникла из газо-пылевого облака относительно невысокой температуры. При этом предполагается, что часть тепловой энергии возникла в период образования Земли за счет неупругого соударения твердых частиц облака, когда часть кинетической энергии частиц переходила в тепловую. В это же время происходило и разогревание Земли за счет сжатия ее вещества под тяжестью все нового вещества. Однако большинство исследователей считает, что разогрев в силу этих причин был относительно невелик — в наиболее благоприятном случае на больших глубинах он доходил до 1500—2000°. Такой запас энергии не смог бы дать столь значительного потока тепла, уходящего через земную поверхность в настоящее время, т. е. спустя 5—6 млрд. лет после образования Земли.

Другим источником тепловой энергии Земли можно считать процесс дифференциации ее вещества по удельному весу, так что из первоначально однородной Земли возникла планета с современным распределением плотности, при которой

тяжелые вещества опустились вниз, а легкие поднялись вверх. Е. Н. Люстих показал, что при таком разделении по плотности должно выделиться такое количество энергии, которое обеспечило бы поток тепла мощностью в несколько десятков миллиардов киловатт, даже если считать, что этот процесс шел равномерно в течение 6 млрд. лет. К сожалению, сейчас не ясна роль этого процесса в расслоении Земли на оболочки, не ясны и некоторые другие вопросы, связанные с оценкой теплового эффекта этого явления.

В последнее время стали обращать внимание еще на один источник тепла — на энергию вращения Земли. Однако этот запас энергии не так велик, он примерно в 100 раз меньше, чем запас, рассчитанный для дифференциации вещества. Не ясен вопрос о способе перехода энергии вращения Земли в тепловую. Уже довольно давно известно, что скорость вращения Земли постепенно уменьшается; сейчас вековое удлинение суток за 120 тысяч лет равно одной секунде. Если считать, что вся энергия при этом перейдет в тепло земных недр, то мы получим источник тепла, покрывающий примерно 4% теплового потока, уходящего через поверхность Земли. К тому же надо учесть, что замедление вращения Земли в значительной мере связано с приливным трением в мелких морях. Выделяющееся при этом тепло для земных недр потеряно. Таким образом, этот источник тепла можно не учитывать.

При современном состоянии наших знаний основным источником тепловой энергии внутри Земли следует считать энергию, выделяющуюся при радиоактивных превращениях таких элементов, как уран, торий и калий, которые в заметных количествах содержатся в горных породах. Хотя наши сведения о содержании радиоактивных элементов в горных породах еще очень не полны, тем не менее имеющиеся данные показывают, что радиогенного тепла выделяется не только в количестве, достаточном для покрытия теплового потока, поступающего из земных глубин. Видимо, остается еще избыток энергии, который может идти на дальнейший разогрев земного шара или на различные процессы, преобразующие структуру Земли.

Зная значение теплового потока, можно попытаться вычислить температуру земных недр. Для этого надо еще знать количество тепла, выделяемого веществом Земли, и коэффициент теплопроводности Земли. Для оценки температуры на больших глубинах надо принять во внимание возраст Земли и характер процессов перераспределения вещества в течение истории Земли.

Таким образом, температура на больших глубинах может быть оценена лишь очень грубо. На глубинах же в несколько сот километров расчеты дают более надежные результаты. На глубине 50 км под континентами температура, видимо, дости-

гает 800—900°; есть основания считать, что под океанами на этой глубине температура на 100—200° выше. На глубине 100 км температура достигает 1200—1500°. Эти значения подтверждаются температурами вулканических лав, которые обычно идут с глубины в 50—100 км и имеют температуру около 1200°. Такие же температуры получаются и по значениям электропроводности, приведенным на рисунке 1.

При переходе к большим глубинам температура растет очень медленно и у границы земного ядра достигает 2000—4000°.

### ЗЕМНАЯ КОРА

Под земной корой в настоящее время понимают весь комплекс горных пород, лежащий выше поверхности Мохоровичича. От подкоровой среды земная кора отличается гораздо более сложным строением. Это связано с тем, что кора представляет собой пограничную область между твердой Землей, гидросферой и атмосферой. Это область, легко доступная воздействию энергии, поступающей от Солнца, и обладающая иными условиями химического равновесия, чем на больших глубинах, и облегченными условиями переноса вещества.

Само вещество коры поступало в течение всей истории Земли и продолжает сейчас поступать из ее недр. Высокая энергетическая насыщенность недр, резкий спад ее на протяжении коры и связанные с этим различные процессы в подкоровой среде не только влияют на кору, но можно с уверенностью утверждать, что именно они определяют в основном направление развития земной коры. Изложению этих вопросов будет посвящен заключительный раздел брошюры.

К настоящему времени можно считать установленными основные черты строения земной коры. Имеются два основных типа земной коры, резко отличных друг от друга строением и историей развития: континентальный тип коры и океанический тип. Для континентального типа характерна большая толщина коры в 30—40 км в областях континентальных равнин. Верхняя часть коры складывается «гранитным слоем», который характеризуется следующими значениями скоростей сейсмических волн:  $v_P = 5,6—6,1$  км/сек;  $v_S = 3,4—3,7$  км/сек.

Плотность слоя в среднем близка к  $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup>, модуль твердости  $\mu = 3,3 \cdot 10^{11} \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$ ; эти значения близки к аналогичным для гранита и близких к нему пород. Конечно, название слоя «гранитный» несколько условно, так как в его состав входят и другие породы, близкие к гранитам, и даже породы, значительно отличающиеся от них. Впрочем, процент последних, видимо, не велик.

Нижняя часть континентальной коры характеризуется следующими значениями скоростей сейсмических волн

$v_p = 6,4 - 6,8$  км/сек;  $v_s = 3,7 - 4,1$  км/сек; плотностью  $\rho = 3,0$  г/см<sup>3</sup> и модулем твердости  $\mu = 4,3 \cdot 10^{11} \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$ . Эти величины очень близки к аналогичным для габбро. Поскольку габбро—глубинная порода, а излившейся его разновидностью является базальт, то за нижним слоем континентальной коры утвердилось условное название «базальтового» слоя. Широкая распространенность базальтовых излияний на земной поверхности также считается подтверждением существования «базальтового» слоя. Гранитный слой коры в большинстве случаев занимает от половины до трех четвертей толщины континентальной коры.

Переход между гранитным и базальтовым слоями осуществляется по-разному: в некоторых районах — скачком, поэтому имеется достаточно четкая граница между этими слоями; в других случаях переход этот постепенный или почти постепенный через ряд незначительных скачков на нескольких границах.

Океанический тип коры отличается от континентального тем, что имеет гораздо меньшую толщину, полностью лишен гранитного слоя и характеризуется показателями, близкими к тем, которые были приведены для «базальтового» слоя. Поскольку на океанах, как правило, отсутствуют породы гранитного типа, то обычно считается, что океаническая кора состоит из одного «базальтового» слоя. Конечно, в большинстве случаев и на континентах и на океанах эти слои перекрываются сверху чехлом осадочных пород.

На рисунке 3 представлены разрезы типичных участков земной коры обоих типов, кроме того, приведен типичный разрез для коры в горном районе и в областях прогибов и глубоководных впадин. Важно подчеркнуть, что кора высокогорных районов имеет ярко выраженный континентальный тип: ее толщина резко увеличена, увеличена и толщина отдельных слоев. Наоборот, кора в прогибах носит скорее океанический характер: в ней отсутствует или почти отсутствует гранитный слой, правда, толщина базальтового слоя значительно увеличена; резко увеличена и толщина слоя осадочных пород.

Переход от континентального типа коры осуществляется, по-видимому, постепенно путем выклинивания гранитного слоя, как это показано на рисунке 4, где дан типичный разрез через переходную зону от континента к океану. Кроме отмеченных типов коры, существуют еще участки коры, имеющие промежуточный характер. Особый интерес представляет строение подводных океанических валов типа Средне-Атлантического, однако их строение еще недостаточно изучено. Пока установлено, что земная кора в этих местах толще океанической, но тоньше, чем на континентах, а скорости сейсмических волн несколько повышены. Это заставляет некоторых

исследователей предполагать, что здесь в кору вторгается в заметных количествах подкоровое вещество.

