

ГЛАВА 3

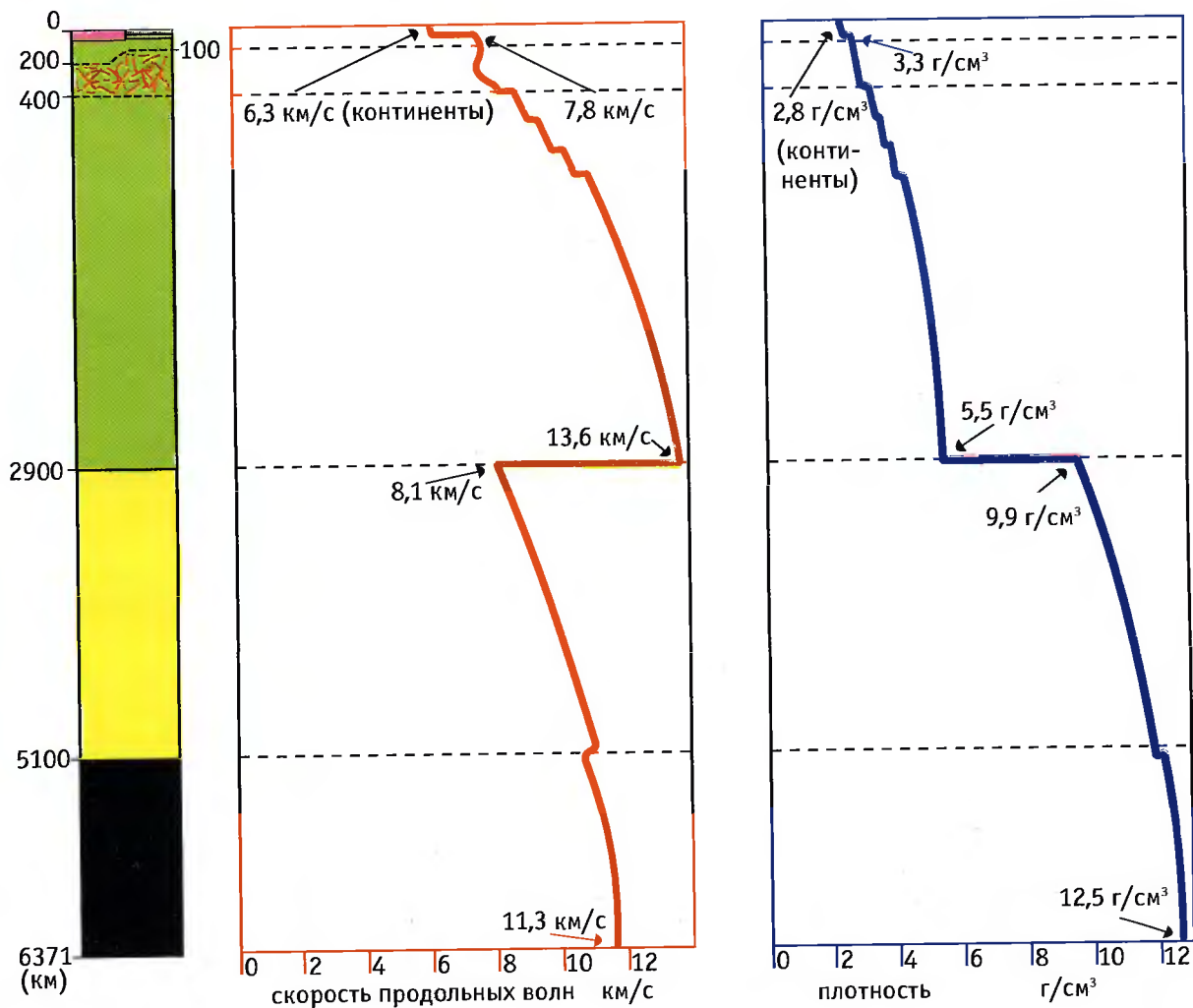
ТАЙНЫ ЗЕМНЫХ ГЛУБИН

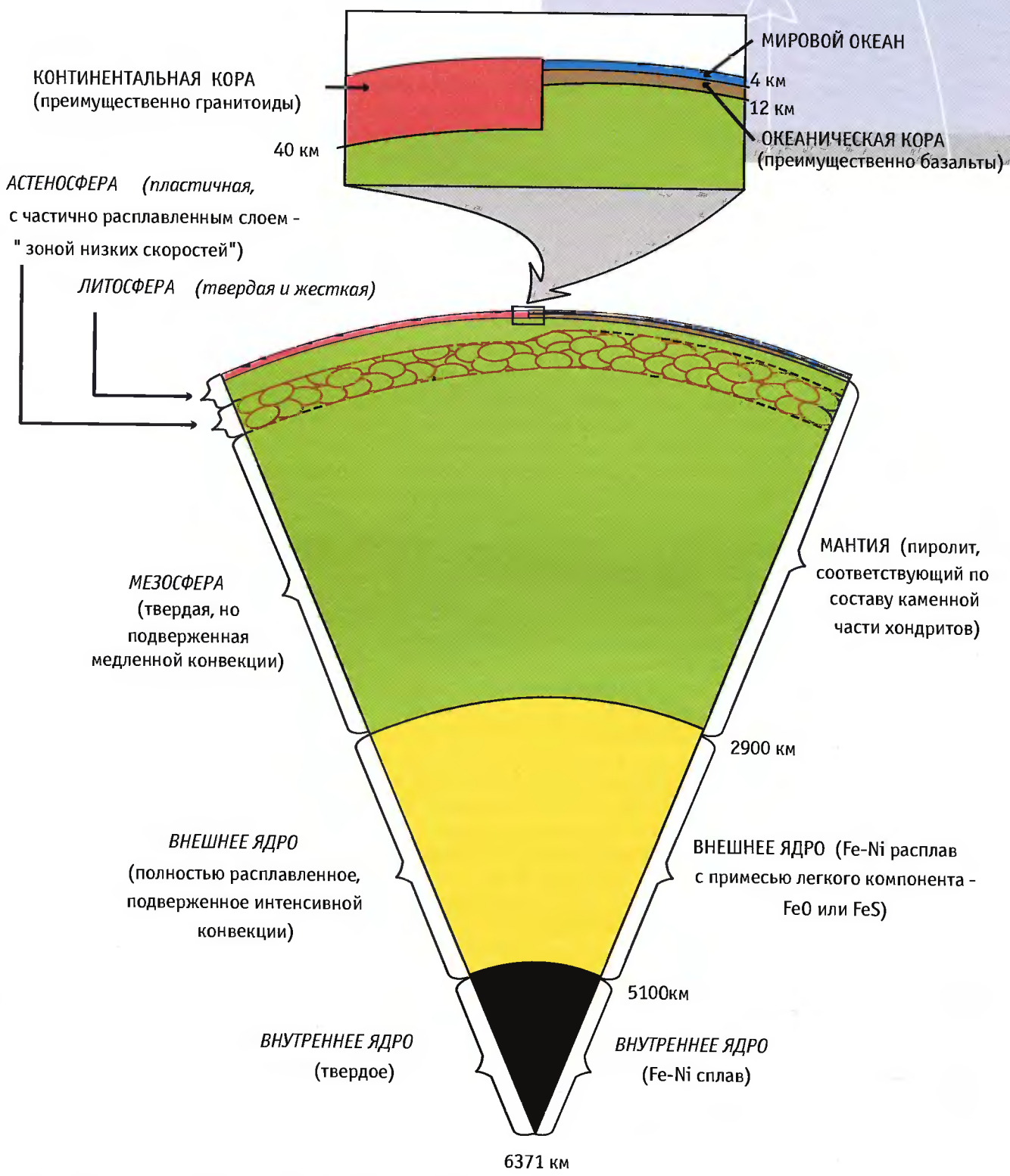
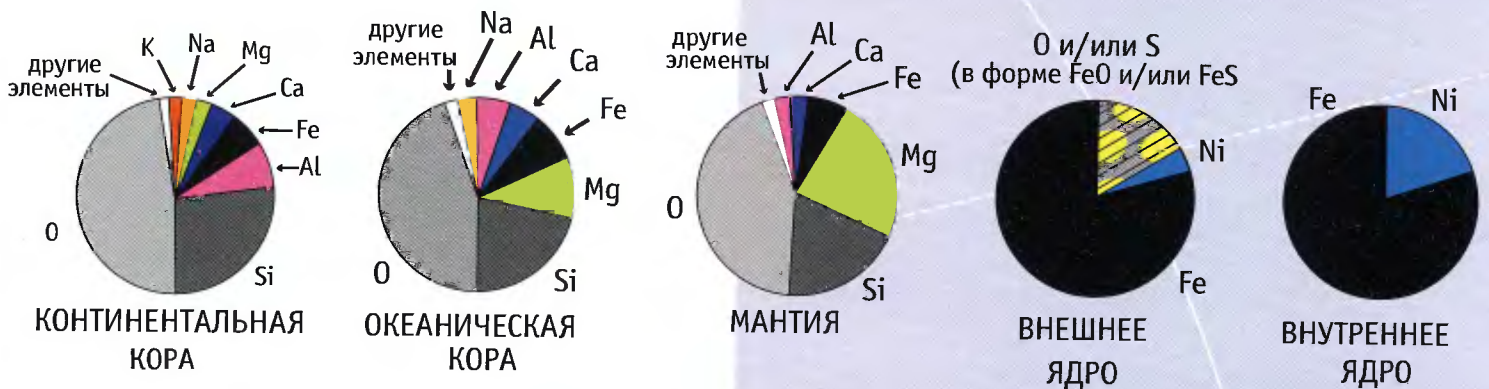
"Теперь мы к миру спустимся слепому, -
Так начал, смертно побледнев, поэт. -
Мне первому идти, тебе - второму."
Данте Алигьери

