

---

# ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

---

*Профессор В. А. Магницкий*



Внутреннее строение нашей планеты — одна из крупнейших проблем современного естествознания. Она еще далека от решения, однако успехи науки за последние десятилетия позволили весьма значительно пополнить наши знания в этой области.

Важность раскрытия внутреннего строения Земли и путей ее развития определяется двумя существенными моментами.

Во-первых, с этой проблемой связаны вопросы развития самой внешней из твердых оболочек земного шара — земной коры. Сейчас мы знаем, что ее формирование происходит на всем протяжении развития Земли, что земная кора является продуктом физических и физико-химических процессов, протекавших и протекающих в глубоких недрах нашей планеты. Знать, как развивается земная кора, совершенно необходимо для прогноза месторождений полезных ископаемых, прогноза землетрясений и сейсмического районирования, для изучения медленных движений земной коры, которые оказывают большое влияние на практическую деятельность человека (всем известны примеры опускания берегов Голландии, вынуждающего строить защитные плотины; отступления моря и осушения портов), наконец, очевидна важность учета этих движений для гидротехнического строительства.

Во-вторых, с проблемой внутреннего строения Земли связан один из крупнейших мировоззренческих вопросов — вопрос о происхождении Земли и других планет. Именно успехи планетной космогонии последнего десятилетия позволили по-новому подойти к исследованию развития и строения Земли. Но и сами данные о строении и развитии Земли в сопоставлении с данными о строении других планет способствуют решению космогонических задач.

Под строением Земли мы будем понимать не только «архитектурную» схему строения, но и химический состав, физическое состояние и свойства земного вещества. Только в слабой степени мы коснемся некоторых физических и физико-химических процессов, протекающих в недрах земного шара.

Сложность проблемы и неполная ее изученность делают необходимым в ряде случаев указывать на спорность решения того или иного вопроса и указывать на существование различных точек зрения.

## МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ

Внутреннее строение Земли изучает геофизика, основными частями которой являются: сейсмология и сейсмометрия, геотермика, учение о земном магнетизме, гравиметрия и теория фигуры Земли, а также та обобщающая теоретическая часть, ко-

торая обычно называется физикой Земли. Геофизика лежит на стыке геологии и физики, геохимии и космогонии. Трудности, стоящие перед геофизикой, велики. Они заключаются в комплексности проблемы, в невозможности непосредственных наблюдений на больших глубинах; результаты же наблюдений, выполненных вблизи земной поверхности, как правило, могут истолковываться по-разному при использовании их для изучения строения больших глубин. Высокие температуры и давления внутри Земли могут привести к образованию пока не известных или плохо изученных соединений или состояний вещества, что усугубляет сложность проблемы. К сказанному можно добавить, что сейчас еще нельзя воспроизвести в лаборатории условия, господствующие на глубинах в несколько сот километров, а применение методов теоретической физики при изучении больших глубин Земли встречает специфические трудности. Тем не менее, мы уже сейчас, благодаря успехам сейсмологии, можем утверждать, что общий план строения Земли, ее разделения на оболочки известен нам в главных чертах достаточно надежно.

Одна из задач сейсмологии — изучение упругих колебаний, возникающих при землетрясениях и распространяющихся в теле Земли. Эти колебания называются сейсмическими волнами. Существуют два основных типа волн — продольные  $P$  и поперечные  $S$ . Продольные волны, возникающие в твердом теле, представляют собой распространяющиеся в теле последовательные сжатия и разрежения, при которых частицы колеблются в направлении распространения волны; они вполне аналогичны обыкновенным звуковым волнам. Поперечные волны — это распростра-

няющиеся в теле Земли деформации, при которых основное колебание частиц происходит перпендикулярно направлению распространения волны. Других видов волн мы не будем касаться, как мало существенных с точки зрения нашей задачи.

К распространению обоих типов волн вполне применимы законы преломления и отражения, известные из геометрической оптики, если по аналогии с оптикой ввести понятие сейсмического луча как линии, вдоль которой распространяются сейсмические колебания. Пусть на рис. 1 линия  $AB$  представляет собой границу раздела двух сред. В верхней среде скорости волн обозначим через  $v_p$  и  $v_s$ , скорости волн в нижней среде пусть будут  $v_p^1$  и  $v_s^1$ , тогда будем иметь соотношение:

$$\frac{\sin i_{p,s}}{\sin e_{p,s}} = \frac{v_{p,s}}{v'_{p,s}}$$

Отличием от оптики будет лишь то, что каждый сейсмический луч, падающий на границу раздела, будет порождать два преломленных и два отраженных луча (продольный и поперечный).

Расположенные по всей поверхности Земли сейсмические станции записывают при помощи особых приборов — сейсмографов — приход сейсмических волн, возникающих при землетрясениях. При этом фиксируются не только прямые волны, пришедшие непосредственно от очага землетрясения, но и волны, испытавшие преломления или отражения на внутренних границах раздела сред с различными скоростями. Таким образом, возникает возможность установить внутри Земли некоторые границы, отделяющие различные оболочки земного шара. На рис. 2 приведена схема разделения Земли на основные

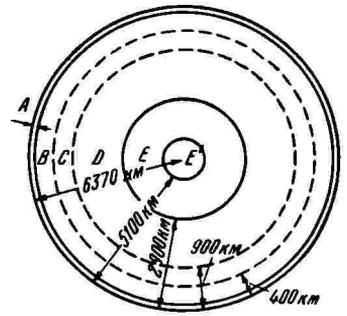


Рис. 2. Схема строения Земли по данным сейсмологии

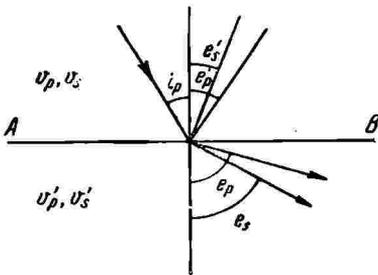


Рис. 1. Отражение и преломление сейсмических волн.  $i$  — угол падения;  $e'$  — угол отражения;  $e$  — угол преломления

