

ЗАГАДКИ ГЛУБОКИХ НЕДР ЗЕМЛИ

Е. Н. Люстих

Доктор физико-математических наук

*Институт физики Земли АН СССР
(Москва)*

«Велико есть дело достигать во глубину земную разумом, куда рукам и оку достягнуть возбраняет натура; странствовать размышлениями в преисподней, проникать рассуждением сквозь тесные расселины и вечною ночью помраченные вещи и деяния выводить на солнечную ясность», — писал М. В. Ломоносов¹. С тех пор наука о Земле ушла далеко вперед. Она разбилась уже на целый ряд наук, которые изучают атмосферу, гидросферу, поверхность Земли и ее недра. Накоплено очень много данных, но тем не менее и сейчас еще недра нашей планеты задают ученым загадки, которые до сих пор не решены.

Уже давно известно, что земной шар состоит из трех главных частей, или «геосфер» (не считая атмосферы и гидросферы): из коры, мантии и ядра. Мы знаем, что своеобразие условий в недрах Земли создается очень высокой температурой (в нижней мантии и в ядре — до нескольких тысяч градусов) и огромным давлением, которое на границе ядра близко к $1\frac{1}{3}$, а в центре Земли превосходит $3\frac{1}{2}$ млн. атм. В ядре выделяют внешнее и внутреннее ядро. Внешнее — находится в жидком состоянии и мешает изучить внутреннее ядро. Но все же удалось обнаружить, что продольные сейсмические волны, доходя до внутреннего ядра, порождают в нем поперечные волны, которые, подойдя в каком-то другом месте к границе этого ядра изнутри, порождают во внешнем ядре опять продольные волны, уже доходящие до нас. Отсюда можно вывести заключение, что внутреннее ядро не жидкое, а твердое.

Чрезвычайно важно было узнать, в чем же заключается своеобразие условий в недрах Земли. Тепло и давление — вечные враги.

Их борьба не прекращается в самых глубоких недрах земного шара. Под влиянием огромного давления минералогический состав горной породы изменяется: ее атомы и молекулы перестраиваются, образуя кристаллы с более плотной упаковкой. Нагревание вызывает обратную перегруппировку атомов и молекул. Есть основания думать, что чрезвычайно высокое давление может перевести силикаты¹ в металлическое состояние. Это значит, что некоторые внешние электроны уйдут от своих атомов и станут свободно разгуливать по всему кристаллу —

¹ Силикаты — минералы, в состав которых входит кремнезем (SiO_2). Нет сомнения, что земная кора и мантия сложены в основном силикатами.



Разрез земного шара. Кора настолько тонка, что в этом масштабе ее изобразить невозможно

¹ М. В. Ломоносов. О слоях земных. Гостеолиздат, 1949, стр. 17.

они «обобществятся». Именно так ведут себя внешние электроны атомов в кристалле любого металла, поэтому металлизированный силикат должен приобрести многие физические свойства металла. По всей видимости, нагревание не только не препятствует, но может даже содействовать такому переходу.

Посмотрим теперь, какими сведениями располагают ученые о строении ядра, мантии и земной коры и чего мы еще не знаем.

ЗАГАДКИ ЗЕМНОГО ЯДРА

Почти сферическая поверхность ядра расположена на глубине около 2900 км, т. е. диаметр его близок к 7000 км. Ядро составляет почти 1/6 объема Земли и почти 1/3 ее массы. Диаметр внутреннего ядра, или субъядра, равен приблизительно 2500 км.

Из чего же состоит ядро? Вот первая загадка Земли. Некоторые физические свойства ядра мы знаем. Оно отделено от земной мантии отчетливой границей. Скорость продольных сейсмических волн при переходе из мантии в ядро уменьшается скачком на 40%, а поперечные волны сквозь ядро совсем не проходят. Плотность вещества возрастает на 60—75%. Все указывает на то, что вещество ядра обладает свойствами металла. Поэтому есть две гипотезы о составе земного ядра: по одной — оно сложено железом (вероятно, с некоторой примесью кремния), по другой — из того же силикатного вещества, что и мантия, но вещество это под влиянием огромного давления перешло в металлическое состояние.