В наш век космических исследований, когда люди сумели высадиться на Луну и послать автоматические аппараты к далеким планетам, очень трудно осознать тот факт, что в непосредственной близости от поверхности Земли существует совершенно недоступный мир - мир земных недр. Глубины Земли, начиная с нескольких десятков километров, по-видимому, всегда будут закрыты для непосредственного изучения.

Долгие века по ряду косвенных признаков - наличию и особенностям магнитного поля планеты, ее средней плотности, извержениям вулканов и т.д. - предпринимались попытки составить суждение о строении земных недр. В результате возникли многочисленные умозрительные модели, во многом противоречившие друг другу, которые было невозможно ни подтвердить, ни опровергнуть. Лишь в начале XX века, с наступлением эпохи сейсмологических исследований, стало возможным "просветить" глубины нашей планеты. На смутных "рентгеновских снимках" земного шара, построенных по сейсмологическим данным, ученые увидели, что Земля концентрически расслоена, и определили границы трех ее главных сфер: коры, мантии и ядра.

История открытий, связанных с изучением внутреннего строения нашей планеты, далеко не так известна, как история покорения Космоса. Имена первооткрывателей земных глубин никогда не украшали заголовков газет, они остались на страницах научных журналов и монографий, известные лишь довольно узкому кругу ученых-геологов. Эта глава и рассказывает о том, как формировались представления о внутреннем строении Земли, и как современное естествознание решает проблему строения ее недр.





ЗЕМЛЯ - ГИГАНТСКИЙ МАГНИТ

*"Мы живем на крыше Земли,
Мы живем на зеленом куполе.
Далеко мы вглубь не ушли, -
Только сверху землю ощутили..."*

*.....
А быть может, горы и лес,
Города и наше величество -
Упаковка иных чудес,
Оболочка тайны космической."
В. Шефнер*

Хотя размеры земного шара были установлены еще античными учеными, вплоть до XVI-XVII веков оставалось полной загадкой, что же находится внутри этого огромного шара. Все или почти все представления на этот счет были совершенно фантастическими. **Первые реальные факты, которые позволили в какой-то мере судить о том, что на самом деле сокрыто в глубоких недрах Земли, появились лишь в эпоху Великих географических открытий и были связаны с обнаружением некоторых особенностей поведения магнитной стрелки компаса.**

Долгое время европейские мореплаватели, пользуясь компасом, совершенно неверно представляли, почему именно его стрелка указывает на север. Считалось, что это как-то связано с действием мифического небесного Перводвигателя, приводящего в движение небесные сферы, или же, что северный конец магнитной стрелки, в силу невыясненных причин, притягивается Полярной звездой. Эти объяснения казались вполне удовлетворительными до тех пор, пока европейцы плавали лишь у берегов своего континента, где магнитная стрелка действительно смотрит примерно на север. Но стоило им проникнуть в другие районы земного шара, как было обнаружено, что северный конец магнитной стрелки может отклоняться от направления на Полярную звезду на десятки градусов. Впервые это было замечено Христофором Колумбом во время его первого плавания в Америку, что он и зафиксировал в корабельном журнале 13 сентября 1492 года. Угол между направлением на истинный север и направлением, указываемым магнитной стрелкой, получил название магнитного склонения.

В течение следующего, XVI века, европейцы побывали во многих уголках земного шара и обнаружили, что величина магнитного склонения систематически меняется на земной поверхности от точки к точке. Все это выглядело очень загадочно, и было ясно лишь то, что к поведению магнитной стрелки не имеют никакого отношения ни Полярная звезда, ни мифический небесный Перводвигатель. Лишь в 1600 году, когда накопился значительный объем магнитных наблюдений, выполненных в разных районах мира, Уильям Гильберт (1544-1603), придворный врач королевы Елизаветы и один из крупнейших естествоиспытателей своей эпохи, догадался, что поведение магнитной стрелки компаса можно объяснить, предположив, что в недрах Земли заключен очень большой естественный магнит, ось которого немного не совпадает с осью вращения Земли.

Для иллюстрации своей идеи Гильберт изготовил магнитную модель Земли, поместив внутрь глобуса обычный магнит. Перемещаемая по поверхности такого глобуса магнитная стрелка довольно хорошо повторяла поведение стрелки компаса на поверхности реального земного шара. Эта модель, которой Гильберт развлекал саму королеву Елизавету, произвела большое впечатление на его современников. Представление о том, что в центральной части планеты сосредоточены большие массы магнитного материала (скорее всего, железа или магнитной железной руды - магнетита), стало необычайно популярным.

Однако спустя несколько десятилетий модель Гильберта столкнулась с совершенно неожиданной трудностью - было обнаружено, что магнитное склонение, измеряемое в одном и том же пункте, медленно меняется со временем. Тщательный анализ этого явления выполнил в конце XVII века известный английский ученый Эдмунд Галлей (1656-1742), который показал, что магнитное поле Земли меняется таким образом, словно внутренний магнит поворачивается в теле планеты в западном направлении. Само явление впоследствии получило название "западный дрейф геомагнитного поля". Но как может что-либо поворачиваться в каменных недрах Земли? Ответ на этот вопрос пытался дать сам Галлей, который предложил трехслойную модель внутреннего строения Земли. В центре планеты он поместил большое сферическое железное намагниченное ядро, отделенное от внешней твердой каменной скорлупы (коры) слоем некой тягучей среды. При этом, согласно Галлею, магнитное ядро и внешняя скорлупа вращаются с немного различающимися скоростями: ядро и жестко связанное с ним магнитное поле несколько отставали в своем вращении от внешней каменной оболочки, чем, по мнению Галлея, и объяснялся наблюдаемый на земной поверхности упомянутый западный дрейф.