оболочки по сейсмическим данным. Слой *A*, самый внешний, называется земной корой, он в разных местах имеет различную толщину — от нескольких километров до нескольких десятков километров. На его строении мы остановимся ниже с большей подробностью. Слои *B*, *C* и *D* объединяются общим названием оболочки Земли, при этом слой *C*, характеризующийся хотя и плавным, но очень быстрым возрастанием  $v_p$  и  $v_s$ , выделяется в особый переходный слой. Слой *E* называется ядром Земли, а центральное ядрышко *E'* — внутренним ядром Земли, его существование установлено сравнительно недавно.

К сказанному надо добавить, что еще не так давно сейсмологи считали, что, помимо перечисленных, внутри Земли есть еще ряд других границ, на которых свойства вещества Земли меняются скачком. Такие границы устанавливались, например, на глубинах 1200, 1700, 2450 км. Однако пересмотр сейсмических данных, предпринятый в последнее время, показал малую обоснованность установления этих границ; более строгий анализ результатов наблюдений позволил установить, что строение Земли более однородно, чем предполагалось. Сейчас сейсмологи считают, что из всех границ внутри оболочки, возможно, реально существует лишь граница на глубине около 900 км.

На рис. 3 дан график изменения  $v_p$  и  $v_s$  с глубиной, начиная с 100 км. Скорости на меньших глубинах будут рассмотрены ниже. На рис. 3 ясно видно особое поведение скоростей  $v_p$  и  $v_s$  в переходном слое *C*, указывающее на особые свойства этого слоя. Следует обратить внимание и на границу ядра. Здесь скорости  $v_p$  резко, скачком уменьшаются, а волны *S*, видимо, совсем через ядро не проходят, хотя есть указания на то, что во внутреннем ядре эти волны появляются вновь.

Скорости сейсмических волн  $v_p$  и  $v_s$  зависят от механических свойств среды, в которой они распространяются. Такими механическими характеристиками среды являются: а) ее плотность  $\rho$ , б) ее модуль сжатия  $K$ , под которым понимается коэффициент пропорциональности между приращением давления и возникающим в результате этого относительным изменением объема или плотности тела (при сохранении

подобия его формы), в) ее модуль твердости  $\mu$ , под которым понимают коэффициент пропорциональности между силой, вызывающей искажение формы тела, и величиной этого искажения (искажение формы характеризуется изменением углов). Подчеркнем, что модуль твердости идеальной жидкости равен нулю, так как такая жидкость без сопротивления принимает форму вмещающего ее сосуда. Таким образом, скорости сейсмических волн могут быть использованы для изучения механических свойств вещества различных оболочек Земли.

Установив факт расслоения Земли на оболочки и определив скорости распространения сейсмических волн в каждой из них, сейсмология этим еще не решила вопроса о причинах такого расслоения, о характере процессов, создавших современную структуру земного шара. Между тем эти вопросы имеют первостепенное значение как для космогонии, так и для геологии.

В настоящее время имеется два основных варианта объяснения различий между оболочками Земли: 1) оболочки отличаются одна от другой по химическому составу; 2) оно обусловлено неодинаковым фазовым состоянием их вещества (аморфное, кристаллическое, различные кристаллические модификации). Возможно и некоторое сочетание этих факторов.

Две основные гипотезы существуют и для объяснения причин такого расслоения. Первая гипотеза предполагает, что оболочки возникли путем разделения вещества планеты по удельному весу в период, когда Земля была в расплавленном состоянии. Согласно этой гипотезе, оболочки отличаются одна от другой главным образом по химическому составу. Вторая гипотеза предполагает, что различие температур и давлений на разных глубинах внутри Земли привело к расслоению по фазовому состоянию. Эта гипотеза не объяс-

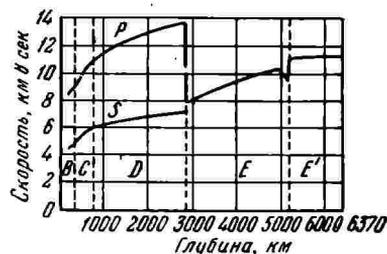


Рис. 3. График зависимости скорости распространения сейсмических волн от глубины

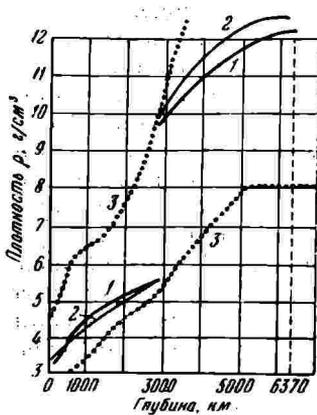


Рис. 4. График зависимости плотности Земли от глубины. 1 — по данным Буллена; 2 — по данным Молоденского; 3 — верхний и нижний пределы плотности по данным Молоденского

ми признаками, такими, как плотность, модуль сжатия, модуль твердости, вязкость, электропроводность. Физическое состояние вещества определяется давлением и температурой, которые и должны быть получены для различных глубин, чтобы можно было судить о состоянии вещества соответствующих оболочек.

Таким образом, прежде чем приступить к рассмотрению оболочек земного шара, мы должны привести сведения о тех значениях перечисленных величин, которые они принимают внутри земного шара.