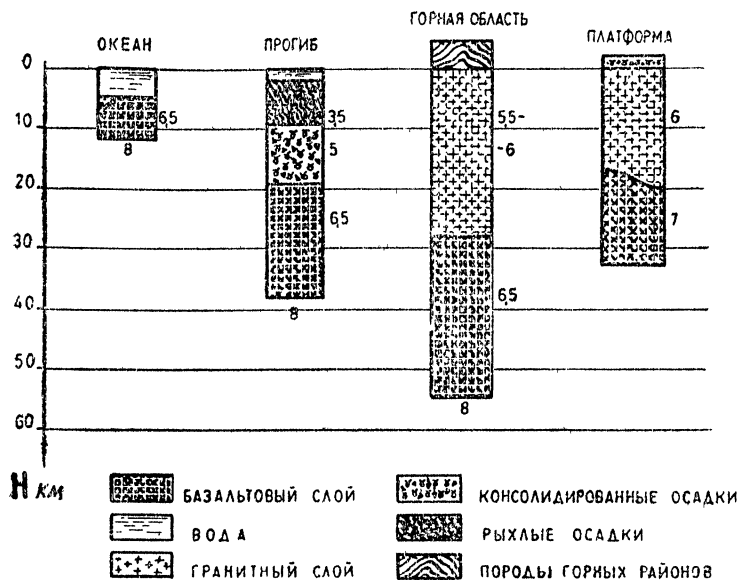


Рис. 3. Главные типы строения Земли.

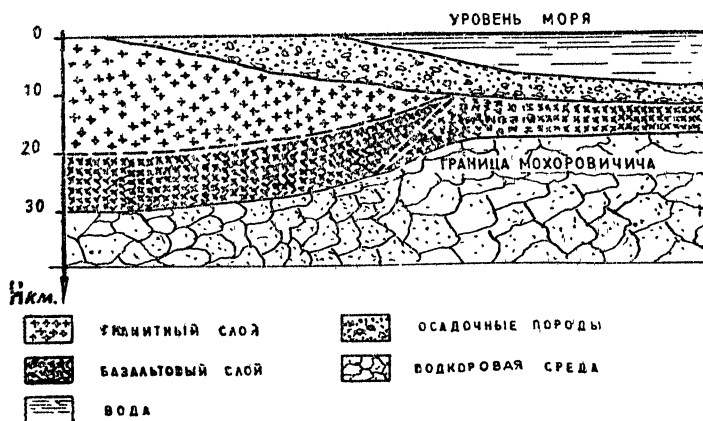


Рис. 4. Разрез земной коры в зоне перехода от континента к океану.

Надо особенно подчеркнуть, что географические области континентов и океанов не совсем совпадают с областями рас-



пространения континентального и океанического типов земной коры. Положение береговой линии, которая отделяет географические океаны от континентов, меняется довольно быстро во времени.

Известно, что в прошлые эпохи море заливало обширные области континентов (трансгрессии), и, наоборот, многие части земной поверхности, находящиеся сейчас под водой, ранее были сушей. Граница между континентами и океанами, как основными структурными подразделениями земной коры, имеющими разное строение и прошедшими разный путь развития, гораздо лучше очерчивается линией глубин в 4 тыс м. При этом, например, северная часть Атлантики между Скандинавией и Шотландией, с одной стороны, и Ньюфаундлендом — Гренландией — с другой, оказывается отнесенной к континентам. Так и есть в действительности. Вся эта область имеет континентальный тип строения земной коры и представляет собой просто область современной трансгрессии моря. В этом отношении нынешний север Атлантики ничем принципиально не отличается от южной части Русской равнины в меловом периоде, когда она была залита водами океана и на ней отлагались типичные океанические осадки. То же относится ко многим частям Северного Ледовитого океана и к ряду других областей.

Здесь мы подошли к вопросу о движениях земной коры. Сейчас установлено, что любая часть земной коры в течение геологической истории испытывала вертикальные перемещения, то поднимаясь, то опускаясь. Такие повсеместно распространенные вертикальные движения получили название колебательных.

В каждую эпоху геологической истории те части земной поверхности, которые теперь являются континентальными, разделялись по характеру колебательных движений, а также по проявлениям магматической деятельности и по характеру деформаций на области двух различных типов. Первый тип носит название платформенных областей.

Для них характерны сравнительно медленные вертикальные движения, постепенные переходы поднятий в опускания на расстояниях в сотни и тысячи километров. Осадочные породы накапливаются также медленно, и если иногда их откладывается и довольно большая толща, то это происходит за длительные промежутки времени. Магматизм платформ, как правило, развит не сильно, проявляясь по преимуществу в виде базальтовых излияний. Хотя такие излияния и бывают весьма велики (излияния в Индии, Сибири), но в процентном отношении их роль очень скромна. Деформации коры носят главным образом характер расколов, разломов со сдвигом одних частей относительно других преимущественно в вертикальном направлении.

В то же время развитие других частей земной коры носит совершенно иной характер. Они называются геосинклинальными областями. Для геосинклинальных областей характерны: большой размах и большая скорость колебательных движений, при этом области поднятий на коротких расстояниях сменяются областями интенсивных прогибаний. Все это ведет к возникновению резко выраженного рельефа с горами и расположенными вдоль них глубокими прогибами. При этом имеет место быстрое разрушение возвышенностей и столь же быстрое накопление мощных толщ осадочных пород во впадинах. В этих областях чрезвычайно развит магматизм во всех проявлениях. Процент изверженных пород здесь очень велик, он часто превосходит 50. Это области реального, быстрого прироста вещества земной коры за счет приноса материала из подкоровых глубин, причем сам изверженный материал очень разнообразен.

Прирост вещества во времени характеризуется весьма определенными закономерностями: вначале появляются ультраосновные породы (бедные кремнеземом и алюминием), затем начинают поступать основные излияния базальтового типа. Они сменяются средними изверженными породами, для которых достаточно типичны андезиты. Наконец внедряются массы кислых, богатых кремнеземом пород гранитовой группы. Именно для геосинклинальных областей и характерно формирование огромных гранитных тел.

Деформации коры в геосинклинальных областях также отличны от платформенных и по масштабу и по характеру. Наряду с разломами и смещениями по ним, здесь широко распространено смятие слоев в складки. Именно складчатость является характернейшим признаком геосинклинальных областей.

Наряду со складками и вертикальными перемещениями по разрывам, близким к вертикальным, в геосинклинальных областях проявляются явно горизонтальные перемещения в виде надвигов одних пород на другие, в виде смещений по вертикальным разрывам, но в горизонтальном направлении. Наконец в геосинклинальных областях наиболее резко проявляется метаморфизм, т. е. преобразование одних горных пород в другие под действием давления, температуры и приносовых из глубин летучих или жидких компонентов.

Если в каждый момент жизни Земли геосинклинальные области и платформы существуют в разных районах земной поверхности, то во времени они являются последовательными ступенями развития каждого участка земной коры. Любая платформа континентальной части коры проходила в прошлом через стадию развития, которую можно назвать геосинклинальной. Именно в этой стадии платформа приобрела свой

кристаллический фундамент, состоящий из смятых, сильно метаморфизованных пород, пронизанных магматическими телами — фундамент, который составляет верхнюю часть «гранитного» слоя коры. Таким образом, геосинклинальная стадия — первоначальная стадия развития континентальной земной коры; затем кора переходит в платформенную стадию. Что делается с платформами в дальнейшем, пока еще твердо не установлено.

Что касается областей, занятых корой океанического типа, то из-за ограниченных данных вопрос о них еще очень неясен. Надо надеяться, что в ближайшие годы благодаря развитию геофизических работ и особенно благодаря бурению дна океанов этот вопрос прояснится. Тем не менее необходимо обратить внимание на следующие чрезвычайно важные обстоятельства.

Те области, которые можно рассматривать как современные геосинклинали в активной стадии развития, в основном приурочены к границам океанов. Они окаймляют весь Тихий океан, частично известны по берегам Атлантики (Центрально-американские острова, области к юго-востоку от Огненной Земли) и в Индийском океане (островная дуга Индонезии). В этих районах действительно рядом с островными дугами или горными цепями протягиваются в непосредственной близости глубокие океанические желоба. Здесь развиваются наиболее сильные подвижки земной коры.

К этим областям приурочено 80% землетрясений, что свидетельствует о высокой активности земных недр вплоть до больших глубин, так как в этой области глубины очагов землетрясений доходят до 700 км, т. е. они проникают глубоко в мантию Земли. Подобное нигде не наблюдается на платформах. К этой же активной полосе островных дуг приурочены и самые большие нарушения силы тяжести в виде полос сильных дефектов притяжения. Сюда приурочено и большинство действующих или недавно потухших вулканов.

Другой системой образований, приуроченных к океанам и привлекающих к себе большое внимание, являются подводные океанические валы, характерные для всех океанов. Эти валы также являются областями повышенной активности, о чем свидетельствует приуроченность к ним большого количества землетрясений, вулканов, областей резко повышенного теплового потока, разломов в коре, которые проявляются в виде срединного грабена на валах.