Хотя современные представления о внутреннем строении Земли и причинах западного дрейфа магнитного поля очень далеки от представлений английского ученого, заметим, что именно **Галлей впервые сформулировал идею оболочечного строения тела Земли и существования у нее крупного сферического магнитного ядра.** Заметим также, что модель Галлея не получила признания у его современников, однако в дальнейшем сколь-либо удовлетворительно объяснить западный дрейф магнитного поля не удавалось на протяжении двух с половиной столетий.

ОРИЕНТАЦИЯ МАГНИТНОЙ СТРЕЛКИ В РАЗНЫХ ПУНКТАХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Северный конец магнитной стрелки компаса ориентирован не на истинный Северный полюс, а на магнитный северный полюс, что и обуславливает наличие магнитного склонения D , меняющегося от точки к точке. Если магнитная стрелка отклоняется к востоку от направления на истинный Северный полюс, то магнитное склонение условно считается положительным, если к западу – отрицательным. В полярных районах магнитное склонение может принимать очень большие значения – вплоть до 180° . Так, на линии, соединяющей истинный и магнитный полюса, северный конец стрелки компаса будет указывать на географический юг. Магнитный северный полюс в настоящее время находится в пределах Канадского Арктического архипелага.

МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ ПО ГАЛЛЕЮ

Хотя Галлей и считал, что земной шар состоит из концентрических оболочек, находящихся в разном агрегатном состоянии, нетрудно видеть, что его представления о внутреннем строении Земли были весьма далеки от современных – так, в настоящее время считается, что земное ядро – жидкое, а мантия, отделяющая его от коры, наоборот, твердая.

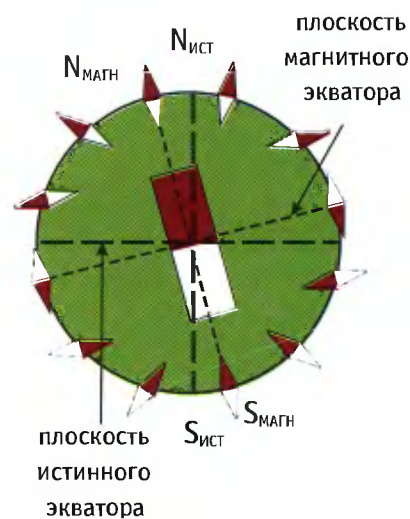
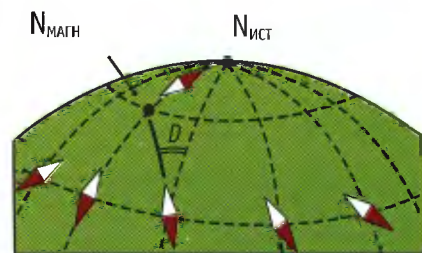
НЕ МАГНИТ, А ЭЛЕКТРОМАГНИТ

К концу XIX века стало известно, что железо теряет свои ферромагнитные свойства уже при температуре 769°C . К этому времени было установлено, что глубокие недра нашей планеты намного горячее. Ранее представление о том, что магнитное поле Земли обусловлено наличием в ее недрах крупного железного ядра, выступающего в роли постоянного магнита, таким образом, оказалось несостоятельным. Природа земного магнетизма должна была быть совсем иной, чем думали Гильберт, Галлей и их последователи. Тем не менее, крупное железное ядро у Земли есть, более того, именно оно и ответственно за наличие у нашей планеты сильного магнитного поля. Однако, земное ядро является на самом деле не магнитом, а электромагнитом. Хотя в природе земного магнетизма до сих пор многое остается неясным, в общих чертах понятно, что в недрах планеты должны существовать токовые петли, напоминающие витки электрических катушек, которые и генерируют магнитное поле Земли. Как показало теоретическое моделирование, устойчивая система таких токов может существовать только в жидком металлическом ядре, в котором происходит конвекция (перемешивание) расплавленного металла. Расположение конвективных потоков расплава и связанных с ними электрических токовых петель каким-то не до конца выясненным учеными образом контролируется вращением Земли, чем и объясняется близость ориентировки оси магнитного поля и оси вращения планеты. Западный дрейф магнитного поля Земли, как считают, связан с происходящим в жидком ядре систематическим смещением конвективных потоков и обуславливаемых ими электрических токовых петель в западном направлении: отдаленной аналогией этого процесса является происходящее в атмосфере перемещение циклонов и антициклонов. По современным данным магнитное поле Земли совершает один полный "оборот" примерно за 1600 лет. Магнитное поле, генерируемое электрическими токами в земном ядре, получило название "геомагнитного поля". Дополнительный вклад в реальное магнитное поле, регистрируемое у земной поверхности, вносят так называемые "магнитные аномалии", создаваемые сильномагнитными горными породами земной коры. Так как сильномагнитные горные породы распределены в земной коре очень неравномерно, то реальное магнитное поле имеет очень сложный характер. Горные породы мантии не вносят своего вклада в суммарное магнитное поле Земли – при тех температурах, которые царят в мантии, все магнитные минералы теряют ферромагнитные свойства.

ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Геомагнитное поле можно сравнить, правда, лишь в самом первом приближении, с магнитным полем помещаемого внутрь Земли гипотетического стержневого магнита, ось которого на $11,5^\circ$ отклонена от оси вращения планеты. Подобная магнитная модель земного шара была изготовлена Гильбертом. В действительности же модель с одним магнитом описывает геомагнитное поле примерно на 90% , а для более точного соответствия модели наблюдениям требуется ввести в нее еще несколько разноориентированных магнитов меньшей силы.

Силловые линии геомагнитного поля направлены по отношению к земной поверхности под разными углами: на магнитных полюсах они вертикальны, на магнитном экваторе – горизонтальны, а во всех остальных местах занимают промежуточное положение. Угол между силовыми линиями магнитного поля и земной поверхностью называется магнитным наклоением I . Магнитная стрелка, если она очень хорошо уравновешена, стремится установиться по силовым линиям магнитного поля, и с ее помощью можно определить магнитное склонение в том или ином пункте. В северном полушарии северный конец магнитной стрелки наклоняется вниз, а в южном полушарии – вверх. Напряженность геомагнитного поля меняется в разных точках земной поверхности: на магнитных полюсах она составляет около $0,7$ эрстед, а на магнитном экваторе – около $0,4$ эрстед.



О ЧЕМ ГОВОРИТ ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ

В XVIII веке появились новые фактические данные, позволившие ученым еще немного приподнять завесу таинственности над недоступными недрами нашей планеты. В первой половине столетия было установлено, что Земля имеет сплюснутую форму, а ускорение свободного падения закономерно уменьшается от полюсов к экватору. **Сплюснутая форма Земли свидетельствует о пластичности земных недр - наша планета приняла форму, соответствующую скорости своего осевого вращения**, правда, значение этого открытия было оценено учеными далеко не сразу.

В самом конце XVIII века Землю удалось "взвесить", или, точнее говоря, определить ее массу. Высокоточное определение массы Земли впервые выполнил Генри Кавендиш. Так как к тому времени размеры нашей планеты уже были хорошо известны, то нетрудно было рассчитать и ее среднюю плотность. Согласно Кавендишу средняя плотность Земли составляла - $5,45 \text{ г/см}^3$ (по современным данным - $5,52 \text{ г/см}^3$). Таким образом, **средняя плотность нашей планеты оказалась примерно в два раза выше, чем плотность горных пород, обычно встречаемых у ее поверхности. Это однозначно указывало на то, что внутренние области земного шара сложены каким-то весьма плотным веществом.** Заметим, что это как нельзя лучше согласовывалось с представлениями Галлея о существовании внутри земного шара крупного железного ядра.

В XIX веке были сделаны еще два очень важных открытия, проливающих свет на то, что происходит в глубоких недрах нашей планеты. В начале века было установлено, что **недра Земли находятся в очень горячем раскаленном состоянии** (более подробно об этом пойдет речь в разделе 4.2), а в середине столетия было открыто явление изостатического равновесия. Остановимся подробнее на этом явлении.