Для определения плотности, модуля сжатия и модуля твердости можно было бы воспользоваться скоростями сейсмических волн  $v_p$  и  $v_s$ . К сожалению, эти механические характеристики входят в выражения для  $v_p$  и  $v_s$  таким образом, что можно определить только отношения упомянутых величин, но не каждую величину в отдельности. Для того чтобы обойти эту трудность, обычно сначала определяют плотность, привлекая для этого дополнительные данные. В качестве таковых берут массу Земли  $M$  (которая определяется из измерений силы тяжести), момент инерции Земли  $I$  (вычисляемый из астрономических наблюдений в комбинации с данными по измерениям силы тяжести) и плотность верх-

зательно предполагает, что Земля прошла через стадию расплавленного состояния, хотя и не исключает такой возможности. Конечно, допустимо и некоторое сочетание этих гипотез.

Мы не можем непосредственно судить о химическом составе и физическом состоянии вещества земных оболочек (кроме самых верхних частей земной коры). Для решения этих вопросов мы пользуемся косвенны-

ми слоев Земли  $\rho_0$  (измеряемая непосредственно). Однако этих данных недостаточно для однозначного определения закона изменения плотности внутри Земли, поэтому различными учеными в разное время были получены неодинаковые выражения для закона распределения плотности. Впервые научно обоснованное для своего времени распределение плотности получил в XVIII в. Лежандр. Однако в настоящее время закон Лежандра имеет главным образом лишь историческое значение, так как он был получен без учета скоростей сейсмических волн, которые в то время были еще не известны.

Наибольшее внимания заслуживают законы, полученные с учетом  $v_p$  и  $v_s$ , из них на рис. 4 мы приводим два наиболее интересных: закон, полученный Булленом, и закон, полученный М. С. Молоденским. Закон Буллена соответствует случаю, когда плотность увеличивается с глубиной только благодаря росту давления. Исключения составляют лишь граница ядра, где плотность возрастает скачком, и переходный слой  $C$ , где она растет хотя и непрерывно, но быстрее, чем под действием одного давления. Эти отступления для хода изменения плотности были сделаны в соответствии с сейсмическими данными для того, чтобы получить правильное значение для момента инерции Земли.

Вывод Молоденского учитывал в качестве дополнительных данных еще результаты наблюдений за колебаниями земных полюсов и за приливами в теле Земли. Кроме того, что особенно важно, М. С. Молоденским были установлены верхний и нижний пределы для возможных значений плотности на каждой глубине. Соответствующие кривые также приведены на рис. 4, при этом верхняя граница для больших глубин не дана, так как она там теряет смысл. Очевидно, что истинный закон плотности должен находиться между этими пределами, которые характеризуют тем самым степень неопределенности наших знаний. Зная плотность, мы можем легко рассчитать и давление внутри Земли. В табл. 1 приведены значения давления на различных глубинах, рассчитанные в соответствии с законом плотности по Буллену.

Таблица 1

Глубина в км	Давление в атм	Глубина в км	Давление в атм
100	31.10 <sup>3</sup>	2200	990.10 <sup>3</sup>
300	100.10 <sup>3</sup>	2900	1370.10 <sup>3</sup>
600	213.10 <sup>3</sup>	3600	2030.10 <sup>3</sup>
900	346.10 <sup>3</sup>	5000	3120.10 <sup>3</sup>
1600	680.10 <sup>3</sup>	6370	3510.10 <sup>3</sup>

Таким образом, давление на границе ядра достигает почти полутора миллионов атмосфер. Это давление столь велико, что его затруднительно воспроизвести экспериментально. С другой стороны, оно еще не достаточно велико, чтобы успешно применять методы статистической теории атома, как это уже с успехом делается для исследования строения звезд, внутри которых давления громадны.

Наконец, знание плотности позволяет определить и значение модуля сжатия  $K$  и модуля твердости  $\mu$  внутри Земли. Значения  $K$  и  $\mu$  приведены в виде графиков на рис. 5.

Переходя к вопросу о температуре в глубоких частях Земли, мы должны отметить, что наши знания здесь еще более ограничены. Нам известны достаточно хорошо лишь следующие данные: а) тепловой поток  $Q$  через поверхность Земли (количество тепла, протекающее в 1 сек. через 1 см<sup>2</sup> земной поверхности из недр Земли наружу); значения  $Q$  как на континентах, так и на океанах примерно одинаковы и близки к  $1,2 \cdot 10^{-6}$  кал/см<sup>2</sup>сек; б) температура лав, извергаемых вулканами, близка в среднем к 1200°С; в) температура плавления важнейших изверженных пород при не слишком больших давлениях; г) наконец, известно содержание радиоактивных элементов в горных породах земной коры и в метеоритах. В табл. 2

Таблица 2

Порода	Граниты	Базальты	Ультра-основные	Каменные метеориты	Железные метеориты
Выделение тепла в $10^{-13}$ кал, см <sup>3</sup> сек	5,3	1,5	0,04	0,1	0,03

приведено количество тепла, выделяемое важнейшими типами горных пород за счет превращений содержащихся в них радиоактивных элементов.

Зная величину теплового потока и теплопроводность пород земной коры, можно легко получить величину геотермической ступени, т. е. интервал глубины, на котором температура повышается на 1°. В среднем для коры эта ступень равна приблизительно 100 м. Если, кроме того, учесть изменение геотермической ступени с глубиной, то получим, что на глубине в 100 км температура должна быть около 1300°С.