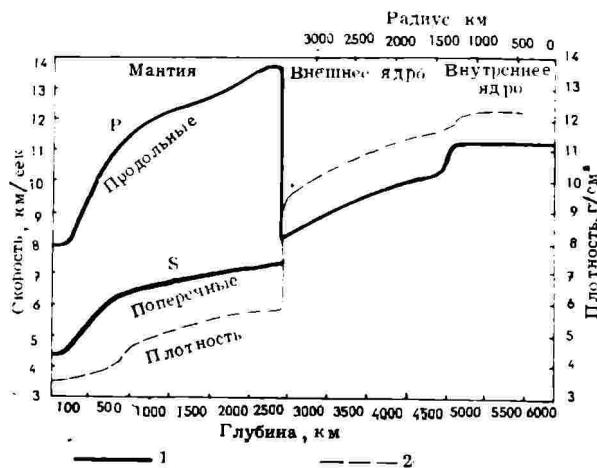
Гипотеза железного состава земного ядра была обоснована в начале XX в. немецким сейсмологом Э. Вихертом, обнаружившим существование самого ядра. Она опирается на тот факт, что на Землю падают железные и каменные метеориты. Долгое время считали, что метеориты — это обломки какой-то развалившейся планеты (ей даже и имя дали — Фазтон): каменные метеориты — обломки ее коры и мантии, железные — обломки ядра. Теперь ясно, что настоящая большая планета развалиться не может. Согласно новым взглядам, метеориты — это неиспользованные остатки того материала, из которого сложились планеты¹. Предполагается, что первоначально небольшие же-

лезные включения были равномерно рассеяны во всем теле Земли, но впоследствии, когда внутренность земного шара нагрелась и сделалась пластичной, тяжелые железные включения стали сползать сквозь каменный материал вниз, к центру, и, скопляясь, постепенно образовали железное ядро. Правда, плотность в ядре возрастает от 9 с лишним т на 1 м³ у его границы до 12 и больше — в центре, а плотность железа (при атмосферном давлении) — всего лишь 7,88 т/м³. Но нельзя забывать о громадном давлении, существующем в ядре. Опыты ударного сжатия¹ показали, что плотность железа, хотя бы и расплавленного, при таком давлении даже больше, чем нужно. Поэтому приходится предполагать наличие примеси более легкого материала, например кремния (до 20%). Если внешнее ядро железное, внутреннее — также железное, но внешнее ядро расплавлено, а внутреннее — нет. Объясняется это тем, что давление к центру ядра сильно повышается; с ним повышается и точка плавления, тогда как действительная температура по всему ядру почти одинакова.

У гипотезы железного ядра и сейчас много сторонников (например, Г. Джеффрис в Англии, В. Н. Жарков в СССР), однако она встречает и ряд возражений. Как мы уже говорили, масса ядра составляет почти треть массы Земли (31,5%), а доля железа в общей массе падающих метеоритов в несколько раз меньше. Приходится думать, что земной шар образовался из метеоритов другого состава, не таких, какие падают сейчас. Но тогда нельзя уже ссылаться на современные метеориты как на доказательство железного состава ядра. Кроме того, Луна, надо полагать, сложена тем же материалом, что и Земля. Однако малая средняя плотность Луны (3,33 т/м³) с несомненностью говорит об отсутствии на Луне металлического железа или его незначительном количестве. Далее, расчет показывает, что мелкие железные включения в твердой пластичной земной мантии опускались бы слишком медленно и для образования ядра потребовались бы десятки миллиардов лет, а возраст Земли не может быть больше пяти миллиардов лет. Ядро могло бы образоваться быстро в расплавленной Земле, но можно доказать убе-

¹ Вполне возможно, что метеориты в космосе (до падения на Землю их называют метеорными телами) — это обломки мелких планет — астероидов, которые сталкивались и дробились на куски.

¹ Ударное сжатие — сжатие ударной волной от взрыва (для этого достаточен небольшой безопасный взрыв). Только таким способом сейчас можно получить давление в миллионы атмосфер, да и то лишь на очень короткое мгновение.



Скорости сейсмических волн (1) и плотность (2) внутри Земли. Характер поведения кривых скоростей сейсмических волн служит главным основанием для подразделения мантии на зоны по глубине

дительными вычислениями, что она расплавленной никогда не была. Самое большее, что можно предполагать, — это расплавление на глубинах примерно от 200 до 900 км, и то, вероятно, не полное расплавление, а только частичное выплавление более легкоплавких фракций.