В районах крупных горных массивов можно ожидать, что значения ускорения свободного падения будут несколько выше, чем значения этой же величины, измеренные в равнинных районах, ведь в первом случае гигантская громада гор должна создавать дополнительный гравитационный эффект. Разумеется, следует сравнивать значения, измеренные на одной и той же географической широте и условно пересчитанные для одной и той же высоты над уровнем моря, так как величина ускорения свободного падения очень чувствительна к изменениям высоты и широты места наблюдения. Однако, оказывается, что значения ускорения свободного падения, измеренные в горных и равнинных районах с учетом поправки на высоту примерно одинаковы, **а следовательно избыток массы, представленный над уровнем моря в виде горных массивов должен каким-то образом компенсироваться "дефицитом массы" в глубоких недрах под горами.**

Впервые вышеупомянутый "дефицит массы" был обнаружен еще в середине XVIII века в Андах в ходе работ французской геодезической экспедиции под руководством Пьера Бугера (1698-1758). Спустя столетие руководитель британской геодезической службы в Индии Джордж Эверест (1790-1866), чьим именем названа высочайшая вершина мира, обнаружил подобный эффект в Гималаях, и это привлекло широкое внимание ученых.

Объяснить загадочный "дефицит массы" под крупными горными сооружениями удалось с помощью принципа изостатического равновесия, который в 1855 году одновременно и независимо друг от друга сформулировали английский астроном Джордж Эри и его соотечественник священник Пратт. **Согласно принципу изостатического равновесия внешняя твердая оболочка земного шара состоит из крупных блоков, "плавающих" в более плотном, но пластичном нижележащем материале, при этом каждый из блоков уравновешен в соответствии с законом Архимеда.** Заметим, что во многом взгляды Эри и Пратта различались. По мнению Эри, все "плавающие" блоки имеют одинаковую плотность, но различаются по толщине, а значит, чем толще блоки, тем выше они воздымаются (соответственно, тем глубже погружены и их нижние части). По мнению Пратта, блоки различаются по плотности, и, следовательно, они воздымаются тем выше, чем менее плотными породами сложены.

Позднее выяснилось, что принцип изостатического равновесия справедлив и для океанических районов. Так как толща воды легче, чем соответствующая толща горных пород, то можно ожидать, что ускорение свободного падения, измеренное в океанах на уровне водной поверхности, будет меньше, чем ускорение свободного падения, измеренное на том же уровне на континентах. В действительности же ускорение свободного падения, измеряемое над равниной и над морем, как правило, будет одинаковым, из чего следует, что **дефицит массы в океанических районах должен как-то компенсироваться ее избытком в глубоких земных недрах.**

В XIX веке не было возможности проверить, какая из двух теорий - Эри или Пратта - является верной, но по современным представлениям в природе реализуются оба варианта изостатического равновесия. Так, **океаны имеют поверхность дна ниже, чем поверхность континентов, потому, что породы океанической коры плотнее пород континентальной коры (принцип Пратта), а крупные горные системы возвышаются над средним уровнем континентов потому, что в горных регионах континентальная кора значительно толще, чем в равнинных (принцип Эри).** Во избежании путаницы особо подчеркнем, что согласно современным представлениям в пластичном материале "плавают" не блоки земной коры, а значительно более толстые блоки литосферы, верхняя часть которых представ-

лена материалом коры (континентальной или океанической), а нижняя-самым внешним твердым слоем мантии. Средой, в которой "плавают" блоки литосферы, являются мантийные породы, находящиеся в пластичном состоянии и образующие особую оболочку земного шара, называемую "астеносферой" (смотри рисунок на вводимом развороте к этой главе).

УМЕНЬШЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ОТ ПОЛЮСОВ К ЭКВАТОРУ

Сила тяжести на поверхности Земли является суммой силы притяжения, направленной к центру масс, и центробежной силы, направленной перпендикулярно оси вращения планеты. Вследствие своего вращения Земля имеет слегка сплюснутую форму, и экваториальный радиус нашей планеты на 21 км больше, чем полярный. Так как сила притяжения обратно пропорциональна квадрату расстояния, то она закономерно уменьшается от полюсов к экватору. В то же время центробежная сила, напротив, закономерно возрастает от полюсов, где она равна нулю, к экватору, где она максимальна. Оба вышеназванных эффекта ведут к уменьшению силы тяжести по направлению от полюсов к экватору. Ускорение свободного падения составляет на полюсах $9,83 \text{ м/с}^2$, а на экваторе - $9,78 \text{ м/с}^2$.

КАК ИЗМЕРИЛИ МАССУ ЗЕМЛИ

Массу земного шара M можно определить, зная его размеры и величину ускорения свободного падения g , измеренную на земной поверхности. Сила тяжести, действующая на находящееся на земной поверхности тело, имеющее массу m ,

$$F_{\text{тяж}} = mg$$

в первом приближении может быть приравнена к силе притяжения

$$F_{\text{прит}} = G \cdot Mm / R^2,$$

где G - гравитационная постоянная; R - расстояние между центрами тяжести объекта и Земли (фактически радиус Земли). Таким образом, для объекта, находящегося на земной поверхности,

$$mg \approx G \cdot Mm / R^2.$$

Из этого следует, что:

$$M \approx g \cdot R^2 / G.$$

Более точно массу Земли можно определить, если учесть вклад центробежной силы, или же на основе анализа орбитального движения Луны (см. раздел 2.1). Однако в любом случае для определения массы нашей планеты необходимо было каким-то образом установить значение гравитационной постоянной G . Для этого надо было измерить силу, с которой один объект с известной массой притягивает другой объект с известной массой. Вначале в качестве притягиваемого тела пытались использовать какую-либо гору, а в качестве притягиваемого - грузик от веса, устанавливаемого недалеко от ее подножья, но получаемые результаты были довольно неточными.

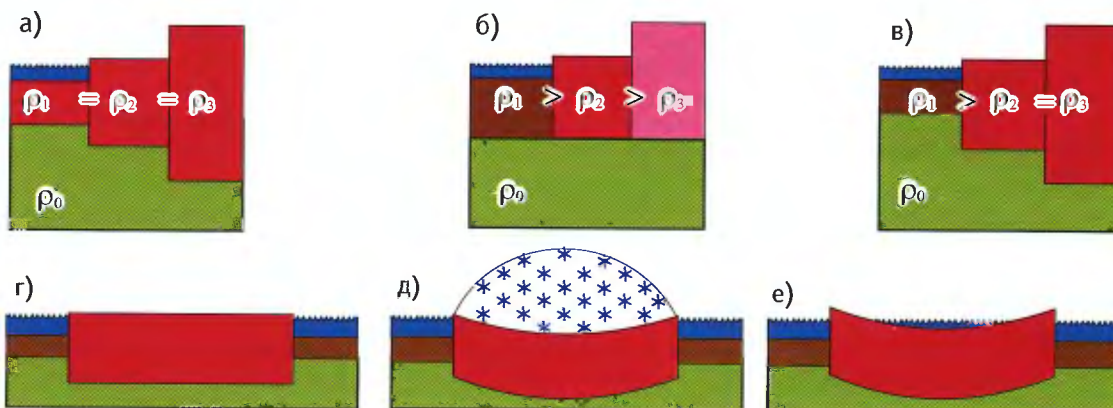
Иным путем подошел к решению этой проблемы Генри Кавендиш, который измерил гравитационную постоянную с помощью свинцовых шаров разной массы и крутильных весов - его опыт хорошо известен по школьному курсу физики. Эксперимент Кавендиша отличался поразительной точностью - найденное им значение гравитационной постоянной лишь немногим более чем на 1% отличалось от ныне принятого (по современным данным $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, $M = 5,976 \cdot 10^{27} \text{ г}$).

ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ ПО ЭРИ (а), ПО ПРАТТУ (б) И ПО СОВРЕМЕННЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯМ (в). ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ В РЕГИОНАХ, ОХВАЧЕННЫХ ПOKPOBНЫМ ОЛЕДЕНЕНИЕМ

В настоящее время практически все крупные участки земной поверхности находятся в состоянии изостатического равновесия. Вывести какой-либо участок из изостатического равновесия можно только, если каким-то образом нагрузить его большой дополнительной массой, или же, наоборот, снять с него часть нагрузки.

Такого рода эксперименты поставила сама Природа, причем в роли больших дополнительных масс, которыми были нагружены крупные регионы, выступали огромные материковые ледники. Так, Антарктида и Гренландия до наступления оледенения представляли собой обычные континентальные блоки с выравненным, в первом приближении, рельефом (г). Образовавшиеся в дальнейшем крупные ледовые покровы вдавливали литосферу, причем особенно сильно в центральных частях обоих регионов, где толщина ледника максимальна (д).

После таяния ледников изостатическое равновесие вновь нарушается и континентальные блоки начинают "выпрямляться" (е). В таком состоянии в настоящее время находится, например, Северная Европа, которая еще около 20 тысяч лет назад была покрыта крупным ледником. Балтийское море, по существу, является остатком гораздо более глубокой "вмятины", которая была в центре этого ледника.



НА ПОМОЩЬ ПРИХОДЯТ... ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

*"Облетел я воздух,
Окатился морем,
Осушился зноем
Над огнем вулканов
Прокопал до сердца
Глубины земные,
Что ж нашел я в безднах?"
Ф. Глинка*

К концу XIX - началу XX веков внутреннее строение земного шара по-прежнему оставалось загадкой для ученых. К этому времени было ясно лишь, что в центральной части нашей планеты существуют какие-то высокоплотные массы, что внутри земного шара есть зона, в которой генерируется магнитное поле, а также, что недра планеты очень горячие и в масштабе геологического времени весьма пластичные. Больше о глубинных недрах земного шара объективно не было известно ничего. Правда, почти все ученые сходились во мнении, что у Земли должно существовать высокоплотное центральное ядро, но представления о том, каковы его размеры, из какого материала оно сложено и в каком агрегатном состоянии оно находится, были очень противоречивыми. Это и неудивительно, ведь представления о внутреннем строении Земли оставались, в основном, чисто умозрительными.

Но на стыке двух столетий ситуация стала меняться - быстро развивавшиеся сейсмологические методы исследований открывали перед учеными принципиально новые возможности исследования земных недр. Сейсмологические работы, развернувшиеся во второй половине XIX века в разных странах мира, первоначально не имели отношения к проблемам внутреннего строения Земли, их целью были лишь регистрация и изучение землетрясений. Первые сейсмографы - приборы, регистрирующие колебания грунта, - были не очень чувствительными и могли зафиксировать только землетрясения, происшедшие в ближайших регионах. Однако, уже к концу XIX века сейсмографы были настолько усовершенствованы, что с их помощью стало возможным улавливать колебания, вызванные сильными землетрясениями, происходящими в любом районе мира.

Английский геолог Ричард Диксон Олдгэм (1858-1936) был одним из первых, кто понял, что открывается фантастическая возможность "рассмотреть" недра нашей планеты. Выяснилось, что сейсмические волны, возникающие при землетрясении, разбегаются от очага во все стороны, и если землетрясение было достаточно сильным, то они успевают пройти, не затухая, по всему объему планеты. Олдгэм установил, что во время землетрясений образуется несколько типов сейсмических волн, из которых наиболее важными для изучения строения недр планеты являются так называемые "продольные" и "поперечные" волны. Самая быстрая из сейсмических волн - "продольная" - ей нужно лишь двадцать минут, чтобы пересечь весь земной шар по его диаметру.

Олдгэм считал, что если бы земной шар был однороден, то скорость сейсмических волн была бы одной и той же по всему его объему, а, следовательно, интервал времени между моментом землетрясения и моментом его регистрации должен был быть прямо пропорционален длине пройденного волной пути, т.е. длине хорды, соединяющей очаг и сейсмостанцию. Если же земной шар неоднороден и внутри него "что-то есть", это должно было сразу изменить весь характер хода сейсмических волн. Заметим, что скорость сейсмических волн существенно зависит от того, через какую среду они распространяются, а на границах двух разных сред сейсмические волны, как и любые другие типы волн, испытывают такие явления, как преломление и отражение.

К тому времени XX века сеть сейсмических станций была уже достаточно густой, и Олдгэм, сопоставив записанные на разных станциях сейсмограммы одних и тех же землетрясений, смог в 1906 году убедительно показать, что наша планета имеет большое центральное ядро. Правда, размеры ядра Олдгэм определил неверно - в своих расчетах он исходил из предположения, что скорость сейсмических волн в пределах одной и той же среды остается постоянной. На самом деле это не совсем так - скорость сейсмических волн даже в однородной среде несколько увеличивается с глубиной, что связано с растущим сжатием горных пород. Спустя восемь лет немецкий геофизик Бено Гутенберг (1889-1960) исправил эту ошибку и определил, что граница ядра, впоследствии названная "поверхностью Гутенберга", находится на глубине 2900 км.

Примерно в то же время еще одна очень четкая сейсмическая граница была выявлена и вблизи от земной поверхности. Первоначально ее обнаружил в балканском регионе хорватский сейсмолог Андреа Мохоровичич (1857-1936). Позднее эта граница, отделяющая земную кору от мантии, была прослежена по всему земному шару. В континентальных регионах она обычно находится на глубине 35-40 км ниже уровня моря, а в океанических - на глубине 6-8 км ниже уровня океанического дна. Эта сейсмическая граница получила название "поверхности Мохоровичича" (из-за слож-

ности произношения фамилии первооткрывателя ее часто сокращенно называют "поверхность Мохо" или даже еще проще - "поверхность М").

Так, буквально в течение нескольких лет сейсмологические исследования позволили "увидеть", как устроена Земля внутри. Впервые было объективно установлено существование в теле планеты трех принципиально различных оболочек - земной коры, мантии и ядра, а также выявлены их пространственные параметры. Позднее, благодаря сейсмическим исследованиям удалось различить и более тонкие структуры в пределах главных внутренних геосфер: несколько концентрических зон в мантии, внешнюю и внутреннюю части в ядре. Было установлено также и то, что внешняя часть ядра - жидкая.

ПРОДОЛЬНЫЕ (а) И ПОПЕРЕЧНЫЕ (б) СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

В случае продольных волн частицы грунта или породы колеблются вдоль направления движения волны. При этом создаются участки сжатия и растяжения, распространяющиеся во все стороны от очага землетрясения. Такие волны можно рассматривать, как реакцию среды на изменение объема, а так как изменению объема сопротивляется вещество в любом агрегатном состоянии, то продольные волны распространяются и в твердой, и в жидкой, и в газообразной средах. Продольные волны являются, по существу, обычными звуковыми волнами.