Проявления вулканизма и разломы присущи океаническому дну и вне отмеченных особых зон. Изучены разломы, идущие в Тихий океан от берегов Северной и Центральной Америки, протяжением в тысячи километров. Со дна всех океанов поднимаются вершины вулканического происхождения, но не следует переоценивать их роли. Обычно впечатление уси-

ленной вулканической деятельности океанического дна связано с мелкомасштабностью карт, а также с тем, что под водой вулканические горы не разрушаются, как на суше, и после прекращения деятельности вулкана. Поэтому в океанах сохранились вершины всех вулканов, которые существовали с начала истории океанов. Если бы на континентах сохранились подобного рода образования, то их поверхность была бы покрыта проявлениями вулканизма в гораздо большей степени.

Последняя важная черта земной коры, на которой мы остановимся, — явление изостатической компенсации. Оно заключается в том, что сила тяжести на горах, континентах и океанах, если ее привести к одному уровню, оказывается почти одинаковой. Этого не должно было быть, если бы горы и континенты оказались просто наложены сверху на однородную кору. Для сохранения силы тяжести избыточные видимые массы континентов и гор должны компенсироваться на некоторой глубине недостатком массы так, чтобы суммарная масса на единицу площади в любой точке земной поверхности была бы одинаковой.

Поскольку плотность земной коры меньше плотности подкоровой среды, а плотность континентальной коры меньше плотности океанической, то, как легко видеть на рисунках 3 и 4, строение коры удовлетворяет этому условию. Действительно, легкая континентальная кора имеет по сравнению с океанической бóльшую толщину. Под горами кора еще более утолщается, образуя «корни гор», которые своей малой плотностью компенсируют избыток горных масс. Однако этим вопрос не исчерпывается.

В течение истории Земли происходил перенос больших масс вдоль ее поверхности от мест размыва к местам накопления осадков, что должно было изменить силу тяжести в соответствующих районах. Поскольку сила тяжести везде близка к нормальной, приходится сделать вывод, что где-то на глубине должен происходить компенсирующий перенос материала в обратном направлении.

Работы советских и зарубежных ученых, выполненные в последние годы в Антарктиде, в Гренландии, показали, что в обоих этих районах земная кора прогнулась под тяжестью так, как если бы кора плавала на подстилающей среде (закон Архимеда). Конечно, это только приблизительные соотношения, и кора обладает прочностью, которая не позволяет отдельным мелким ее участкам быть компенсированным самостоятельно. Та часть подкоровой среды, где происходят компенсирующие перетекания масс, обладает вязкостью, так что компенсация должна всегда запаздывать во времени по отношению к процессу нагружения или разгрузки, и компенсация вряд ли может быть полной.

Тем не менее теперь опять приходится серьезно рассмотреть прежнее предположение о том, что области бывших оледенений должны после стаивания ледников испытывать поднятия. Действительно, и Скандинавия и центральные части Канадской платформы сейчас поднимаются со скоростью примерно 1 м в 100 лет. Если учесть, что ледник ушел из этих мест примерно 10 тыс. лет назад, то можно определить вязкость среды, которая оказывается равной  $\eta = 10^{22}$  пуаз. К сожалению, эта величина крайне неточна, так как мы не в состоянии определить, какая часть поднятия вызвана разгрузкой, а какая иными причинами.

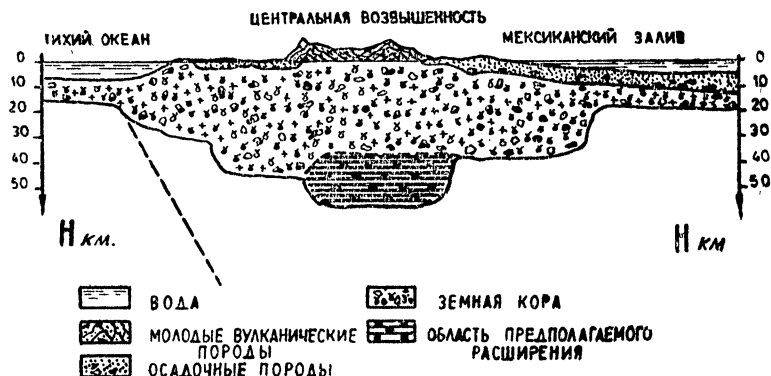


Рис. 5. Схематический разрез земной коры через Центральную Мексику.

В связи с этим надо подчеркнуть, что вертикальные движения, вызванные изостатическими причинами (нагрузка и разгрузка), играют в жизни земной коры совершенно второстепенную роль. Основная масса движений вызывается какими-то совсем иными, глубинными причинами. Именно они создают неровности рельефа, вызывают колебательные движения. Стремление к установлению изостатического равновесия может только вести к выравниванию рельефа и совершенно не способно создать колебательные движения.

Что касается неизостатических движений, то их причины еще далеко не выяснены. Некоторые ученые считают, что эти движения вызваны изменениями объема вещества в недрах Земли.

На рисунке 5 показан разрез от Атлантического до Тихого океана через Мексику. В центральной части разреза, под возвышенностью Центральной Мексики лежит как бы добавочное утолщение коры с пониженными скоростями сейсмических волн. Предполагается, что это и есть участок вещества, расширение которого вызвало недавнее поднятие Цент-

раально-мексиканской возвышенности. Отмечается сильная сейсмическая активность этого района с расположением очагов землетрясений в области предполагаемого расширения вещества. Следует учесть интенсивную вулканическую активность этой территории как в недавнем прошлом, так и в настоящее время с появлением новых вулканов прямо на глазах человека. Последний такой случай произошел в 1943 году, когда вулкан Парикутин возник на месте бывшего ранее там кукурузного поля и причинил огромные разрушения прилегающей территории.

Другие исследователи склонны приписывать эти движения конвекционным токам внутри Земли, сжатию Земли в процессе ее предполагаемого охлаждения, процессам дифференциации вещества земных недр. Наиболее вероятными в свете последних данных нам кажутся первая и последняя причины.

### ОБОЛОЧКА ЗЕМЛИ

Под земной корой, как мы видели, лежит оболочка, или мантия, Земли. Она простирается до глубины 2900 км и распадается на три слоя: *B*, *C* и *D*, что указывает на сложность оболочки.

Значение оболочки для развития Земли огромно. Именно из оболочки выделялось и выделяется вещество земной коры. В ней происходят процессы, вызывающие движения и деформации земной коры, в том числе и изостатические. Она содержит в себе запасы энергии, ответственные за основные преобразования, которые претерпела Земля в течение своей истории.

Как видно из рисунка 1, свойства оболочки меняются с глубиной, особенно быстро в переходном слое.

Поскольку наиболее тесно связаны с земной корой верхние части оболочки, начнем рассмотрение со слоя *B*. Модуль твердости под земной корой имеет значение, близкое к  $7 \cdot 10^{11}$ , плотность — от 3,3 до 3,7 г/см<sup>3</sup> (более точных данных нет, так как вещество оболочки недоступно непосредственному наблюдению).

Прохождение поперечных волн через оболочку показывает, что она не может быть в жидком состоянии. С другой стороны, очаги питания вулканов находятся именно в верхних частях оболочки, а это требует условий хотя бы частичного расплавления вещества в очагах вулканов.

Несколько лет назад Г. С. Горшкову удалось обнаружить под Ключевским вулканом на Камчатке область, через которую поперечные волны не проходят. Таким образом было показано существование очага расплавленного материала под вулканом.

Одной из наиболее достопримечательных особенностей оболочки является то, что на глубине 100—200 км находится слой с пониженными скоростями сейсмических волн. Этот слой был установлен исследователями в СССР и за рубежом, использовавшими различные методы. Происхождение слоя приписывается действию температуры. Одни полагают, что падение скорости в слое связано с тем, что на соответствующих глубинах имеет место быстрое нарастание температуры, так что этот эффект более силен, чем эффект нарастания давления. Другие считают, что слой пониженных скоростей связан с тем, что под влиянием высокой температуры здесь вещество переходит в аморфное, стекловидное состояние.

Вполне вероятно, что именно этот слой с пониженными скоростями сейсмических волн в значительной мере ответствен за то, что форма Земли так близка к фигуре равновесия вращающейся жидкой планеты.

После слоя низких скоростей идет переходный слой С, в котором скорости сейсмических волн резко возрастают, что означает также быстрое увеличение модуля сжатия и модуля твердости. Температура плавления на этих глубинах под действием давления становится также весьма большой и значительно превосходит предполагаемые температуры в оболочке.

Эти данные указывают на твердое состояние вещества оболочки всюду на больших глубинах. Однако твердое состояние еще не исключает перемещения вещества, которое должно происходить, если силы действуют в течение времени большего периода релаксации.

На существование активных процессов на больших глубинах указывает то, что очаги землетрясений доходят до глубины 700 км. Трудно предположить, что все процессы замирают на этой глубине, скорее всего они происходят и глубже, хотя, возможно, и в ослабленной форме. Отсутствие же землетрясений может быть связано с уменьшением периода релаксации.