Трудно объяснить также, почему внешнее ядро расплавлено. Правда, мы не можем еще экспериментально измерить температуру плавления железа при давлении в полтора миллиона атмосфер и больше. Ее приходится вычислять теоретически, так же, как и температуру плавления вещества мантии на границе с ядром. По расчетам В. Н. Жаркова, и для железа и для мантии точка плавления должна быть немного больше 4000°C (не очень точно). Можно допустить, что для мантии она все-таки выше, чем для железа с примесью кремния. Но здесь мы наталкиваемся еще на два затруднения. Во-первых, недра Земли все время нагреваются теплом, возникающим при распаде радиоактивных элементов. Приходится считать, что по странному совпадению мы живем как раз в ту геологически очень короткую эпоху, когда температура на границе ядра и мантии перешла уже точку плавления ядра, но не дошла еще до точки плавления мантии. Значит, ядро расплавилось совсем недавно. Между тем, по современным воззрениям, для существования магнитного поля Земли необходимо жидкое внешнее ядро, а магнитное поле существует уже по крайней мере миллиард,

а вероятнее всего, несколько миллиардов лет. Во-вторых, по законам геохимии, железо, уходя из мантии в ядро, не могло захватить с собой радиоактивных элементов; они все остались в мантии. Их практически нет и в железных метеоритах. Поэтому мантия нагревалась быстрее ядра, и оно должно быть заметно холоднее мантии. А в таком случае уж совсем трудно объяснить, почему ядро расплавилось, а мантия нет. И опять-таки, теория происхождения магнитного поля Земли требует, чтобы тепло уходило из ядра в мантию, а не наоборот.

Гипотеза силикатного ядра с этими трудностями не встречается. Она основывается на следующем: температура плавления силикатных минералов, перешедших в металлическое состояние, должна быть примерно вдвое меньше, чем температура плавления железа при том же давлении. Вместе с тем радиоактивные вещества остаются в ядре, и оно может нагреваться не меньше, чем мантия. Электропроводность металлизированных силикатов такая же большая, как и у настоящих металлов, поэтому теория магнитного поля Земли вполне применима и к силикатному ядру. Если ядро — силикатное, то оно возникло в ту пору, когда Земля еще продолжала расти за счет сыпавшихся на нее метеоритов. Теоретические вычисления показывают: как только давление в центре Земли достигло критической величины, сразу же образовалось ядро. Это была величайшая катастрофа в истории планеты. Объем части земного шара, ставшей ядром, сразу уменьшился, и все, что было выше, «провалилось» к центру. Наружная поверхность Земли сжалась, на ней, надо думать, возникли складки — первичные горы, от которых сейчас не осталось и следа. Все это, конечно, сопровождалось землетрясениями такой силы, какой мы себе сейчас даже представить не можем: разломами, вспучиваниями, провалами и всякими иными титаническими движениями гигантских каменных глыб. Затем ядро росло уже медленно — росло, пока росла Земля, питаясь метеоритами.

Внутреннее ядро может состоять из того же металлизированного силиката, что и внешнее, а может быть и железным. Оно очень невелико, и на него хватило бы того железа, которое могло выделиться из внешнего ядра. В расплавленном внешнем ядре железные включения могли потонуть достаточно быстро.

Идею силикатного ядра предложил в 1939 г. советский ученый В. Н. Лодочников, а через десять лет англичанин В. Х. Рамзей обосновал ее примерными расчетами. Эта гипотеза сначала привлекла большое число сторонников, но в последние годы многие снова вернулись к гипотезе железного ядра. Возникли очень большие сомнения в возможности металлизации силикатов при давлении 1,3—1,4 Мбар¹, какое существует на границе ядра. Теоретические вычисления для целого ряда химических элементов и простых соединений (для сложных расчет пока невозможен) показали, что такие фазовые превращения в большинстве случаев должны происходить при давлениях в десятки или даже сотни мегабар. Были подвергнуты ударному сжатию горные породы, которые, по мнению многих исследователей, слагают мантию Земли. Ни в одной породе не произошла металлизация, хотя достигались давления, существующие в земном ядре. Все же эти результаты не ставят крест на гипотезе силикатного ядра. Существуют ведь химические элементы и соединения, для которых металлизация наблюдалась экспериментально и, кстати, при давлениях гораздо более низких. Кроме того, опыты показывают, что такой фазовый переход совершается медленно. Поэтому, если при ударном сжатии он не успел произойти, то это еще не доказывает, что он не может произойти вообще.