Исходя из температуры лав и температуры плавления горных пород, получаем для глубины около 100 км (первичные очаги питания вулканов лежат, по сейсмическим данным, на глубинах от 60 до 150 км) температуру около 1400—1500°С. Наконец, можно рассчитать температуру на глубине в 100 км теоретически, исходя из помещенных в табл. 2 данных о выделении горными породами радиогенного тепла. При расчете температур для глубины не более 100 км довольно безразлично, какое состояние для Земли брать за начальное, если ее возраст незначительно меньше, чем  $5 \cdot 10^9$  лет. Решая таким образом уравнение теплопроводности, получаем для глубины 100 км температуру в 1200°С. Итак, тремя независимыми путями для глубины 100 км получается температура около 1300°С. Можно считать с большой вероятностью, что в разных областях земного шара на этой глубине температура несколько различна, но вряд ли выходит за пределы 900—1500°С.

Что касается температуры на больших глубинах, то по этому вопросу можно высказать лишь самые грубые соображения. Понятно, что каков бы ни был путь образования Земли, ее вещество на глубине должно быть сжато под давлением выше-

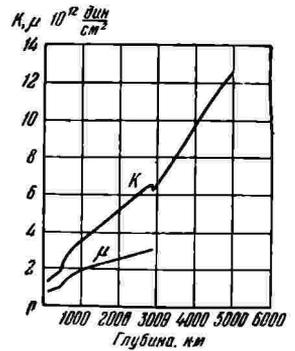


Рис. 5. Модуль сжатия  $K$  и модуль твердости  $\mu$  внутри Земли

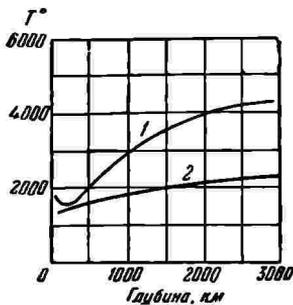


Рис. 6. График температуры в оболочке Земли. 1 — температура плавления; 2 — адиабатическая температура

энт. Этот градиент может быть рассчитан по сейсмическим данным; такой расчет был выполнен Валлэ. Но поскольку рассчитать можно не самую температуру, а лишь ее градиент, т. е. приращение температуры, возникает вопрос, какую температуру и на какой глубине взять за исходную. Обычно исходят из температуры на глубине порядка 100 км, которая получена ранее описанным путем, и к ней придают приращение, определенное по адиабатическому градиенту. Однако такой прием справедлив только в том случае, если вещество глубже 100 км перемешано конвекцией и приведено таким образом в состояние теплового равновесия, что, в сущности, является ничем не доказанной гипотезой. На рис. 6 приведена кривая температуры, полученная по данным Валлэ упомянутым методом.

В качестве верхней границы можно было бы принять температуру плавления, так как оболочка Земли твердая в том смысле, что, согласно сейсмическим данным, через нее проходят поперечные волны. Кривая температуры плавления приводится на рис. 6 с некоторыми исправлениями по сравнению с ранее опубликованной.

Однако надо подчеркнуть, что поперечные волны могут проходить и через вещество в аморфном, стекловидном состоянии, если оно находится при температуре ниже температуры разжижения, т. е. температуры, при которой начинает резко падать вязкость стекла и оно приобретает текучесть. При высоких давлениях эта

лежащих толщ. А так как теплопроводность горных пород мала, то это сжатие должно было происходить практически без притока тепла извне и без потерь его, т. е. адиабатически. При этом чем более сжато вещество, тем сильнее оно будет разогрето, и в недрах Земли должны наблюдаться, по крайней мере, адиабатический температурный градиент.

температура может быть больше температуры плавления на 10—20%. Таким образом, действительная температура на больших глубинах с большой долей вероятности лежит между пределами, приведенными на рис. 6, но, строго говоря, не исключена возможность, что она может несколько выйти за эти границы.

К оценке температуры на больших глубинах можно подойти и еще одним путем. Изучение вариаций магнитного поля Земли позволило определить электропроводность вещества оболочки на различных глубинах. Можно показать, что такая электропроводность возможна у силикатов, из которых, как обычно считают, состоит оболочка Земли при температурах не ниже 1500°C. Однако если оболочка содержит заметную примесь окислов железа, то паблюдаемая электропроводность может иметь место и при более низких температурах.

Что касается ядра Земли, то обычно считают, что температура в нем мало зависит от глубины.

#### ЯДРО ЗЕМЛИ

Рассмотрение строения, свойств и состава главных оболочек Земли мы начнем с земного ядра. Существование у Земли ядра, резко отличающегося по своим свойствам от вышележащей оболочки, было впервые доказано сейсмологией. В настоящее время существуют две основные гипотезы о составе ядра и способе его образования: гипотеза железо-никелевого ядра и гипотеза фазового перехода под действием больших давлений. Первая по времени гипотеза основывалась на представлении, что первоначально Земля была в «огненно-жидком» состоянии. При этом казалось естественным, что ядро, как и другие оболочки, возникло в ходе процесса дифференциации вещества Земли на металлическое, железо-никелевое ядро и каменную оболочку, наподобие того, как происходит процесс расслоения в доменной печи. Кроме указанной аналогии, в пользу гипотезы о железном ядре приводились и такие аргументы: плотность ядра довольно близка к той, которую имело бы железо при соответствующем давлении (долгое время это был один из решающих аргументов), магнитное поле Земли связывалось с намагни-

ченностью железного ядра; существование железных метеоритов, которые считались обломками ядра распавшейся планеты, также свидетельствовало в пользу этой гипотезы.