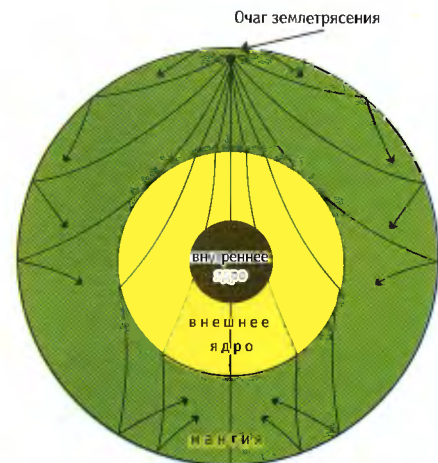
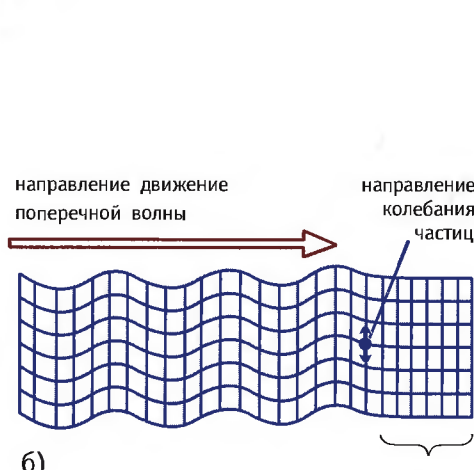
Поперечные волны представляют собой реакцию среды на изменение формы, поэтому они могут распространяться лишь в твердых телах (жидкости и газы изменению формы не сопротивляются). Частицы породы колеблются в направлении, перпендикулярном направлению движения волны. Вытекающая из рисунка аналогия поперечных волн с морскими чисто внешняя - в жидкой среде поперечные волны не распространяются. В начале века было установлено, что поперечные волны не проходят через центральную область нашей планеты - ее ядро, что свидетельствовало о его жидком (расплавленном) состоянии.

ХОД СЕЙСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВНУТРИ ЗЕМНОГО ШАРА

Распространение сейсмических волн в какой-либо среде удобнее представлять в виде схемы хода сейсмических лучей (сейсмическим лучом называется направление, в котором движется сейсмическая волна).

Кропотливый математический анализ сейсмологических данных, полученных при регистрации сильных землетрясений, позволил определить, какую скорость имеют сейсмические волны на разных глубинах внутри тела Земли, и построить так называемый "скоростной разрез Земли", т.е. график зависимости скорости сейсмических волн от глубины. Скоростной разрез Земли показан на вводном развороте этой главы. Помимо поверхности Мохоровичича и поверхности Гутенберга, где фиксируются наиболее резкие изменения скорости сейсмических волн, на скоростном разрезе выделяется еще несколько сейсмических границ. Наиболее важной из них является граница, разделяющая ядро на внешнее и внутреннее (на глубине 5100 км). Несколько слабых скачков скорости сейсмических волн фиксируются в мантии на глубинах от 400 до 1000 км, вероятно они обусловлены превращениями некоторых минералов в более плотные модификации. Между сейсмическими границами скорость волн возрастает с глубиной плавно, что связано с постепенным ростом плотности среды под действием возрастающего с глубиной давления. Очень важной особенностью, проявленной на скоростном разрезе, является так называемая "зона низких скоростей", открытая Бено Гутенбергом. Понижение скоростей сейсмических волн, хорошо выраженное на графике, объясняют тем, что породы в этой зоне частично расплавлены.

На основании скоростного разреза и некоторых допущений о химическом составе мантии и ядра, можно построить и плотностной разрез Земли, т.е. график зависимости плотности среды от глубины. Это возможно, т.к. скорость сейсмических волн связана, хотя и довольно сложным образом, с плотностью среды, через которую они проходят. В целом, скорость сейсмических волн тем выше, чем плотнее упаковки атомов и чем меньше средний атомный вес среды. Плотностной разрез Земли также показан на вводном развороте этой главы.



ОГРОМНАЯ КАПЛЯ РАСПЛАВЛЕННОГО ЖЕЛЕЗА

*"Не говори мне: Шар Земной,
скажи точнее: Шар Железный..."*
К. Бальмонт

Сейсмологические исследования, развернувшиеся в начале XX века, позволили не только уверенно "разглядеть" земное ядро, но и определить его агрегатное состояние. Оказалось, что поперечные сейсмические волны, которые могут распространяться только в твердой среде, не проникают ниже границы Гутенберга. Из этого следовало, что породы, слагающие мантию находятся в твердом состоянии, а расположенное ниже ядро должно быть жидким.

У большинства геологов и геофизиков почти никогда не было сомнений, что **ядро нашей планеты состоит в основном из железа**, причем это представление в настоящее время никак не связано с наличием у Земли сильного магнитного поля. Напомним, что Земля является не магнитом, а электромагнитом, и геомагнитное поле, в принципе, существовало бы и в случае, если бы ядро состояло не из железа, а из какого-нибудь другого расплавленного металла. Представление о том, что ядро нашей планеты именно железное, прежде всего опирается на тот факт, что, **судя по составу метеоритов и солнечному спектру, железо - единственный широко распространенный в природе достаточно тяжелый химический элемент, который мог бы быть ответственным за существование у Земли массивного плотного ядра**. Кроме того, теоретически рассчитанная скорость сейсмических волн, которая должна наблюдаться в жидком железе при соответствующих давлениях, в первом приближении совпадает с реально наблюдаемой в ядре.

Но каким образом в центре Земли могла появиться такая гигантская "капля" расплавленного железа? Гипотезы гетерогенной и гомогенной аккреции отвечают на этот вопрос по-разному. Согласно гипотезе гетерогенной аккреции, ядро образовалось в результате аккреции металлических планетезималей на ранней стадии формирования планеты и сначала было твердым. Затем оно "обросло" мантией, сформировавшейся преимущественно из каменных планетезималей. Жидким же ядро стало несколько позднее, расплавившись при разогреве недр нашей планеты. Согласно гипотезе гомогенной аккреции, ядро образовалось в результате расплавления металлических частиц в первоначально однородно перемешанном каменно-металлическом шаре и последующего "стекания" этого расплава к центру планеты. Ядро, таким образом, должно было быть изначально расплавленным. Какая бы из двух гипотез аккреции Земли ни была верной, **жидкое расплавленное металлическое ядро, по-видимому, существовало у нашей планеты уже на самых ранних этапах ее истории**.

В настоящее время известно, что земное ядро не целиком жидкое. Еще в 1936 году сотрудница Копенгагенской сейсмологической обсерватории Инге Леманн установила, что **внутри жидкого ядра, в самом центре планеты, находится небольшое твердое внутреннее ядро**. Радиус внутреннего ядра почти в три раза меньше, чем радиус внешнего (0,19 и 0,55 радиуса всей Земли, соответственно). Не приходится сомневаться, что внутреннее ядро тоже состоит, в основном, из железа. Так как оно находится в "самом глубоком месте планеты", т.е. в ее центре, то оно заведомо должно быть более плотным, чем железный расплав, в котором оно "утонуло", а судя по метеоритам, в природе нет широко распространенных веществ, более плотных, чем само железо.

Как же могло образоваться внутри большого жидкого ядра еще и маленькое твердое? Считается, что по мере остывания первоначально полностью или почти полностью расплавленного ядра, в нем начали образовываться кристаллики железа, которые, будучи тяжелее жидкого расплава, "тонули" под действием гравитации к центру ядра. Постепенно накапливаясь, они и образовали твердое внутреннее ядро. Этот процесс, правда, шел и продолжает идти чрезвычайно медленно, т.к. огромная каменная мантия выступает в роли прекрасного теплоизолятора для расплавленного ядра. К настоящему времени кристаллизовалось лишь около 5% расплава (т.е. масса внутреннего ядра составляет лишь около 5% от общей массы ядра). В конечном счете, по мере потери тепла, все ядро станет твердым, но прежде чем это произойдет, пройдут еще многие миллиарды лет.