Таким образом, вопрос о составе земного ядра остается открытым. По-видимому, больше надежды, что будут устранены возражения против силикатного ядра.

ЗАГАДКИ МАНТИИ

О составе земной мантии и коры судить легче, в качестве отправной точки можно взять известный нам состав изверженных горных пород. Однако эти породы неоднородны. Главное различие заключается в количестве кремнезема². С уменьшением доли кремнезема возрастает доля окислов железа и магния.

¹ 1 Мбар — мегабар — составляет около миллиона атмосфер.

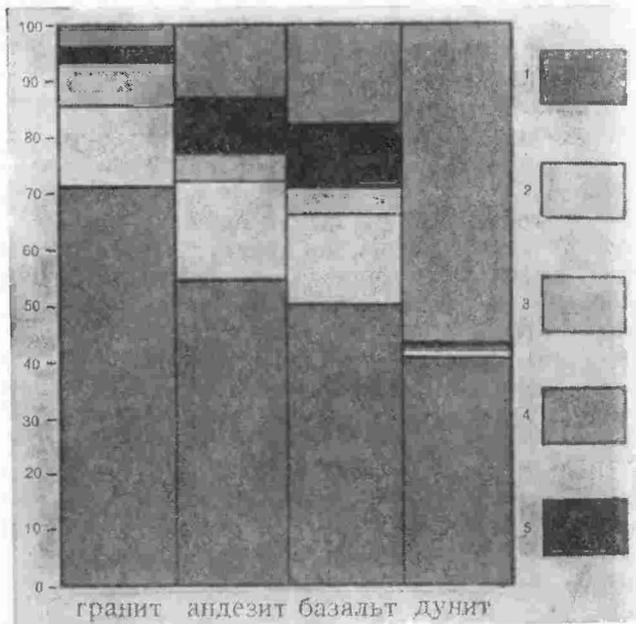
² Породы, содержащие 65—70% кремнезема, называются кислыми (пример: гранит, 70% SiO₂), 55—65% — средними (андезит, 60% SiO₂), 47—55% — основными (базальт, 50% SiO₂) и 40—47% — ультраосновными (дунит, 40% SiO₂).

Для выяснения состава коры и мантии много сделал советский ученый В. А. Магницкий, но еще есть вопросы, до сих пор не решенные.

Надо сказать, что название «мантия» не очень удачно. Оно больше подходит к земной коре, которая тонка и смята в складки; мы же называем мантией собственно тело Земли, ее основную массу. Одно время у нас в СССР земную мантию стали даже называть «оболочкой», что еще менее удобно. Мы знаем водную, воздушную и другие оболочки Земли, к тому же слово «оболочка» связывается обычно с чем-то тонким. Между тем толщина мантии — 2900 км, ее объем — 5/6 объема Земли и масса составляет 2/3 массы Земли.

Мантию разделяют обычно на три слоя, обозначая их латинскими буквами (сверху вниз) *B*, *C*, *D*. (Буква *A* присвоена земной коре.) Слои *C* иногда называют слоем Голицына, по имени впервые обнаружившего его русского ученого Б. Б. Голицына, основателя современной научной сейсмологии. Слои *B* и *C* вместе составляют верхнюю мантию, а слой *D* — нижнюю. Нижняя мантия толщиной в 2000 км занимает пространство от глубины 900 км и до поверхности ядра, а средняя плотность ее близка к 5 т/м³. Действительная плотность возрастает с глубиной от плотности, близкой сверху к 4,5 т/м³, до 5,7 т/м³ — у границы ядра. Есть основания думать, что это вызвано упругим сжатием вещества под действием давления, которое на этом интервале глубин увеличивается в несколько раз. Поэтому можно допустить, что вся нижняя мантия однородна по составу.