Недавно осуществленные исследования М. С. Молоденского, основанные на наблюдениях за колебаниями полюсов и за приливами в теле Земли, и исследования Е. Ф. Саваренским характера отражения сейсмических волн от поверхности ядра, показали, что модуль твердости в ядре в десятки и даже сотни раз меньше, чем в оболочке, и, весьма вероятно, близок к нулю. Таким образом, ядро Земли находится в состоянии, близком к обычно понимаемому как жидкое. Это объясняет давно известный факт, что поперечные волны не проходят через ядро. Возможность существования расплавленного ядра при твердом состоянии оболочки и, видимо, твердом же внутреннем ядре недавно получила объяснение. Джекобс указал, что температура плавления железа гораздо ниже температуры плавления для пород оболочки (см. рис. 6). С другой стороны, адиабатический градиент в расплавленном железном ядре меньше, чем градиент температуры плавления, что объясняет затверждение внутреннего ядра, которое, согласно этой гипотезе, отличается от внешней части ядра уже не только своим составом, но и фазовым состоянием (рис. 7).

Однако в последние годы гипотеза о железном составе ядра сталкивается с рядом трудно преодолимых возражений. Не понятен при ближайшем рассмотрении сам процесс дифференциации по удельному весу. Дело в том, что при больших давлениях внутри Земли вязкость вещества столь велика, что для дифференциации не хватило бы всего времени существования Земли. Во внутреннем же ядре вообще говорить о какой-либо гравитационной дифференциации не имеет смысла, так как там сила тяжести близка к нулю. По сейсмическим данным, границы ядра и оболочки и внутреннего ядра очень четкие, резкие, что нелегко объяснить с точки зрения процесса дифференциации. Много данных говорит в пользу того, что предположение о жидкой стадии существования Земли мало правдоподобно. Наконец, сопоставление средней плотности Земли

$\rho_m = 5,52 \text{ г/см}^3$  со средними плотностями других планет земной группы приводит к выводу, что только Венера имеет плотное ядро, Марс же и Луна такого не имеют и вообще состоят из более легкого материала. Таким образом, надо предположить существование мало понятной разницы в составе планет земной группы.

Сейчас все более обращает на себя внимание другая гипотеза о строении ядра. Еще в 1939 г. В. Н. Лодочников выдвинул такое предположение: большая плотность ядра Земли вызвана тем, что под влиянием больших давлений разрушаются электронные оболочки (по крайней мере, самая внешняя) некоторых атомов, при этом происходит сближение ядер атомов, что ведет к резкому увеличению плотности вещества. В дальнейшем эта мысль, видимо независимо, была более подробно развита Рамсеем, который объяснил этот переход известным из физики явлением перехода вещества в металлическую фазу (например, желтый фосфор переходит при высоком давлении в металлический черный фосфор, и др.). При этом происходит не только значительное увеличение плотности, но «высвободившиеся» электроны придают веществу такие типичные свойства металлов, как высокая (металлическая) электропроводность и теплопроводность. Рамсей показал, что при давлении, господствующем на границе ядра, такой переход не противоречит основным физическим соотношениям. К сожалению, большая сложность расчетов не позволила до сих пор строго доказать, что подобный переход неизбежен на данной глубине. Эта гипотеза устраняет основные из ранее отмеченных трудностей. Граница ядра резкая, так как фазовый переход совершается сразу по достижении критического давления. У Луны и Марса нет плотного ядра, так как давление в их центре далеко не достигает  $1400 \cdot 10^3 \text{ атм}$ , и только Венера имеет ядро, так как в ее недрах достигается

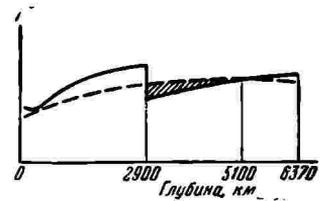


Рис. 7. Область возможного расплавления ядра по Джекобсу (адаптировано). Сплошная кривая — температура плавления; пунктир — предполагаемая температура Земли

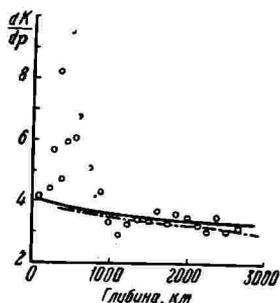


Рис. 8. Сравнение теоретических и экспериментальных значений  $\frac{dK}{d\rho}$ ;

○○○○ экспериментальные значения; — теоретическая кривая по Бёрыу; ---- теоретическая кривая по Магницкому

и ненормально высокая плотность маленького Меркурия.

Как уже упоминалось, с земным ядром связывается обычно и происхождение магнитного поля Земли и его вековых вариаций. Однако вопрос этот еще далеко не ясен, намечаются лишь первые надежды на создание теории. Магнитное поле связывают с процессами в жидком ядре, при которых возникают токи. Но сама возможность существования таких процессов надежно не доказана, здесь предстоит еще большая работа.

В заключение подчеркнем, что в настоящее время еще нет решительных оснований для окончательного отбрасывания какой-либо из упомянутых гипотез. Опровержение одной из них пролило бы свет на процесс образования Земли и на пути ее развития. Конечно гипотеза Лодочникова — Рамсея не исключает прохождения Земли через стадию расплавления, но естественнее она связывается с гипотезой «холодного» происхождения Земли. Железный же состав ядра тесно связан с гипотезой расплавленного состояния, а следовательно, последующего остывания Земли, что определяет и путь ее дальнейшего геологического развития.

### ОБОЛОЧКА ЗЕМЛИ

Оболочка Земли изучена относительно больше, чем ядро, однако и здесь еще остается ряд нерешенных или невыясненных

нужное давление. Отпадают все трудности, связанные с медленностью дифференциации. Скачок свойств на границе внутреннего ядра, естественно, объясняется следующим фазовым переходом. Для ядра сохраняются все требуемые свойства металла, а следовательно, и возможность объяснения земного магнетизма. Остается, в сущности, не объясненным лишь происхождение железных метеоритов

до конца вопросов. Выше было указано, что сейсмические данные и сопоставление температуры плавления с вероятными температурами в оболочке приводят к выводу, что вещество оболочки находится в твердом состоянии. Модуль твердости оболочки в среднем равен  $2 \cdot 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>, что в 2—3 раза больше, чем для лучших сортов стали.