Некоторое затухание процессов в оболочке на больших глубинах может быть объяснено следующим образом. Как показывают расчеты, достаточно сильный отток тепла и соответствующие ему большие градиенты (перепады) температуры простираются до глубин около 700—900 км. Такие градиенты должны содействовать появлению неустойчивости, напряжений и вызываемых ими движений и деформаций. О других причинах появления напряжений именно на этих глубинах будет сказано дальше.

Очень сложным, но крайне важным является вопрос о составе оболочки. В этом отношении единственным наводящим показателем является состав метеоритов. Дело в том, что независимо от гипотезы происхождения Земли состав метеори-

тов должен в грубых чертах напоминать состав Земли. Однако в этом вопросе необходима большая осторожность, и говорить можно только о грубой аналогии.

Большинство метеоритов имеет такое специфическое строение, не похожее на строение горных пород, что надо предполагать их особое происхождение. Кроме того, если метеориты действительно происходят в основном от тел в интервале между Марсом и Юпитером, то надо учитывать, что это зона перехода от внутренних планет к планетам-гигантам с явно иным составом. Есть и еще соображения, заставляющие относиться с большой осторожностью к метеоритной аналогии.

Более достоверно можно строить гипотезу о происхождении Земли, основываясь на земных данных. К ним относятся происхождение земной коры из оболочки, состав лав и других изверженных пород, скорости сейсмических волн в оболочке, предполагаемая плотность оболочки, данные о минералах и горных породах, полученные в лабораториях при опытах с высокими давлениями и температурами.

К сожалению, таких данных еще явно недостаточно для определенного суждения о составе оболочки. Однако можно утверждать, что верхние части оболочки, так же как и кора, состоят из силикатов и алюмосиликатов. Гораздо сложнее ответить на вопрос, какие это силикаты и алюмосиликаты? Судя по скоростям сейсмических волн и высокой плотности, это могут быть либо ультраосновные породы, такие, как дунит, перидотиты (кстати, основная масса каменных метеоритов имеет примерно перидотитовый состав, отличаясь от земных пород все же тем, что в них содержится около 10% металлического железа, чего совершенно нет в земных породах), либо основные породы эклогитовой группы.

Дунит по своим свойствам подходит более или менее к свойствам верхних частей оболочки (скорости поперечных волн, а отчасти и продольных в дуните несколько малы по сравнению со скоростями в оболочке; видимо, несколько мала и плотность), тем не менее очень распространенное ранее представление о дунитовом составе оболочки теперь подвергается большому сомнению. Для этого имеются следующие основания: из дунитовой оболочки невозможно произвести земную кору по той простой причине, что в дуните нет в заметном количестве ряда веществ, нужных для образования земной коры.

Можно предположить, что дунит это уже остаток, образовавшийся после того, как из оболочки выделилась земная кора. Однако этому противоречат обширные базальтовые излияния на всех континентах, происходившие уже после образования коры. Базальт из дунита не может быть получен.



В последние годы были выполнены опыты над дунитом при высоких давлениях. На рисунке 2 была приведена полученная зависимость плотности дунита от давления и кривая плотности для земли по Буллену. Сопоставление показывает, что если в верхних частях оболочки дунит еще как-то подходит по плотности, то для средних частей оболочки его плотности заведомо малы. Предлагаемые некоторыми авторами гипотезы о переходе дунита под давлением в другую, более плотную модификацию никем не доказаны, хотя в принципе такой переход и возможен. Экспериментальные данные эту гипотезу не подтверждают, но не опровергают окончательно, так как давления в опытах были очень кратковременные.

С точки зрения происхождения земной коры, более правдоподобно предположение о перидотитовом составе верхних частей оболочки Земли. Недавно А. П. Виноградов, проводя опыты зонной плавки вещества метеоритов, показал, что таким образом можно получить расплав, близкий к составу действительной коры. Однако надо отметить, что при этом нужно было бы вести выплавление коры из оболочки вплоть до очень больших глубин, причем, чтобы получить нужный состав, разные вещества пришлось бы выплавлять с разных глубин, что кажется маловероятным.

Более того, если из перидотитов можно выплавить магмы приблизительно базальтового состава, то откуда взялись граниты? Если они выделились из базальтов, как иногда предполагают, то куда делся тогда ультраосновной остаток, который должен был бы получиться в столь же огромных количествах?

К этому надо добавить, что по скоростям сейсмических волн и плотности перидотит еще менее подходит к оболочке, чем дунит. Нередко делается предположение, что перидотитовый состав был не у первоначальной оболочки, а возник впоследствии в результате выделения земной коры. Такое предположение кажется уже более вероятным, во всяком случае сейчас трудно найти против него решительные возражения. В этом случае следует считать, что оболочка под континентами, где выделилась мощная кора, перидотитовая, а под океанами, где выделения коры почти не было, оболочка должна иметь несколько отличный состав. Впрочем, это замечание остается в силе в той или иной мере во всех случаях.

В последние годы многие исследователи стали возвращаться к старой и давно почти оставленной идее о том, что первоначальная оболочка имела примерно эклогитовый состав.

По химическому составу эклогит и базальт это практически одно и то же. В чем же между ними разница? Разница в минералогическом составе. Эклогит состоит из минералов,

устойчивых при высоких давлениях, обладающих высокой плотностью и во многих случаях большими скоростями сейсмических волн. Так, один из характерных для эклогитов минерал — гранат имеет скорости сейсмических волн и плотности, хорошо подходящие к нижнему слою оболочки глубже 900 км. Если эклогит расплавить, то при малых давлениях он застынет в базальт или его более глубинную разновидность — габбро. Однако при постепенном нагреве эклогитов из них будут выплавляться более кислые расплавы, близкие по составам к андезитам или даже еще более богатые кремнеземом.

Этот материал как менее плотный поднимется вверх, где и может образовать земную кору континентального типа. Состав земной коры в целом очень близок к андезитам. Такой первичный материал, поступая из глубин, мог затем путем дифференциации дать гранитный и базальтовый слои, характеризующие континентальную кору.

С другой стороны, по скоростям сейсмических волн и плотности эклогиты лучше всех других пород соответствуют данным наблюдений подкоровой среды. Эклогитовая оболочка позволяет предполагать, что плотность верхних частей оболочки несколько выше, чем она выводится по закону плотности Буллена, а это ведет к лучшему согласию со всеми наблюдаемыми данными, в том числе и данными о плотностях других планет земной группы.

Это же предположение, по-видимому, лучше других может объяснить переход от верхних частей оболочки к ее нижним частям, лежащим глубже 900 км. На рисунке 2 приведена кривая изменения плотности габбро в зависимости от давления, полученная экспериментально. Из графика видно, что плотность габбро увеличивается скачком при давлении, соответствующем глубине 400—500 км. Поскольку габбро химически аналогичен базальту и эклогиту, то можно предполагать, что аналогичный переход существует и в эклогите, который тогда по плотности будет соответствовать слою *D* оболочки.

Относительно природы такого перехода высказываются различные предположения. Первое предположение объясняет увеличение плотности перестройкой решетки минералов в пространственную решетку с более плотной упаковкой атомов, что вполне возможно для некоторых эклогитовых минералов. Второе предположение объясняет увеличение плотности и скоростей сейсмических волн тем, что под действием давления ранее господствовавшие в минералах ионные типы связи заменяются валентными. Третье предположение, первоначально выдвинутое для перидотитовой оболочки, заключается в том, что на этих глубинах происходит распад

силикатов на окислы и что нижняя часть оболочки состоит из окислов магния, железа, кремния и, вероятно, алюминия.

Если оболочка имеет состав, близкий к эклогитам, то возникает вопрос о ее соотношении с земной корой, о природе границы Мохоровичича. При дунитовом или перидотитовом составе оболочки вопрос о природе этой границы решается легко: кора отличается от оболочки своим составом, и граница Мохоровичича есть граница изменения состава. Если же в оболочке состав эклогитовый, а нижние части коры по составу близки к базальтам, то вопрос должен стоять иначе, так как базальты и эклогиты химически очень близки (следует подчеркнуть, что и базальты и эклогиты — породы многоминеральные и могут довольно значительно колебаться по составу).

Основываясь на близости химического состава базальтов и эклогитов, делается предположение о том, что поверхность Мохоровичича является своего рода фазовой границей, отделяющей вещество одинакового состава, но сгруппированное в разные системы минералов.

Однако вряд ли это везде так. Если предположить, что под океанической корой граница носит характер фазового перехода всего на глубине 5—10 км, то под континентами она должна быть на глубине около 40 км, а под горами на глубинах до 70—80 км, что малоправдоподобно, если учесть как с глубиной растут давление и температура.

То, что известно о происхождении коры континентального типа, возникшей в значительной мере за счет поступления из недр расплавленного материала (это поступление продолжается и в настоящее время), весьма плохо согласуется с представлением о фазовой границе. Надо учесть и то, что не все минералы эклогитовой группы образуются при одинаковых условиях давления и температуры.