Верхняя мантия построена сложнее. В слое Голицына, залегающем между 400 и 900 км, плотность и скорости сейсмических волн с глубиной растут так сильно, что это уже нельзя объяснить одним только упругим сжатием вещества. Приходится предполагать, что с глубиной доля более тяжелых минералов возрастает. Такое на первый взгляд однозначное решение приводит нас к двум принципиально различным возможностям. Проще всего допустить, что одновременно с минералогическим меняется и химический состав. Например, сверху преобладают силикаты, содержащие магний, а ниже главная роль постепенно переходит к более тяжелым силикатам, содержащим железо (магний и железо легко заменяют друг друга в минералах). В этом случае изменения давления и температуры, в тех пределах, какие можно предполагать, не могут



Химический состав некоторых типичных изверженных пород (без воды): SiO_2 (1); Al_2O_3 (2); $\text{N}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (3); $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO}$ (4); прочие окислы (5). В тех породах, где меньше SiO_2 , увеличивается доля окислов железа и магния (в дуните их более 50%)

вывести верхнюю мантию из равновесия. Если, скажем, какой-то объем в нижней части слоя Голицына сильно нагреется, он станет легче соседних участков, но не легче слоев, лежащих выше; для восстановления равновесия достаточно, чтобы этот расширившийся объем только немного сдвинулся кверху.

Другая возможность изменения минералогического состава — это перекристаллизация за счет давления. Сейчас все больше исследователей склоняется в сторону этого варианта. Повышенное давление в глубоких недрах должно привести к образованию кристаллов с более плотной упаковкой, а следовательно, и более тяжелых. Мантия, очевидно, состоит из смеси минералов, а разные минералы перекристаллизуются на разных уровнях, поэтому нарастание плотности не наблюдается скачком на каком-то одном уровне, а как бы «размазывается» на весь слой Голицына. Тогда химический состав оказывается одинаковым по всей мантии сверху донизу. Местные изменения температуры и давления в подобных условиях могут приводить к гораздо более мощным движениям в мантии. Допустим, что какой-то участок

в нижней части слоя Голицына нагрелся. В этом случае часть минералов должна перейти в более «рыхлую» модификацию, и плотность нагретого объема упадет гораздо сильнее, чем она упала бы от обычного теплового расширения. Нагретый участок начнет всплывать кверху. Может показаться странным, что мы говорим о всплывании в твердом веществе. Однако при достаточной величине нагретой массы сила всплывания будет так велика, что никакое самое прочное окружение не сможет удержать эту массу от движения вверх¹.

Сместившись вверх, нагретая материя попадет в условия меньшего давления, а это заставит еще часть минералов перейти в менее плотную фазу. Следовательно, возможно безостановочное движение нагретой массы через весь слой Голицына. Таким же образом охладившаяся масса может идти безостановочно сверху вниз. Открывается возможность для гипотезы об охвате всей мантии конвекцией, т. е. мощными потоками теплового перемешивания. Она предложена для обоснования гипотезы континентального дрейфа, или перемещения материков. Некоторая часть исследователей, особенно за рубежом, очень увлечена обеими гипотезами, однако серьезных доводов в их пользу пока еще слишком мало, а серьезных возражений много.

Следует заметить, что обе рассмотренные причины быстрого роста плотности с глубиной в слое Голицына не исключают друг друга: наряду с перестройкой кристаллических решеток может изменяться и химический состав материала верхней мантии. Если дело обстоит действительно так, то конвекция в этом слое невозможна.

Таким образом, пока природа слоя Голицына остается для нас загадкой. Можно только добавить, что, не зная ничего о текучести этого слоя, мы наблюдаем факты, подтверждающие его прочность, а именно землетрясения Тихоокеанского тектонического кольца, очаги которых отмечаются на глубинах до 700 км. Такие глубокофокусные землетрясения свидетельствуют, что в слое Голицына происходят какие-то движе-

¹ Большая разность давлений может заставить течь любой материал. Американский физик П. Бриджмен, конструировавший аппаратуру для больших давлений, жаловался, что, когда он перешел к давлению в десятки тысяч атмосфер, лучшая сталь выдавливалась через все щели, как сливочное масло.

ния и временами накапливаются сильные механические напряжения.

Между земной корой и слоем Голицына располагается слой, или зона, *B*. Это — самая близкая к нам часть мантии; она легче поддается физическому исследованию. Мы можем изучать прохождение сейсмических волн сквозь эту зону, не дожидаясь землетрясений — достаточно сравнительно небольших искусственных взрывов. Измеряя естественные электрические токи в Земле, можно определить электропроводность различных слоев зоны *B*, а по электропроводности судить о температуре и т. д. Несомненно, лава многих вулканов идет из верхней части зоны *B* — очевидно, она зарождается в ней, если не глубже. Однако даже о самых верхах мантии мы знаем еще далеко не все.