Состав верхних частей оболочки можно определить, сопоставляя скорости сейсмических волн со скоростями, полученными экспериментально для различных горных пород при соответствующих давлениях. Сейчас признается, что состав верхней части оболочки близок к перидотитам и отчасти пироксенитам (породы, состоящие в основном из силикатов  $(Mg, Fe)_2SiO_4$  и  $(Mg, Fe)SiO_3$ , с незначительной примесью других соединений). Знаменательно, что примерно тот же состав имеют и каменные метеориты. Ряд исследователей (И. Н. Кропоткин, Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, Верхоген, Пауэрс) указывают, что выплавляемая из такой оболочки магма, должна иметь базальтовый состав, а это хорошо согласуется с геологическими данными. Следует отметить, что и получаемая при этом плотность  $3,3-3,4$  г/см<sup>3</sup> вполне согласуется с ранее приведенными теоретическими значениями для верхних частей оболочки.

Для больших глубин прямые сравнения затруднительны, так как при условиях, господствующих на этих глубинах, пока не удалось получить экспериментально скорости распространения упругих колебаний в образцах соответствующих пород.

Для суждения о строении глубоких частей оболочки можно воспользоваться тем, что по скоростям сейсмических волн  $v_p$  и  $v_s$  можно для каждой глубины определить отношение модуля сжатия  $K$  к плотности  $\rho$ , а также отношение приращения модуля сжатия  $\Delta K$  к приращению давления  $\Delta P$ . Эти же величины можно вычислять для наиболее интересных соединений при помощи формул, выведенных в теории твердого тела. Автором было проделано сопоставление  $\frac{\Delta K}{\Delta P}$  и  $\frac{K}{\rho}$ , полученных по сейсмическим данным, с их теоретическими значениями. На рис. 8 дано сравнение для  $\frac{dK}{d\rho}$ ,



Поверхностью Мохоровичича называется сейсмическая граница, при переходе через которую скорость продольных волн возрастает скачком до величины 8 км/сек, выше нее эта скорость всегда значительно меньше. Граница Мохоровичича очень четкая и практически наблюдается всюду.

Сейсмические исследования последних лет с определенностью устанавливают, что сейчас на Земле существуют два главных типа земной коры: континентальный и океанический.

Континентальный тип коры характеризуется толщиной (мощностью) в среднем 30—40 км. Сейсмические исследования в разных частях земной коры, в том числе работы по глубинному сейсмическому зондированию, были выполнены по методу и под руководством акад. Г. А. Гамбургцева и показали, что толщина земной коры под многими горными сооружениями значительно увеличивается, достигая 70—80 км. Континентальная земная кора, в свою очередь, распадается на ряд слоев, число и мощность которых варьируют от района к району. Обычно выделяют два главных слоя: верхний — гранитный и нижний — базальтовый, названные так по преобладающему в них типу горных пород. Толщина этих слоев в среднем 15—20 км. Впрочем, в последнее время появляется все больше данных о том, что такое четкое разграничение на два слоя очень условно. Во многих местах не удается установить существование границы между «гранитным» и «базальтовыми» слоями. Высказывается предположение, что состав коры меняется с глубиной довольно постепенно.

Океанический тип коры характеризуется малой толщиной (5—8 км), по составу он близок к низам базальтового слоя континентов, т. е., видимо, слагается обогащенными оливином базальтами. Не следует думать, что этот тип коры присущ всем океанам в их географическом понимании. Он характерен для частей океанов с дном на глубинах около 4000 м и более. На территории всех океанов есть области, где кора имеет строение континентального или промежуточного типа. Это, прежде всего, подводные возвышенности типа Среднеатлантического вала или Кокосового хребта в Тихом океане.

Дно окраинных (Охотское, Северное)

и внутренних морей сложено также корой континентального или промежуточного типа. Все эти выводы согласуются с результатами измерений ускорения силы тяжести на континентах и океанах. Сила тяжести на континентальных равнинах и обширных пространствах океанов оказалась примерно одинаковой, что возможно только в том случае, если недостаток масс в океанических впадинах, заполненных водой с плотностью 1,03 г/см<sup>3</sup> (плотность горных пород континентов 2,7 г/см<sup>3</sup>), возмещается меньшей толщиной коры, ее повышенной плотностью и приближением к поверхности более плотных подкорковых масс. Это и подтверждается сейсмическими данными.

Таким образом, создается впечатление, что земная кора как бы плавает в подстилающей ее более плотной среде, как в воде плавает плот, когда более выступающим над водой бревнам соответствует их большая подводная часть или их меньшая плотность. Однако эта аналогия довольно формальна, вряд ли можно говорить о действительном плавании земной коры. Происхождение этого явления, как увидим ниже, в основном, видимо, иное. Само оно получило название явления изостатического равновесия, или компенсации, справедливо оно лишь для больших участков земной коры, да и то не строго<sup>1</sup>. Во многих местах это состояние резко нарушается. Наиболее интересной областью таких нарушений являются сравнительно узкие (200—300 км), но длинные (тысячи километров) полосы резкого дефекта силы тяжести. Они протягиваются над глубоководными рвами или параллельно им, что характерно для окраин Тихого океана, Индонезии и некоторых других районов. Глубоководные рвы — очень молодые образования, они и параллельные им островные дуги отличаются высокой сейсмичностью; здесь именно сосредоточено большинство землетрясений земного шара. Все это указывает на высокую тектоническую активность рассматриваемых областей, здесь идут в настоящее время процессы активной перестройки структуры земной коры. Такие подвижные, активные области с развитым вулканизмом называются геосинклинальными областями.