На рисунке 6 приведены предполагаемые кривые температуры под дном океана и под континентами и показаны кривые перехода некоторых минералов базальтовой группы в соответствующие минералы эклогитовой группы. Даже для этих немногих минералов видно, что переход происходит на разных глубинах.

Таким образом, если граница Мохоровичича и является границей фазового перехода, то она, видимо, соответствует переходу какого-то одного минерала, достаточно характерного для эклогита. Все же другие переходы происходят либо уже в оболочке, либо отчасти в самой коре, где они могут обусловить другие границы.

Скорее же всего подошва земной коры в общем отвечает изменению состава, так как кора выделилась из оболочки; остаток же может приближаться либо к перидотитам, либо быть эклогитовым.

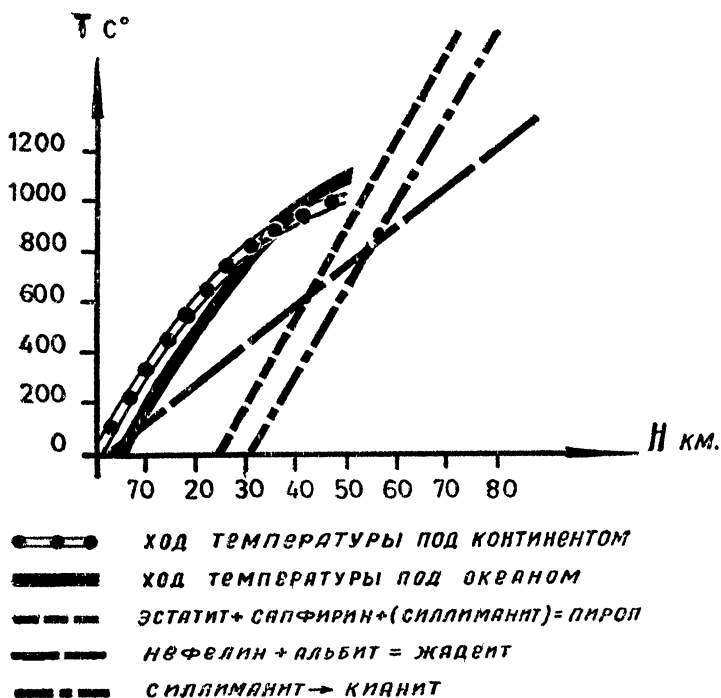


Рис. 6. Кривые перехода некоторых минералов, характерных для низких давлений, к минералам устойчивым при высоких давлениях (эклогитовые).

Рисунок 6 показывает, что под земной корой наступают условия, при которых делаются устойчивыми минералы эклогитовой группы, и вследствие того, что разные минералы становятся устойчивыми на разных глубинах и по-разному под континентами и океанами, то строение верхних частей оболочки должно быть весьма сложным, неоднородным.

Понятно, что всякие изменения температуры или давления со временем должны смещать условия равновесия между минералами как под корой и в коре, так и в переходном слое *C* на больших глубинах. Смещение условий равновесия должно вести к преобразованиям минеральных групп, что в свою очередь порождает изменения объема вещества. Именно эти изменения объема и могут быть одной из существенных причин, вызывающих те вертикальные движения земной поверхности, которые наблюдались в течение всей истории Земли.

С другой стороны, эти изменения объема внутри оболочки и коры должны приводить к деформациям вещества, к возникновению напряжений. Пока эти напряжения не велики,

они ничем особенным не проявляются, но если процесс продолжается и идет достаточно быстро, то деформации будут все возрастать, напряжения тоже будут увеличиваться, так как релаксация — рассасывание напряжений — не будет поспевать за их ростом.

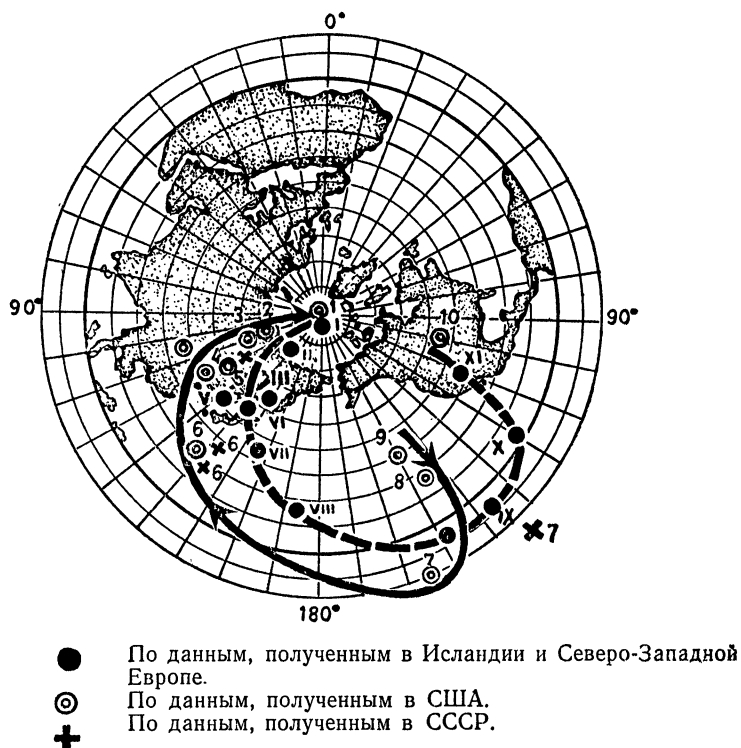


Рис. 7. Местоположение полюса в разные эпохи (на основании палеомагнитных исследований).

По данным, полученным в Исландии и Северо-Западной Европе: I — верхнетретичная, плейстоцен и современная; II — олигоцен; III — эоцен; IV — триасовый; V — пермский; VI — каменноугольный (две серии наблюдений); VII — девонский; VIII — кембрийский; IX — верхний торридон; X — лонгмайнд; XI — нижний торридон.

По данным, полученным в США и в СССР: 1 — верхнетретичная и современная; 2 — меловой; 3 — триасовый; 4 — пермский (три серии наблюдений); 5 — каменноугольный; 6 — силурийский; 7 — кембрийский; 8—9 — верхнепротерозойский.

Наконец наступит момент, когда напряжения достигнут прочности горных пород. В этот момент в породе начнется разрушение, которое осуществляется очень быстро. Накопившаяся упругая энергия при этом перейдет в некоторой своей части в энергию упругих колебаний, которые называются сейсмическими волнами. Происходит землетрясение.

Вероятно, существуют и иные процессы, которые могут приводить к накоплению напряжений, например смещения оси вращения Земли, общее изменение температуры земного шара, конвекция.

Однако если мы посмотрим на географическое размещение землетрясений, то увидим, что они в основном приурочены к областям молодых горообразовательных процессов, сопровождающихся активной магматической деятельностью. При этом основная масса оказывается расположенной вдоль берегов Тихого океана, совпадая с «андезитовой линией», т. е. с тем поясом андезитовых излияний, которые поступают здесь из недр Земли.

Если учесть, что между континентальными областями и океаническими на глубине обязательно должна существовать разность температур, то можно сделать предположение, что именно эти области наиболее благоприятны для проявления процессов изменения минералогического состава, фазовых переходов.

Проявлением этих процессов на поверхности и служит весь комплекс явлений, описанных как геосинклинальный режим развития земной коры. Следовательно, есть основания считать главным источником движений, деформаций и землетрясений комплекс физико-химических явлений, протекающих в недрах Земли и вызывающих преобразование оболочки и земной коры.

Следует также упомянуть о некоторых предположениях, объясняющих появление и деятельность вулканов. Вулканизм всегда приурочен к областям сейсмической активности, причем, как правило, извержения либо предваряются землетрясениями, либо идут примерно вместе с ними. Всем памятна недавняя катастрофа в Чили, когда в результате сильных землетрясений ожили старые вулканы и начали действовать новые. Это явление очень типично. Таким образом, вулканы действуют в областях, где в недрах накапливаются большие напряжения.

Как известно, температура плавления повышается с увеличением давления. В присутствии напряжений, соответствующих повышенному среднему давлению, температура в данном месте может подняться несколько выше нормальной для определенных глубин, не вызвав расплавления или разжижения (в случае аморфного состояния) вещества.

В результате же землетрясения происходит падение напряжений, а следовательно, и среднего давления, что может привести к расплавлению или разжижению части материала. Так как землетрясение большой силы ведет и к нарушениям земной коры, то этим облегчается поступление расплавленного материала вверх.

Таким образом, причиной магматизма является тепло, тепловая энергия, а толчком к его проявлению — снятие напряжений при землетрясениях. Конечно, пока это только гипотеза, возможно, что у магматизма есть и иные причины. Этот вопрос еще слишком мало исследован.