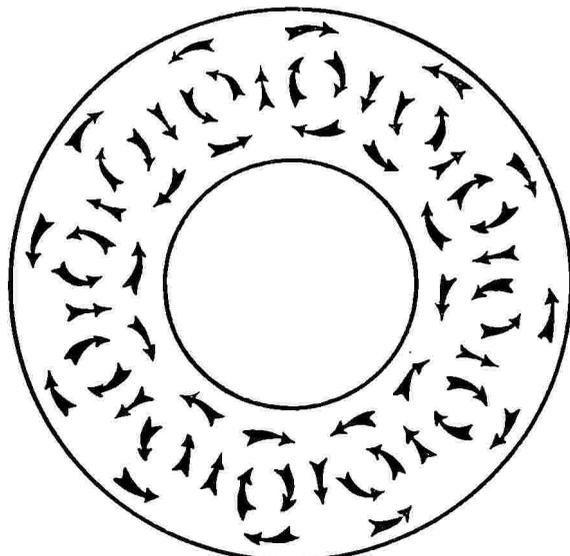
Самая интересная особенность зоны *B* — слой пониженных скоростей сейсмических волн в ее нижней части. Этот слой часто называют волноводом, так как сейсмические волны бегут вдоль него на большие расстояния, почти на выходя наружу, как бы отражаясь от кровли и подошвы. Природа слоя пониженных скоростей неизвестна; вероятнее всего, это частичная «победа» температуры над давлением. Точка плавления вещества мантии повышается с глубиной потому, что растет давление, но в зоне *B* температура земных недр растет быстрее и, может быть, догоняет точку плавления. Вещество, расплавляясь, переходит в аморфное состояние, еще не превращаясь в жидкое (точка разжижения лежит процентов на десять выше, чем точка аморфизации). Глубже рост температуры замедляется, давление опять берет верх, и вещество мантии вплоть до границы ядра, несомненно, находится в кристаллическом состоянии. Многие думают, что именно такое перекрытие температуры — реальной и нужной для плавления — приводит к частичному выплавлению из мантии более легкоплавкой фракции. Эта фракция, будучи легче, чем вещество мантии, вытесняется наверх и изливается в виде базальтовой лавы.

Более сложная гипотеза происхождения базальтовой лавы предполагает явление, аналогичное зонной плавке¹, но и для нее

¹ Зонная плавка — способ очистки материала, например металла или полупроводника, от примесей. Он состоит в том, что по столбику материала многократно прогоняют короткий участок (зону расплавленного состояния) каждый раз в одну и ту же сторону. Легкоплавкие примеси собираются в том конце столбика, куда «бегут» зоны расплавления.

необходимо, чтобы где-то в недрах Земли температура была близка к точке плавления.

Подобная теория волновода ставит нас перед новым вопросом. Плавление, или переход в аморфное состояние, как правило, неизбежно приводит к уменьшению плотности вещества. Если волновод состоит из такого же материала, какой залегает выше него, то равновесие неустойчивое: более плотный слой располагается над более легким и к тому же размятченным. Достаточно небольшой неравномерности в нагрузке на верхний слой (а на поверхности Земли нагрузка все время меняется из-за сноса материала с возвышенностей и отложения осадков в низменностях и водоемах), чтобы материал волновода безвозвратно ушел из-под областей большей нагрузки и скопился бы под областями меньшей нагрузки, вспучивая их кверху. Однако этого не произошло. Следовательно, либо наше объяснение волновода неверно, либо химический состав зоны *B* меняется с глубиной таким образом, что волновод, несмотря на нагревание, оказывается плотней, чем лежащая выше толща. Вот и встает вопрос: в чем же причина такого возрастания плотности с глубиной в зоне *B*? Окончательного ответа на этот вопрос пока нет.



Одна из возможных схем конвекции в мантии. В подобных схемах обычно не учитывают влияния различной толщины земной коры под океанами и на материках

Земная кора отделена от мантии разделом Мохоровичича, т. е. границей, при переходе которой из коры в мантию скорости сейсмических волн резко возрастают. Есть два основных типа земной коры, которые покрывают наибольшие площади на Земле: океанический и материковый. Кроме того, между этими двумя есть несколько переходных типов, но они все вместе занимают меньшую площадь. Океаническая кора имеет небольшую толщину — от 5 до 10 км, иногда даже меньше. Толщина материковой коры для равнинных местностей составляет 30—40 км, а в горах — 40—60 и даже до 80 км. Как ни странно, состав земной коры до сих пор неизвестен, хотя это самая близкая к нам геосфера, не считая водной и воздушной. Конечно, мы знаем состав самой верхней части коры: осадочных пород и — на материке — подстилающего их кристаллического фундамента. Но глубже опять начинаются загадки.