<sup>1</sup> Не следует смешивать явление компенсации с гипотезами изостатической компенсации, которые пытаются объяснить это явление.

Процессы активной перестройки захватывают значительные глубины, очаги землетрясений здесь достигают глубин 300—400 км. К данным областям тяготеют и более глубокие землетрясения с глубиной очагов до 700 км, но связь их с упомянутыми процессами более проблематична и имеет, видимо, косвенный характер.

Проблема происхождения двух типов земной коры еще не решена полностью. Среди геофизиков и геологов по этому вопросу имеются существенно различные точки зрения. Однако ранее распространенное мнение, что легкая кора, богатая кремнеземом  $\text{SiO}_2$  и алюминием, выделилась путем гравитационной дифференциации на стадии еще расплавленной Земли, теперь считается весьма сомнительным. Дело в том, что, согласно этой гипотезе, земная кора первоначально должна была быть однотипной по всей земной поверхности. Для объяснения возникновения океанического типа коры надо предположить, что с областей, занятых теперь океанами, легкая гранитно-базальтовая кора была удалена и сконцентрирована на территории современных континентов. Не говоря уже о том, что причины такого процесса совсем не ясны, само предположение противоречит некоторым фактам наблюдений. Например установлено, что тепловой поток на океанах и континентах примерно одинаков, а между тем, если справедлива эта гипотеза, то тепловой поток на континентах должен был быть в два раза больше, чем на океанах, так как выделение радиогенного тепла в коре, ранее равномерное для всей земной поверхности, затем оказалось сконцентрированным лишь в континентальной части.

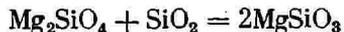
Можно сделать и другое предположение: кора в областях океанических была опять поглощена оболочкой. Однако процесс этот совершенно непонятен с физической точки зрения. Как мог более легкий материал, который ранее естественно всплыл вверх, потонуть затем в более плотной среде? Имеется и ряд других возражений.

Сейчас можно считать установленным, что земная кора выделилась из оболочки Земли постепенно в течение всей длительной истории нашей планеты, и процесс этот еще продолжается. Также ясно, что основные типы земной коры возникли там,

где они и сейчас территориально расположены.

Исходя из наших сведений о строении Земли, можно попытаться высказать следующий вариант объяснения происхождения двух основных типов земной коры, причем необходимо особенно подчеркнуть, что это только предположение, к которому следует относиться с большой осторожностью и критичностью. Только дальнейшие исследования покажут, что в нем ошибочно и что верно.

На рис. 10 дана кривая, показывающая изменение теплоты перехода для реакции:



в зависимости от изменения давления с глубиной (кривая приближенная, так как не учитывает изменения температуры). Поскольку при разогреве реакция идет с поглощением энергии, то, как видно из рисунка, на глубинах больше 500 км устойчивым будет  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , выше же он будет метастабилен, а устойчивым будет  $\text{MgSiO}_3$ . При повышении температуры  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  становится стабильным на все меньших глубинах. При  $1557^\circ\text{C}$   $\text{MgSiO}_3$  плавится уже при атмосферном давлении с выпадением твердого  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  и образованием расплава, обогащенного  $\text{SiO}_2$ . Если  $\text{SiO}_2$  удалять, то реакция распада  $\text{MgSiO}_3$  пойдет до конца. Однако исследования показывают, что вышеприведенная реакция идет в ту или иную сторону в зависимости от избытка или недостатка  $\text{SiO}_2$  с заметной скоростью уже при гораздо меньшей температуре.

Большинство исследователей считает сейчас, что Земля возникла в виде сравнительно холодного тела и затем разогревалась главным образом за счет выделения радиогенного тепла. Поскольку оболочка Земли не могла быть совершенно однородной, в ней появились области несколько более быстрого разогрева благодаря повышенной концентрации радиоактивных элементов. В этих областях реакция приобрела заметную скорость раньше, чем в дру-

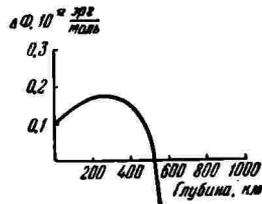


Рис. 10. График изменения теплоты перехода  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{MgSiO}_3$  с глубиной

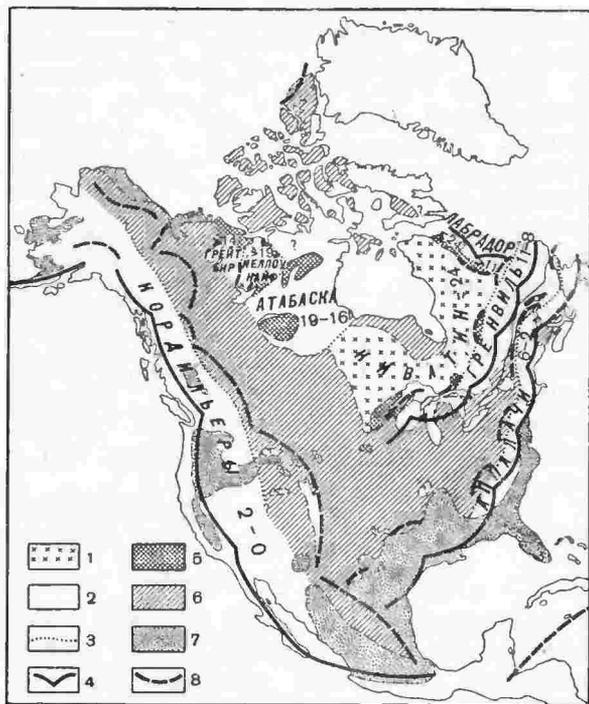


Рис. 11. Схема развития Северо-Американской платформы по Вильсону. Первичные орогенические провинции: 1 — зеленокаменные ядра, 2 — другие провинции, 3 — границы провинций, 4 — первичные дуги; вторичный покров: 5 — протерозой, 6 — палеозой, 7 — мезо-кайнозой, 8 — вторичная дуга.