## ЯДРО ЗЕМЛИ

**П**од ядром Земли понимается вся ее часть, лежащая глубже 2900 км. Естественно, что об этой части Земли известно еще меньше, чем об оболочке.

Удаленность ядра от земной поверхности, казалось бы, делает его изучение менее актуальным с практической точки зрения. Это не совсем так. Дело в том, что с ядром Земли связано происхождение такого важного геофизического объекта, как магнитное поле Земли. Кроме того, не поняв природу ядра, почти невозможно правильно понять происхождение Земли и других планет. Без этого нельзя дать правильную картину развития земного шара в целом. Отсюда и ясно, почему изучению ядра посвящено немало исследований.

Как видно на рисунке 1, поперечные волны не проходят через ядро Земли, что указывает на его жидкое состояние, по крайней мере в том смысле, что период релаксации и вязкость вещества ядра очень малы. С другой стороны, это же заключение подтверждается и тем, что модуль твердости ядра получается из наблюдений очень малым, таким, что его отношение к модулю сжатия уже характерно не для твердых, а для жидких тел.

Появление поперечных волн во внутреннем ядре указывает, по-видимому, на то, что здесь вещество снова становится твердым.

Другое важное свойство вещества ядра — его большая плотность и высокая металлическая электропроводность.

На основе этих данных еще в прошлом веке возникло предположение о том, что ядро Земли состоит из железа с некоторой примесью никеля. При этом проводилась аналогия с составом железных метеоритов, которые считались остатками ядра распавшейся планеты.

Само происхождение железного ядра объяснялось в то время просто: считалось, что в первоначально расплавленной Земле железо просто опустилось вниз, как наиболее тяжелая часть.

Однако лет 20 назад стали возникать большие сомнения в том, что ядро может состоять из железа. Дело в том, что железное ядро требовало для Земли в целом такого большого процента железа, что это казалось весьма неправдоподобным. Плотности Луны и Марса показывают, что у них нет плотного ядра, как у Земли, в то время как у Венеры.

которая по размерам близка к Земле, такое ядро есть. Получалась непонятная зависимость содержания железа от размера планеты.

Наконец, после появления гипотезы об относительно холодном происхождении Земли стало не ясно, как могло железо, если бы его и было достаточное количество, образовать ядро? К этим затруднениям добавилось в последние годы еще одно: в СССР Л. В. Альтшулер с сотрудниками произвел экспериментальное определение плотности железа при давлениях в несколько миллионов атмосфер. Оказалось, что плотность железа у границы ядра столь велика, что выходит за верхний предел, полученный Молоденским (см. рис. 2). Чтобы устранить эту трудность, надо было предположить либо большую температуру ядра, что маловероятно, либо каким-то образом допустить, что к железу в ядре подмешан какой-то довольно легкий компонент.

Все эти трудности привели к тому, что большей популярностью стала пользоваться гипотеза о том, что переход к ядру не означает замену силикатов мантий железом и что на границе ядра под действием давления в 1,5 млн. атм силикаты мантий приобретают металлические свойства: резко возрастают скачком их плотность и электропроводность.

В принципе такие явления известны. Так, существует серое и белое олово, из которых белое олово — металл, а серое — не металл, примерно вдвое менее плотное, чем белое олово. Известно, что фосфор под большим давлением переходит в металлическую модификацию с резким возрастанием плотности и электропроводности. В простейших случаях такие переходы удается рассчитать теоретически (рассчитаны металлический водород, гелий и метан).

Эти расчеты позволили существенно уточнить наши сведения о строении больших планет. К сожалению, для силикатов они очень сложны, и пока не удалось получить удовлетворительных результатов. Однако приближенные оценки не давали грубо противоречащих наблюдениям результатов.

При такой гипотезе стали легко объясняться и плотности других планет. У Луны и Марса средняя плотность мала потому, что в их недрах давление не доходит до критического, чтобы вызвать металлизацию силикатов, необходимую для получения плотного ядра. На Венере же такое давление достигается, и соответственно у нее появляется ядро.

К сожалению, эта столь «соблазнительная» гипотеза в самое последнее время оказалась поколебленной. Были проведены опыты над сжатием оливина (основная часть дунита) до давлений в несколько миллионов атмосфер (Л. В. Альтшулер и др.), и оказалось, что никакого скачка плотности в оливине обнаружить не удалось (см. рис. 2). Хотя давление было очень кратковременным и испытан всего один си-



ликат, так что опровержение нельзя считать полным, тем не менее остается очень мало надежд на то, что такой переход осуществляется. Мысль ученых снова начинает возвращаться к прежним представлениям о железном ядре. Конечно, при этом опять всплывают все ранее отмеченные трудности, связанные с таким предположением.

Сейчас, однако, можно утверждать тот важный факт, что ядро существует и его вещество находится в металлическом и жидком состоянии. Последние два обстоятельства очень важны для теории земного магнетизма.

Как известно, советские ракеты, запущенные к Луне и на Луну, показали, что у Луны отсутствует заметное магнитное поле такого типа, как на Земле. Этим еще раз подтвердилась связь земного магнетизма с ядром.

Сейчас наиболее правдоподобным считается следующее объяснение происхождения магнитного поля Земли.

В жидком металлическом ядре под влиянием тепла, выделяющегося в ядре из содержащихся в нем радиоактивных элементов, возникают конвекционные течения вещества. Поскольку в нем всегда присутствуют слабые магнитные поля, возникает механизм, подобный динамомашине, работающей на самовозбуждении.

Конвекционные течения металлического вещества представляют проводники, движущиеся в слабых магнитных полях; в результате в проводниках возникают индукционные токи, которые создают свои магнитные поля, усиливающие процесс.

В итоге каждая конвективная ячейка создает свое довольно сильное магнитное поле. Эти поля имеют разные знаки и, суммируясь, дают в результате не очень сильное поле Земли. Поскольку течения в ядре могут смещаться относительно поверхности Земли, то и магнитное поле может смещаться. Такое смещение в виде дрейфа поля к западу действительно было обнаружено.

Легко также себе представить, что поскольку земное поле есть результат сложения полей нескольких источников, которые сами могут меняться во времени, то можно ожидать изменений знака магнитного поля Земли. Действительно, исследования магнитного поля прошлых эпох, проведенные в последние годы, показали, что знак магнитного поля нашей планеты в прошлом неоднократно менялся на обратный.

Надо сказать, что палеомагнитные исследования показали, что в прошлом перемещение магнитных полюсов Земли на поверхности Земли происходило медленно, но за геологическое время оно оказалось очень большим. Полюс сместился из приэкваториальных частей Тихого океана в современное положение (как это видно из схемы на рисунке 7).

## ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

На основе всех приведенных выше данных о внутреннем строении Земли можно рассмотреть основные современные представления о процессах развития Земли, формирования и дальнейших преобразований земной коры и ее отдельных крупных частей. Это важнейшие задачи естествознания, имеющие огромное теоретическое и практическое значение.

От правильного понимания этих вопросов зависит в большой мере решение проблем происхождения и размещения полезных ископаемых; современных движений земной коры; происхождения землетрясений, а следовательно, сейсмического районирования; прогноза землетрясений и др.

В настоящее время состояние науки в рассматриваемой области таково, что нет достаточного количества данных, позволяющих выработать вполне обоснованную теорию развития Земли и земной коры.

Сейчас эта область знаний находится в том состоянии, когда одновременно существует несколько гипотез, пытающихся найти путь к решению проблемы. В той или иной мере эти гипотезы согласуются между собой, но часто выдвигаются концепции прямо противоположного характера.

Из многих ныне существующих гипотез большинство покоится на весьма шатких основаниях, часто не выдерживая первых же попыток серьезной критики. Поэтому здесь будет кратко рассмотрено только несколько основных гипотез, пользующихся признанием.

Любая гипотеза, рассматривающая вопросы развития Земли, должна объяснить факты, известные из наблюдений. В первую очередь необходимо объяснить происхождение континентального и океанического типов земной коры. Должны найти свое объяснение геосинклинальный и платформенный типы коры, их взаимоотношение. Следует понять процессы горообразования, вулканизма и землетрясений и указать причины особенностей их географического размещения. Нужно учитывать особенности гравитационного и магнитного полей Земли, их изменения во времени. Необходимо объяснить тепловой поток из недр Земли.

Гипотеза должна учитывать большое количество геологических фактов: особенности структур и их размещение, прошлые связи между континентами, распределение климатов в прошлом Земли, особенности процессов осадконакопления (направления приноса обломочного материала, мощности отложений и многие другие), вертикальные и горизонтальные движения частей земной коры и т. д., а также согласовываться с основными данными о внутреннем строении Земли.