Конечно, земное ядро представляет собой отдельную изолированную часть нашей планеты, которая с самых ранних этапов истории Земли "живет" своей очень обособленной "жизнью". Тем не менее процессы, происходящие в ядре, все же оказывают влияние на более внешние земные оболочки. Так, именно в ядре генерируется геомагнитное поле. Не исключено, что ядро источает устремляющийся к земной поверхности поток различных газов (этот вопрос рассмотрен в разделе 5.6). И, наконец, на протяжении всей геологической истории ядро вносит свой вклад в генерацию тепла в недрах Земли: формирование внутреннего ядра происходит в результате кристаллизации расплава, а, как известно из физики, кристаллизация любой жидкости сопровождается выделением тепла.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ЯДРА

Хотя вещество внешнего и тем более внутреннего ядра недоступно для прямых исследований, но у ученых есть все основания считать, что эти две самых внутренних оболочки земного шара различаются не только по своему агрегатному состоянию, но и по особенностям химического состава. Как отмечалось в предыдущем разделе, зная скорость сейсмических волн на разных глубинах, можно с некоторыми допущениями определить и плотность среды, через которую эти волны распространяются. В свою очередь, с учетом поправки на сжатие за счет давления, по плотности среды можно в какой-то мере судить о ее составе.

Так, расчеты показывают, что плотность металлического расплава во внешнем ядре на границе с мантией составляет $9,9 \text{ г/см}^3$, в то время как если бы расплав состоял из чистого железа, то при этом давлении он имел бы плотность около $10,6 \text{ г/см}^3$. Этот недостаток плотности можно объяснить только вхождением в состав внешнего ядра какого-либо более легкого, чем железо, химического элемента. Распространенность химических элементов в метеоритах и особенности их поведения в природных процессах позволяют считать, что легким разбавителем во внешнем ядре, скорее всего, является сера (в виде сульфида FeS), или кислород (в виде окисла FeO). Содержание легкого элемента-разбавителя во внешнем ядре должно составлять около 15%.

Плотность внутреннего ядра оценивается на основании сейсмологических данных в $12,5 \text{ г/см}^3$, что, наоборот, несколько выше, чем расчетная плотность чистого железа при соответствующем давлении. Это указывает на присутствие в составе внутреннего ядра какого-то более тяжелого, чем железо, элемента. Судя по распространенности химических элементов в метеоритах, единственным претендентом на эту роль может быть никель. Т.к. плотность внутреннего ядра оценена не очень точно, то и содержание никеля в нем известно лишь примерно - предполагается, что оно составляет около 20%. В любом случае, твердое внутреннее ядро отличается от расплавленного внешнего гораздо более высоким содержанием никеля и почти полным отсутствием легкого элемента.

Но почему внешнее и внутреннее ядро имеют такие различия в своем химическом составе? Оказывается, согласно законам физической химии, в расплавах, состоящих из многих компонентов, при их остывании происходит так называемая "фракционная кристаллизация": первоначально выделяющиеся кристаллы отличаются по своему составу от состава самого расплава. Расплав же, из которого первоначально состояло жидкое ядро, являлся многокомпонентным: он представлял собой смесь железа, какого-либо из легких элементов (серы или кислорода в связанном виде) и некоторого количества никеля. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в расплавах, представляющих смесь Fe-FeS-Ni или смесь Fe-FeO-Ni , первоначально выделяются кристаллы железа с очень высокой примесью химически близкого ему никеля. Таким образом, по мере роста внутреннего ядра никель все больше и больше сосредотачивался именно в нем, в то время как легкий разбавитель (FeS или FeO) оставался в расплавленном внешнем ядре. Это и предопределило особенности химического состава внутреннего и внешнего ядра.

Со временем из расплава будет "вычерпан" весь никель, и расплав будет состоять только из железа и легкого разбавителя. Это произойдет, когда масса внутреннего ядра достигнет примерно до 30% от общей массы ядра. В конечном счете кристаллизуется весь расплав и, таким образом, эволюция ядра завершится: все ядро будет твердым, но по химическому составу оно по-прежнему будет разделяться на внутреннюю железо-никелевую (Fe-Ni) и внешнюю железо-сульфидную (Fe-FeS) или железо-оксидную (Fe-FeO) части.

КОНВЕКЦИЯ ВО ВНЕШНЕМ ЯДРЕ И ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Как уже отмечалось в разделе 3.1, система электрических токовых петель, ответственных за существование геомагнитного поля, может быть устойчивой только в том случае, если в жидком ядре Земли происходит конвекция расплавленного металла. Вопрос о том, каким именно образом конвективное перемешивание металлического расплава приводит к образованию токовых петель, весьма сложный и выходит за рамки этого курса. Здесь же ограничимся лишь замечанием, что не следует путать сами конвективные потоки (направленное перемещение масс) с электрическими токами (направленным перемещением зарядов).

Первопричиной происходящей во внешнем ядре конвекции большинство ученых считают рост внутреннего ядра. Действительно, после образования железо-никелевого кристаллика непосредственно окружающий его расплав оказывается обеднен никелем, а следовательно его плотность уменьшается, и эта обедненная никелем "капля" расплава устремляется вверх, в то время как новообразованный более плотный кристаллик устремляется вниз. Образование железо-никелевых кристаллов происходит непрерывно и по всему объему расплава, что и поддерживает во внешнем ядре интенсивную конвекцию.

Быстрое вращение земного шара вокруг своей оси каким-то образом упорядочивает происходящую в ядре конвекцию, а следовательно и систему обусловленных ею электрических токов. В этой связи интересно отметить, что у Венеры, которая, судя по ее средней плотности, имеет почти такое же по размерам ядро как и Земля, магнитного поля практически нет. Вероятно, это связано с тем, что Венера чрезвычайно медленно вращается вокруг своей оси, вследствие чего конвекция в ее ядре носит хаотический характер, а значит внутри венерианского ядра нет и устойчивой системы электрических токов, которые могли бы генерировать сильное магнитное поле. Магнитного поля практически нет и у Марса, хотя эта планета вращается вокруг своей оси почти так же быстро, как и Земля. Однако марсианское ядро по своим размерам значительно меньше, чем ядро Земли или Венеры, и, по-видимому, оно уже в значительной мере или даже полностью затвердело, а следовательно в нем и не может происходить интенсивной конвекции.

МАНТИЯ И КОРА - КАМЕННАЯ ЧАСТЬ ПЛАНЕТЫ

"И в небе, и в земле сокрыто больше,
Чем снится вашей мудрости, Горацио."
В. Шекспир

Мантией называется наиболее значительная оболочка земного шара, расположенная между поверхностями Мохоровичича и Гутенберга, на которую приходится примерно 68% от общей массы и 83% от общего объема нашей планеты. Вплоть до пятидесятих годов XX века высказывались весьма разнообразные суждения о ее химическом составе, но затем, по мере утверждения современной небулярной гипотезы происхождения Солнечной системы, большинство ученых стало считать, что **общий состав мантии должен соответствовать каменной фазе хондритовых метеоритов.** Действительно, если исходить из модели гомогенной аккреции, то Земля изначально представляла собой шар, образованный из однородно перемешанных хондритовых и железных планетезималей, но по мере разогрева недр планеты, металлическое вещество расплавилось и "стекло" к центру Земли, а оставшийся силикатный материал планетезималей образовал первичную мантию. Если же исходить из модели гетерогенной аккреции, то мантия просто образовалась из хондритовых планетезималей, поэтому она заведомо должна иметь хондритовый состав. В ходе разогрева земных недр, происходившего за счет распада радиоактивных элементов, должна была произойти и "доочистка" хондритовой мантии от металлических частиц, которые расплавились и "стекли" к уже существовавшему металлическому ядру.

В отличие от ядра мантия никогда не была полностью расплавлена. Если бы мантия когда-либо была полностью расплавлена, то по мере остывания и кристаллизации в ней минералов, она бы расслоилась на несколько концентрических оболочек совершенно различного состава: наиболее тяжелые минералы, например, пироксены и оливины, осели бы вниз, в то время как сравнительно легкие, такие как полевые шпаты, наоборот, "всплыли" бы вверх. Однако, как выяснилось, мантия довольно однородна по всему своему объему - установленный на основе сейсмологических данных рост плотности мантийных пород с глубиной согласуется с тем, как должно было бы себя вести одно и то же вещество по мере увеличения давления.