Океаническая кора устроена проще материковой. Под осадочными слоями (различной степени уплотнения) залегает однородная толща с довольно высокими скоростями сейсмических волн. Судя по этим скоростям, она может состоять из габбро¹, поэтому ее обычно называют базальтовым слоем. Есть и другое мнение, согласно которому эта толща состоит из серпентинита², и это тоже соответствует сейсмическим наблюдениям. В обоих вариантах допускается, что под океанами субстрат (часть мантии, непосредственно подстилающая кору) состоит из ультраосновных пород. Согласно первой точке зрения, океаническая кора выплавилась из мантии и не может исчезнуть, а согласно второй — она может превращаться обратно в мантию.

Скорости сейсмических волн в ультраосновных породах близки к тем, какие наблюдаются в субстрате. В материковой коре под осадочным покровом они возрастают с глубиной. Сейсмические наблюдения дают возможность разбить всю эту толщу на два или более слоев³. Принято считать, что кора под осадками состоит из двух слоев: верхнего—

гранитного и нижнего—базальтового, т. е. габбро. Вряд ли эти названия соответствуют действительности. В верхней части гранитного слоя залегают не только граниты, но и гнейсы, а также другие, более тяжелые породы. Глубже доля тяжелых пород должна возрастать. Состав базальтового слоя совсем неизвестен.

Существует мнение, что вся кора образовалась путем накопления осадочных и изверженных пород, но в глубине эти породы метаморфизованы, т. е. преобразованы под действием температуры и давления, и слои коры отличаются просто различной плотностью упаковки ионов, молекул и атомов в кристаллах. Можно сделать и другое предположение: только средний слой коры по своему составу соответствует базальту, выше залегают более кислые и потому более легкие породы, ниже — более основные и потому более тяжелые. Споры идут и о том, с чем связана нижняя граница материковой коры (раздел Мохоровичича). Одни считают, что эта граница отделяет базальтовый слой коры от ультраосновного субстрата. Другие думают, что под материками субстрат сложен не ультраосновными породами, а эклогитом¹, и граница коры — это фазовая граница, отмечающая те условия температуры и давления, при которых габбро переходит в эклогит.

Не подлежит сомнению, что земная кора выделилась из мантии (если не из ядра — о такой возможности тоже стоит подумать!) в виде каких-то легкоплавких выплавов. Вот почему, чтобы судить о составе мантии, нам важно знать состав коры. С вопросами о составе коры и мантии тесно связан и вопрос о тепловой истории Земли — ведь нам необходимо знать содержание радиоактивных элементов в коре, в особенности в мантии и ядре. Хотя атомы таких элементов очень тяжелы (кроме калия), они обычно химически связаны с кремнеземом и потому преобладают в более кислых породах и реже встречаются в более основных. Но более кислые породы в то же время оказываются более легкими и легкоплавкими; именно их расплавы уходят из мантии вверх и образуют земную кору. Вместе с ними уходят и радиоактивные элементы; поэтому радиоактивность коры

¹ Габбро — продукт медленного застывания базальтовой магмы в коре на некоторой глубине.

² Серпентинит (или змеевик) — порода, получающаяся при взаимодействии ультраосновных пород, главным образом перидотитов, с водой.

³ Однако такая возможность появляется не всегда.

¹ Эклогит — кристаллически-зернистая порода, по валовому химическому составу соответствующая базальту, но состоящая из минералов более плотной упаковки (гранат, пироксен и др.).

(в расчете на единицу массы или объема) во много раз больше, чем радиоактивность мантии. Специальными измерениями обнаружено, что из недр Земли наружу все время выходит тепло; этот тепловой поток невелик (примерно в 5000 раз меньше того, что мы получаем от Солнца), но он существует на всей Земле. Примечательно, что средняя интенсивность потока тепла (в расчете на единицу площади) сквозь дно океанов примерно равна средней интенсивности потока сквозь поверхность материков.