К началу XX века господствующей гипотезой была гипотеза контракции или постепенного сжатия Земли. В своем классическом виде эта гипотеза происходила из представлений о первоначально раскаленной, расплавленной Земле.

Считалось, что в стадии расплавленной планеты вещество Земли распределилось по удельному весу: возникло тяжелое железное ядро, менее плотная оболочка и, наконец, самая легкая часть сконцентрировалась сверху в виде земной коры.

Земная кора остыла и затвердела первой. Поскольку недра Земли продолжали застывать, то происходило постепенное сжатие планеты, кора делалась слишком большой для внутренних частей, стремясь приспособиться к сокращающимся размерам планеты. Кора сморщивалась, сжималась в складки, которые и образовали горы.

Естественно, что при такой схеме все части коры считались одинаково устроенными, океаны отличались от континентов не строением коры, а просто тем, что в процессе деформации коры эти области оказались опущенными больше других, предполагалось, что опускания продолжались и далее, так что, по мнению некоторых исследователей, все континенты должны были со временем исчезнуть, будучи поглощены океанами.

Сосредоточение гор в весьма ограниченных районах Земли объяснялось тем, что они приурочены к местам, где земная кора в данный момент наименее прочна. Вулканизм при этом, естественно, рассматривался как остаточный эффект расплавленных недр.

Конечно, в таком примитивном виде гипотеза не могла долго удержаться. Указывалось на то, что она не объясняет происхождения двух типов земной коры, не соответствует данным о внутреннем строении Земли, так как оболочка твердая. Она также не объясняла процесса обрушения материков и образования океанов. Горы не могли образовываться в сравнительно узких зонах, так как кора не в состоянии была бы передавать сдавливание на большие расстояния; при сокращении поверхности вся кора должна была дробиться и сжиматься более или менее равномерно.

Гравитационное поле Земли тоже создавало противоречие с такой гипотезой развития. Наконец, ученые указывали на то, что основа гипотезы в корне неверна. Земля не проходила через стадию расплавленной планеты, а если даже и проходила, то затвердение Земли должно было идти снизу вверх, а не сверху вниз, и тогда в силу плохой теплопроводности остывать должны были главным образом верхние части. Глубины же Земли либо не остывали, либо даже должны были разогреваться под влиянием выделения радиоактивного тепла. В такой схеме, наоборот, кора делается малой.

по сравнению с недрами и должна была скорее разрываться, а не сминаться.

Однако контракционная гипотеза обладает большой живучестью и имеет до сих пор не мало последователей, что связано отчасти с тем, что по сравнению со всеми другими гипотезами она ясно объясняет происхождение мощных горизонтальных сил, способных сминать земную кору. В связи с этим делаются попытки улучшения гипотезы, приведения ее в большее согласие с современными данными.

Предполагается, что в период расплавленного существования в жидкой планете должны были существовать конвекционные течения, которые разорвали легкую гранитную кору на части, сконцентрировав ее на поверхности Земли пятнами, которые теперь соответствуют континентам. На освобожденных же от гранитной коры местах возникли затем океаны.

Указывается на то, что предположение о затвердении оболочки снизу основано на предположении об однородности оболочки. Если же учесть наличие расслоения, то легкий и легкоплавкий материал коры должен был затвердеть первым; тогда благодаря крайне низкой теплопроводности твердой коры темп остывания недр резко снизился. При этом в самой оболочке затвердение должно было действительно идти снизу вверх благодаря тому, что конвекция выравнивала температуры. Если считать, что кора возникла 3—4 млрд. лет назад, как это сейчас устанавливается по возрасту минералов, то, учитывая теплоту плавления, можно показать, что такой процесс легко объясняет величину теплового потока через поверхность Земли. Так как последними должны были затвердевать самые верхние подкоровые части, то легко объясняется существование слоя низких скоростей с большой подвижностью материала.

У этой гипотезы есть еще и то преимущество, что она легко объясняет железное ядро Земли, к мысли о котором опять приходится возвращаться. Однако все остальные трудности гипотезы контракции в сущности остаются.

Довольно близко к контракционной гипотезе в смысле взглядов на внутреннее строение Земли примыкает гипотеза конвекции, хотя во всех других отношениях она от нее отлична и даже во многом ей противоположна.

Как показывает само название, в этой гипотезе основу всего составляют конвекционные течения, которые предполагаются в оболочке Земли. Как думают, эти течения были не только в глубоком прошлом, но они существуют и сейчас. Они растягивают кору в одних местах и сжимают в других, где она утолщается, сминается, главным образом по краям. При этом образуются окраинные горные цепи, которые постепенно с периферии наращивают континентальные массивы. Такое наращивание континентов от центра к периферии

в целом подтверждается данными по определениям абсолютного возраста.

Однако этот процесс не надо понимать слишком упрощенно. Могут возникать конвекционные токи, которые способны привести к растяжению и раскалыванию уже созданных частей континентов, так что процесс развития довольно сложен. Примером области такого растяжения часто считается зона восточноафриканских разломов.

Гипотеза конвекции гораздо лучше соответствует современным представлениям о строении Земли и земной коры, однако и у нее можно отметить ряд существенных недостатков. Укажем на главные из них.

Наличие системы конвективных потоков под корой должно было привести к тому, что над восходящими потоками тепловой поток должен быть больше, чем над нисходящими частями течений; таким образом, вся поверхность Земли должна была бы быть покрыта системой ячеек с повышенными и пониженными тепловыми потоками соответственно размерам и размещению конвекционных течений. Однако современные данные пока не дают указаний на такой характер размещения теплового потока, поступающего из недр Земли.

Не очень хорошо объясняется развитие и геосинклинальных областей со сменой поднятий и опусканий, с характерным магматическим циклом. Что касается горизонтальных сил, предполагается, что они, как и по контракционной гипотезе, возникают не в областях складчатости, а в областях платформы и должны передаваться на расстояния порядка континентов, что маловероятно.

Наконец, совершенно не ясна сама основа гипотезы — существование конвекции; как она согласуется с огромным модулем твердости оболочки, с ее явным разделением на несколько слоев?

Близко к конвекционным гипотезам примыкают гипотезы мобилизма, которые иногда являются просто разновидностью конвекционных.

По гипотезам мобилизма, основное содержание развития земной коры заключалось в огромных горизонтальных перемещениях континентов. При этом обычно считается, что до мезозоя все континенты были тесно придвинуты друг к другу, образуя один континентальный массив — пятно гранитной коры. Относительно того, почему кора континентального типа возникла в виде единого пятна среди массива коры океанического типа, обычно говорится мало. Также не дается по существу объяснения тому факту, почему это пятно существовало как целое в течение 3 млрд. лет, а в течение последних 200 млн. лет вдруг раскололось и отдельные его части разошлись по поверхности Земли на ширину океанов.

Так, Америка, отойдя от Европы и Африки, образовала Атлантический океан. Указывается лишь на много аргументов в пользу такой схемы.

Главные аргументы таковы. Удивительный параллелизм берегов Африки — Европы, с одной стороны, и восточных берегов Америки — с другой. Структуры одного континента как бы обрезаются океаном и затем продолжают на другом континенте, хотя это и не всегда хорошо соблюдается, а часто и просто такого сходства нет.

Оледенение, которое было на Земле в верхнем палеозое, захватывало столь разные области, что никаким разумным перемещением полюсов их объяснить нельзя, но все становится на место, если сблизить континенты. Ранее существовавшие связи животного и растительного мира получают естественное объяснение в сближении континентов. Все эти аргументы были неоднократно проанализированы и приводимым фактам даны другие объяснения (только верхнепалеозойское оледенение, кажется, так и не получило вразумительного истолкования). Однако в последние годы интерес к гипотезам мобилизма резко повысился в связи с результатами палеомагнитных исследований.

Оказалось, что положения магнитного полюса, получаемые по наблюдениям на разных континентах, для прошлых эпох не совпадают между собой. Однако совпадение результатов можно резко улучшить, если допустить в прошлом значительные перемещения и повороты континентов. Сейчас еще преждевременно давать окончательное суждение по данному вопросу, тем более, что перемещения, вытекающие из палеомагнитных данных, нередко согласуются с данными о прежних климатах и др.

Здесь необходимо отметить следующее. Перемещения магнитного полюса в прошлом, которые не вызывают сомнений, указывают и на смещение географических полюсов, что далеко не очевидно. Вспомним, что сейчас магнитные полюсы отстоят от географических на  $20^\circ$ , и это, конечно, не предел, так что расхождение в положениях полюсов может быть весьма велико. Это заставляет предположить, что смещалась, конечно, не ось вращения в теле Земли (что возможно, но не в таких огромных масштабах), а смещалась земная кора.

Можно представить себе, что кора в целом могла перемещаться относительно Земли, скользя по слою малых скоростей сейсмических волн, где периоды релаксации невелики и, возможно, вещество находится в аморфном состоянии и во всяком случае температура его близка к точке плавления.