Хотя мантия никогда не была расплавленной полностью, по-видимому, в ней всегда имелись участки, находившиеся в частично расплавленном состоянии. **Геофизические данные убедительно свидетельствуют, что в настоящее время практически по всему земному шару в среднем на глубинах от 80-120 до 200-350 км существует слой, в котором мантийные породы частично расплавлены ("зона низких скоростей").** Доля расплава в этом слое, правда, сравнительно невелика и составляет по современным оценкам около 1%. В некоторых же локальных зонах в верхних слоях мантии образуются крупные магматические очаги, в которых доля расплава может быть значительно больше. Образовавшаяся здесь магма по крупным разломам поступает в самые приповерхностные слои и непосредственно на земную поверхность. Кристаллизуясь, эти мантийные по своему происхождению магмы дают начало первичным магматическим породам земной коры.

Земная кора, таким образом, сформировалась из мантийных вылавок и, по существу, является дочерним по отношению к мантии образованием, поэтому традиционное разделение земного шара на ядро, мантию и кору несколько маскирует реальные взаимоотношения между оболочками нашей планеты. Выделение коры в качестве объекта такого же ранга как мантия не соответствует и ее количественной роли - масса коры почти в сто раз меньше, чем масса мантии. Более верно было бы выделять в качестве главных не три, а только две оболочки: внутреннюю металлическую (ядро) и внешнюю каменную (мантия + кора). Впрочем, едва ли правомерно вообще говорить о коре как о единой оболочке. По существу, **земная кора состоит из двух не похожих друг на друга геологических образований - коры океанической и коры континентальной, которые резко различаются по составу, мощности (т.е. толщине), степени деформации и даже возрасту горных пород.**

Каменная часть планеты разделяется учеными на отдельные оболочки не только на основании различий в химическом составе, но и по различиям в механических свойствах горных пород. По этому принципу выделяются:

- литосфера ("каменная" сфера) - твердая и сравнительно жесткая внешняя оболочка, объединяющая кору и верхние слои мантии. В континентальных районах литосфера значительно толще (от 100 до 200 км), чем в океанических (в среднем 70-80 км), поэтому иногда говорят о континентальной и океанической литосфере;

- астеносфера ("ослабленная" сфера) - расположенная под литосферой пластичная оболочка, нижняя граница которой находится в среднем на глубине 400 км, иногда опускаясь до 700 км. Астеносфера в первом приближении может быть отождествлена с зоной частично расплавленных пород, устанавливаемой по сейсмологическим данным ("зоной низких скоростей");

- мезосфера ("средняя" сфера) - вся остальная часть мантии, расположенная ниже астеносферы

ры. Не совсем удачное название "средняя" подразумевает расположение этой сферы между верхними оболочками и ядром. Вещество мезосферы не столь пластичное как в астеносфере, но и не столь жесткое как в литосфере. Мезосфера охвачена медленными конвективными движениями составляющего ее твердого мантийного материала. Существующие представления о характере мантийной конвекции весьма разнообразны, но сам факт этого явления в настоящее время не вызывает сомнения.

Заметим, что сравнительно жесткая литосфера отнюдь не представляет собой что-то застывшее и неизменное. Напротив, в ней постоянно происходят крупномасштабные перемещения огромных масс горных пород. Такого рода движения, осуществляющиеся в литосфере, называются тектоническими движениями, а наука их изучающая - тектоникой. **Литосфера, по-существу, находится в постоянном движении**, что, на наш взгляд, является ее наиболее важным и наиболее интересным свойством. Обзор представлений о характере и причинах, происходящих на нашей планете поистине исполинских тектонических движений, является столь важной и обширной темой, что ей посвящена вся следующая глава.

КОРА - ПОРОЖДЕНИЕ МАНТИИ

Согласно законам физической химии, при нагревании многокомпонентных твердых смесей, типичными примерами которых являются состоящие из различных минералов горные породы, первоначально появляющиеся расплавы отличаются по своему химическому составу, как от состава смеси в целом, так и от состава отдельных минералов. Иными словами, когда порода начинает плавиться, то плавится не отдельный самый легкоплавкий минерал, а сразу несколько, при этом разные химические элементы будут переходить из твердых фаз в расплав с различной скоростью.

Если какая-либо горная порода будет расплавлена полностью, то, естественно, состав расплава будет идентичен ее составу. Однако если порода будет расплавлена лишь частично, то состав расплава будет порой очень существенно отличаться и от ее исходного состава, и от состава нерасплавленного остатка. Первые расплавы, выплавляющиеся из исходного мантийного материала, который иногда называют "пиролитом", обогащены по сравнению с ним такими химическими элементами как кремний, алюминий, кальций, натрий и калий. Этими же элементами, соответственно, "истощен" нерасплавленный остаток, т.н. "истощенный" пиролит. Железо переходит в расплав примерно в той же пропорции, в какой оно находится в исходном пиролите, а магний переходит в расплав очень медленно, и он в основном остается в нерасплавленном остатке.

Расплав, существенно отличающийся по химическому составу от исходного пиролита, затем поднимается к земной поверхности, где и кристаллизуется, образуя первичные породы земной коры. В дальнейшем эти породы могут уже сами подвергнуться частичному плавлению, и расплавы второго поколения будут еще более отличаться от исходных мантийных пород.

В случае континентальной коры отличие состава пород от состава первичного мантийного материала намного резче, чем в случае океанической коры. Процессы частичного плавления в мантии, которые привели к формированию двух разных типов коры, должны были протекать существенно разными способами. Диаграммы средних химических составов мантии и двух типов коры приведены на вводном развороте этой главы.

ДВА ТИПА ЗЕМНОЙ КОРЫ

Океаническая кора занимает около 60%, а континентальная - около 40% земной поверхности, что заметно отличается от распределения площади океанов и суши - 71% и 29%, соответственно. Это связано с тем, что мелководные моря, примыкающие к берегам материков, представляют собой просто затопленные краевые части крупных блоков континентальной коры.

Океаническая кора сравнительно тонкая - ее толщина, или как принято говорить в геологии - мощность, составляет всего 6-8 км. Континентальная кора обычно имеет мощность 35-40 км, а в некоторых случаях даже 70 км и более. В строении земной коры выделяется кристаллический фундамент и приповерхностный чехол осадочных пород. Кристаллический фундамент океанической коры сложен магматическими породами, причем очень однообразными (в основном, базальтами), тогда как у континентальной коры он представлен магматическими и метаморфическими породами очень разнообразного состава (правда, среди них резко преобладают гранитоиды - т.е. граниты и близкие к ним по составу породы). Различие в составе пород, слагающих континентальную и океаническую кору, наглядно проявляется в их разной средней плотности - 2,8 г/см³ и 3,0 г/см³, соответственно. Резко различаются у двух типов коры и осадочные чехлы. У океанической коры чехол развит практически повсеместно, но мощность его невелика - как правило, несколько сотен метров. Напротив, у континентальной коры чехол прерывистый, но зато там где он есть, его мощность нередко составляет несколько километров.

Породы океанической коры с момента своего образования почти не подвергались сколь-либо существенным изменениям и деформациям. Напротив, породы континентальной коры могли неоднократно переплавляться, испытывать глубокую химическую переработку, механически разрушаться под действием эрозии, переоткладываться в виде осадочных пород, а также подвергаться самым разнообразным и очень интенсивным разрывным и пластическим деформациям.

Особенно неожиданным является резкое различие возраста горных пород двух типов коры. Океаническая кора характеризуется возрастом пород, не превышающим 180 миллионов лет, тогда как самые древние породы на континентах имеют возраст, приближающийся к четырем миллиардам лет.