Цифры — возраст в сотнях миллионов лет

гих частях оболочки. Так как  $\text{SiO}_2$  обладает пониженной плотностью, то его избыток стал, естественно, постепенно уходить вверх, обедняя кремнеземом оболочку и тем способствуя дальнейшему течению реакции. Верхняя же часть оболочки при этом обогащалась кремнеземом. Одновременно, видимо, шла миграция вверх и некоторого количества алюминия. Этот процесс и вел к образованию сначала базальтового, а затем и гранитного слоев коры, причем в образовании гранитного слоя также значительную роль играли и процессы эрозии, осадконакопления и ряд других факторов. С такой точки зрения области современных океанов — это участки Земли, отставшие в своем развитии от общего процесса изменения оболочки благодаря несколько более медленному разогреву. Конечно, и тут процесс идет, но медленно,

и, как показывают сейсмические данные, здесь успел сформироваться только тонкий базальтовый слой. Должны существовать и промежуточные случаи, что и наблюдается в действительности. Подсчеты показывают, что происходящее в описываемом процессе изменение объема действительно должно было создать разность уровней дна океанов и поверхности континентов в 4—5 км, что и наблюдается на самом деле.

Намеченная схема развития земной коры не противоречит и основным выводам геологии о характере процесса формирования континентальных платформ. Геологами был давно подмечен факт постепенного разрастания платформ от одного, а чаще нескольких первичных ядер или центров стабилизации. Под такими центрами стабилизации принимаются участки платформ, которые первыми вышли из стадии активного геосинклинального развития и приобрели свойства относительной стабильности, которые характерны для платформ. Эти первичные ядра платформ в ходе геологической истории разрастались в стороны путем последовательного приращения все новых участков, на которых геосинклинальный режим отмирал и заменялся платформенным. Такие выводы в последнее время получили особенно убедительное подтверждение благодаря определению абсолютного возраста пород радиоактивным методом. Новый метод позволил совершенно по-новому пересмотреть вопрос о последовательности во времени образования формаций в течение всего докембрийского этапа развития Земли, т. е. за время от 3 млрд. до 500 млн. лет до настоящего времени, иными словами, за время, которое в 5 раз превосходит всю ранее изучавшуюся геологическую историю Земли:

В качестве примера на рис. 11 приведена схема развития Северо-Американской платформы по данным геологических исследований, дополненных определениями абсолютного возраста по Т. Вильсону. На схеме отчетливо видно, что современная платформа образовалась путем разрастания в ряд этапов двух первичных древнейших ядер — «Киватин» и «Йеллоунайф». Чрезвычайно характерно для этих ядер (как и для аналогичных на других континентах) то, что они сложены по преимуществу изверженными и осадочными поро-

дами такого характера, который явно указывает на то, что эти формации возникли в условиях отсутствия заметных участков коры континентального типа с обычными для них породами, как, например, гранитами. С точки зрения ранее изложенной гипотезы, эти первичные ядра и есть те области, где прежде всего начался процесс распада  $MgSiO_3$  и высвобождения  $SiO_2$ . В последующем распространение процесса распада в стороны привело к вовлечению в этот процесс новых участков по периферии и к созданию на них активного геосинклинального режима со всеми его особенностями. Отмирание геосинклинального режима в дальнейшем и стабилизация территории объясняются тем, что основной первичный физико-химический процесс в оболочке Земли завершился, а вовсе не увеличением твердости коры благодаря пронизыванию ее изверженными породами и складчатости, как это иногда считают. Легко показать, что эффект такого увеличения твердости ничтожен и совершенно несоизмерим с масштабом самого процесса.

\* \* \*

Подводя итоги, кратко отметим проблемы, которые стоят сейчас перед геофизикой в изучении строения земного шара.

К ним относятся: состав земного ядра и его физическое состояние, причины земного магнетизма и его вековых вариаций, состав нижних частей оболочки Земли и природа переходного слоя, происхождение земной коры и основных ее разновидностей, характер основного глубинного процесса, обуславливающего геосинклинальный режим, причины первичных движений земной коры и возникновения землетрясений, неоднородности в оболочке в горизонтальном направлении, температура земных глубин и ее изменения во времени, причины и механизм вулканической деятельности, и наконец, связь всех этих явлений между собой.

Само решение этих проблем должно идти по пути дальнейшего собирания наблюдательного материала, по пути дальнейшего широкого экспериментирования в области высоких давлений и температур и длительно действующих усилий. Одной из актуальнейших задач в этих условиях является изучение фазовых переходов и течения химических реакций. Наконец, обобщение и полное истолкование всех этих данных возможно лишь на основе высоко развитой теории, на основе теснейшего сотрудничества геологов, геофизиков, геохимиков, физиков, астрономов.

#### ЛИТЕРАТУРА

В. В. Белоусов. Основные вопросы геотектоники, 1954; В. А. Магницкий. Основы физики Земли, 1953; Е. Ф. Саваренский и Д. П. Курнос. Элементы сейсмологии и сейсмометрии, 1955; В. М. Яновский. Земной магнетизм, 1952; Труды Геофизического ин-

ститута Академии наук СССР, 1955, № 26; В. Gutenberg. edit. Internal Constitution of the Earth. N. J., 1951; P. Kuiper. edit. The Earth as a Planet, Chicago, 1954; H. Jeffreys. The Earth, Cambridge, 1952.