Причиной такого смещения может быть несовпадение оси, наиболее благоприятной для вращения коры (как самостоятельной оболочки), с осью вращения Земли. В результате

должны возникнуть касательные силы, стремящиеся повернуть кору до совпадения этих осей. К сожалению, количественных расчетов этого явления с современными данными нет.

Если же признать перемещение коры как целого, то легко представить, что при этом в ней могли возникать разного рода деформации и расколы, сопровождающиеся относительными горизонтальными подвижками ее частей.

Все эти вопросы ждут еще разработки. Однако уже сейчас можно высказать ряд соображений по изложенным гипотезам, которые заставляют отнести к ним с большой осторожностью.

Наиболее правдоподобными, хотя также не все объясняющими гипотезами, по нашему мнению, сейчас являются гипотезы постепенной дифференциации вещества оболочки Земли.

Согласно этой точке зрения, в процессе разогрева земных недр благодаря некоторой неравномерности в содержании радиоактивных элементов в оболочке выделились области, которые несколько забежали вперед в процессе разогрева. В этих областях началось выплавление из оболочки легкоплавкой и малоплотной части, которая в силу легкости поднялась вверх, дав начало континентальным частям коры.

Этот процесс, расширяясь в стороны, вел к постепенному наращиванию континентов по периферии. По мере исчерпания процесса развитие коры с его магматизмом, сильными движениями и деформациями замедлялось. С этой точки зрения океаническая кора это почти первоначальная кора Земли, немного измененная слабым процессом дифференциации.

Геосинклинальные области это области активного процесса, где океаническая кора перерабатывается в континентальную за счет поступления глубинного вещества в виде выплавов примерно андезитового или еще более кислого состава. Вверх выносятся и радиоактивные вещества, которые обогащают кору, но при этом происходит ослабление разогрева или даже некоторое охлаждение недр, что ведет либо к прекращению геосинклинального процесса и переходу области к платформенному режиму, либо к перерыву в процессе. Следует при этом учесть, что на ранних этапах могли существовать в значительных количествах коротко живущие изотопы, которые могли вызвать подобный процесс в ряде мест, где после распада изотопов он остановился.

Здесь не место разбирать различные детали и варианты подобных схем. Отметим, однако, что они автоматически объясняют основную часть изостазии, примерное постоянство теплового потока на больших площадях, так как требуемые флуктуации в содержании радиоактивных элементов не превышают 5%. Они довольно хорошо объясняют и наблюдае-

мую разницу в уровне дна океанов и поверхности континентов. Современные подводные валы представляются при этом как области, недавно достигшие стадии активного процесса, с чем связан и их резко повышенный тепловой поток.

Наконец, если учесть, что сейчас из недр поступает около  $1 \text{ км}^3$  вещества в вулканических извержениях за год, то за 3 млрд. лет это даст как раз всю массу континентальной коры, а выделяющаяся при этом из магмы вода примерно составит как раз такое количество, которое нужно для заполнения океанов (с учетом некоторого количества ранее существовавшей воды).

Другой вариант гипотезы дифференциации считает, что первоначально по всей Земле выделилась кора континентального типа, но затем начался новый этап развития, когда части континентов стали превращаться в океаны за счет переработки континентальной коры в кору океаническую. Таким образом, современные океаны очень молоды (иногда считается, что Тихий океан не молодой, а очень древний).

Этот вариант гипотезы имеет свои достоинства главным образом с точки зрения геологических данных. Существенным, на наш взгляд, недостатком его является то, что не объяснено, как континентальная кора может превратиться в океаническую. Почему вода океанов выделилась в огромном количестве только на последних этапах и где она была раньше? В случае такого недавнего погружения дна океанов как объяснить их ничтожную сейсмичность?

В заключение необходимо опять подчеркнуть, что ни одна из гипотез развития Земли еще не объяснила всего огромного количества даже основных наблюдательных данных и не превратилась в теорию. Создание теории развития Земли должно быть делом ближайшего будущего. Весьма вероятно, что в нее войдут элементы разных гипотез путем синтеза, возможно, на новой основе.

На этом пути огромное значение приобретают исследования верхних частей оболочки Земли и ее соотношений с земной корой. Важность этой проблемы нашла свое отражение в том, что на последнем конгрессе Международного союза геодезии и геофизики по предложению советской делегации был принят «Проект верхней мантии», который ставит целью сосредоточить внимание ученых и научно-исследовательских организаций на решении этой проблемы. Соответственно должны быть выработаны согласованные направления исследований и проведена координация усилий, подобная той, которая столь успешно была проявлена в период Международного геофизического года.

---



## ЛИТЕРАТУРА

- «Вопросы внутреннего строения и развития Земли». Сборник. «Труды Геофизического института АН СССР», № 26, 1955.
- «Земная кора». Сборник. ИЛ, 1957.
- Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. Госгеолтехиздат, 1954.
- Белоусов В. В. Развитие земного шара и тектогенез. «Советская геология» № 7, 1960
- Вильсон Дж. Геофизика и рост континентов. «Природа» № 8, 1960.
- Гутенберг Б. и Рихтер К. Сейсмичность Земли. ИЛ., 1948.
- Комаров А. Г. Вековые движения полюсов Земли. «Природа» № 2, 1960.
- Косминская И. П. Строение земной коры по сейсмическим данным. «Бюллетень Московского общества испытателей природы». Отдел геологический, № 4, 1958.
- Кропоткин П. Н. Происхождение материков и океанов «Природа» № 4, 1956.
- Лазарев Г. Е. и Ушаков С. А. Земная кора Антарктиды. «Природа» № 12, 1960.
- Люстих Е. Н. Изостазия и изостатические гипотезы. «Труды Геофизического института АН СССР» № 38, 1957.
- Люстих Е. Н. Критика геотектонической контракционной гипотезы «Труды Института физики Земли АН СССР» № 3, 1958.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение Земли. «Природа» № 7, 1956.
- Магницкий В. А. К вопросу о происхождении и путях развития континентов и океанов. «Вопросы космогонии», т. 6, 1958.
- Магницкий В. А. О соотношении земной коры с веществом оболочки Земли по геофизическим данным. Доклады советских геологов. Международный геологический конгресс, 21-я сессия. «Структура земной коры и деформации горных пород».
- Мещеряков Ю. А. Современные движения земной коры. «Природа» № 9, 1958.
- Саваренский Е. Ф. Чилийские землетрясения., «Природа» № 9, 1960.
- Страхов Н. М. Типы климатической зональности в послепротерозойской истории Земли. «Известия АН СССР». Серия геологическая, № 3, 1960.
- Федоров Е. П. Изучение движения полюсов. «Природа» № 11, 1959.
- Федынский В. В. Геофизические данные о некоторых чертах строения и развития земной коры. Доклады советских геологов. Международный геологический конгресс. 22-я сессия. «Геологические результаты прикладной геохимии и геофизики», 1960.
- Хаин В. Е. Некоторые основные вопросы современной геотектоники. «Известия АН СССР». Серия геологическая, № 12, 1957.
- Шварцбах М. Климаты прошлого. ИЛ, 1955.
- Шмидт О. Ю. Четыре лекции о происхождении Земли. АН СССР, 1957.
- Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение. ИЛ, 1960.
- Магницкий В. А. Основы физики Земли. Геодизиздат, 1953.
- Саваренский Е. Ф. и Кирнос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. Гостехтеоретиздат, 1955.
- Страхов Н. М. Основы исторической геологии, т. 1 и 2. Госгеолиздат. 1948
- Яновский Б. М. Земной магнетизм. Гостехтеоретиздат, 1953.
- «Физика и химия Земли». Сборник. ИЛ, 1958.
- «Строение земной коры по сейсмическим данным». Сборник. ИЛ, 1959.
- Виноградов А. П. О происхождении вещества земной коры. «Геохимия». № 1, 1961.

ПОМНИТЕ,  
**ЧТО СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ  
ЗНАЧИТЕЛЬНО ПОВЫШЕНЫ!**

**ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОЕЗДА  
НЕ СТОЙТЕ В ТАМБУРАХ  
И НЕ ОТКРЫВАЙТЕ ДВЕРИ ВАГОНА.**

СОБЛЮДАЙТЕ ЛИЧНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ!  
**КОГДА НАХОДИТЕСЬ НА ТЕРРИТОРИИ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, БУДЬТЕ ВНИМАТЕЛЬНЫ  
И ОСТОРОЖНЫ.**

**НЕ ХОДИТЕ ПО ПУТЯМ,  
НЕ ПЕРЕБЕГАЙТЕ ПУТИ  
ПЕРЕД БЛИЗКО ИДУЩИМ ПОЕЗДОМ.**

*Министерство  
путей сообщения*