Разные причины могут порождать тепло в Земле, но главная, по-видимому, — распад радиоактивных элементов. Поэтому величина теплового потока, которая более или менее известна, ограничивает наши предположения о содержании радиоактивных элементов в коре и верхней мантии. На более глубокие геосферы это ограничение не распространяется: они покрыты такой толстой «шубой» из коры и верхней мантии (да эта «шуба» еще и сама выделяет тепло), что, как показывают вычисления, тепло из этих глубоких геосфер практически не выходит наружу, а все накапливается в них¹. Однако для больших глубин у нас есть другие ограничения, а именно: температура нижней мантии должна быть везде ниже точки плавления, тогда как внешнее ядро должно быть расплавлено. В тепловых расчетах необходимо, конечно, учесть, что радиоактивные вещества распадаются, и в «молодой», только что образовавшейся Земле их было гораздо больше, чем сейчас.

Тут надо предостеречь читателя от одной ошибки. У некоторых авторов можно встретить рассуждение, что поскольку раньше тепла выделялось больше, то и температура в недрах Земли была выше, чем сейчас. Ошибочность такого умозаключения легко пояснить на простом примере. Представим себе, что чайник холодной воды поставлен на самый полный огонь. Допустим, что через некоторое время мы несколько убавим огонь, потом через некоторое время еще убавим и т. д. Разве чайник начнет остывать? Конечно, нет! Он будет продолжать нагреваться, но только все медленнее. Так и недра Земли все время нагреваются, но только с замедлением темпа. За последний миллион лет глубокие недра Земли нагрелись меньше

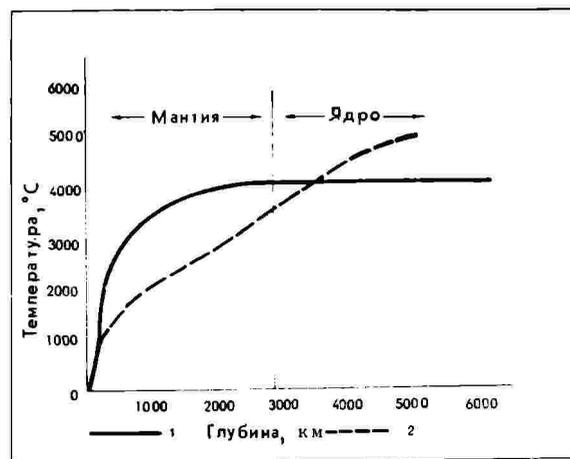
¹ Надо оговориться, что в эти расчеты входят величины, в действительности нам неизвестные, а только предполагаемые, например теплопроводность в глубоких недрах.

чем на градус, а за все время существования нашей планеты нагревание могло составить от двух до четырех тысяч градусов¹.

Есть основания полагать, что кора выплавляется не из всей мантии, а только из верхней мантии, и даже скорее всего из зоны В. Учитывая это и принимая во внимание ограничения, о которых мы уже говорили можно высказать наиболее вероятные предположения о химическом составе коры и мантии.

Средний валовой состав материковой коры, по-видимому, близок к составу базальта или только немного кислее, так что большого количества гранитов, гнейсов или иных кислых пород в коре не должно быть. Мантия, по-видимому, имеет ультраосновной состав. Особенно мало кремнезема и радиоактивных элементов должно быть сейчас в той ее части, из которой уже выплавилась материковая кора. Остальная часть мантии должна иметь больше радиоактивных элементов и, соответственно, больше кремнезема (хотя и гораздо меньше, чем в базальте). Такой состав мантии не сов-

¹ В эти цифры мы не включили первоначальное разогревание Земли в процессе ее образования. Оно происходило от ударов метеорных тел, из которых складывалась Земля, и от сжатия внутренних частей Земли под давлением насыпавшегося сверху материала. Думают, что такое нагревание составило от тысячи до двух тысяч градусов, но трудно ручаться за эту оценку.



Распределение в настоящее время температуры по глубине из расчета тепловой истории Земли (Б. Ю. Левин и С. В. Масва) — 1; оценка наиболее вероятной температуры, исходящая из различных геофизических данных (В. А. Магницкий) — 2. Здесь видно, как плохо согласуются эти две кривые, в чем сказывается недостаток наших знаний о глубоких недрах Земли

