

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

551.1

ЗЕМНАЯ МАНТИЯ *)

П. Уайли

Под этим понимают огромный раскаленный слой, составляющий около 83% объема и 67% массы Земли. Хотя пока мантия и недоступна для непосредственного изучения, многое уже понято посредством косвенных методов.

Мантией Земли называют толстый сферический слой раскаленного вещества, расположенный между металлическим и частично расплавленным ядром и значительно более холодной и тонкой корой. Начинаясь

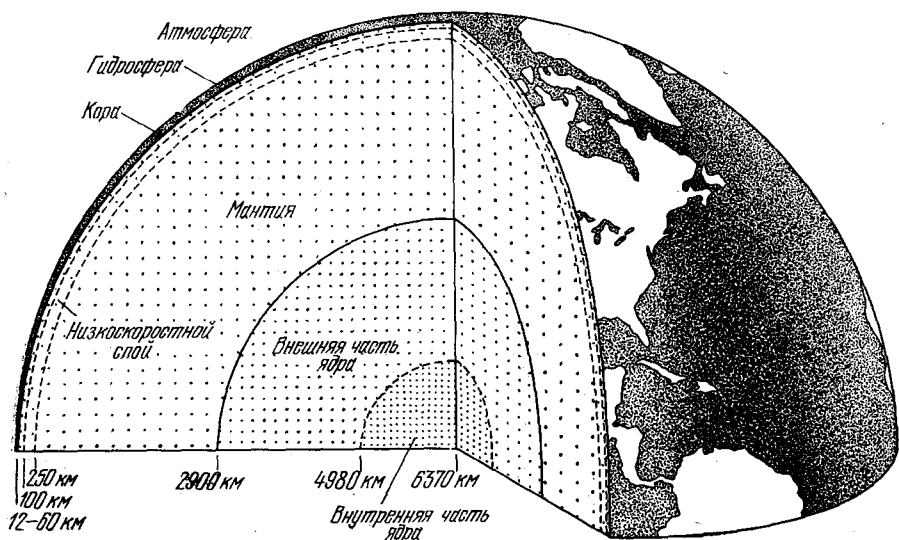


Рис. 1. Статическая слоистая структура Земли без учета динамических процессов. В тонком поверхностном слое — коре — порода холодная и твердая. Горячая порода мантии может медленно смещаться. Характер распространения сейсмических волн указывает на то, что внешняя часть ядра состоит из расплавленного металла. Гидросфера состоит из воды на поверхности и в атмосфере.

в 35—45 км от поверхности Земли и простираясь до глубины порядка 2900 км, мантия охватывает почти половину земного радиуса. На нее приходится около 83% объема и 67% всей массы Земли. Значительное

*) Peter J. Wyllie, The Earth's Mantle, Scientific American 232 (3), 50 (March 1975). Перевод И. И. Ройзена.

П. Уайли — профессор петрологии и геохимии Чикагского университета, США.

© Scientific American, Inc., 1975.

© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука»

влияние мантии на земную кору несомненно. По существу, сама кора и ее тонкий поверхностный слой — океаны и атмосфера — являются дистиллятами мантии, которая ответственна также и за силы, вызывающие медленное перемещение континентов. Поэтому очевидно, что изучение мантии необходимо для понимания строения и динамических свойств

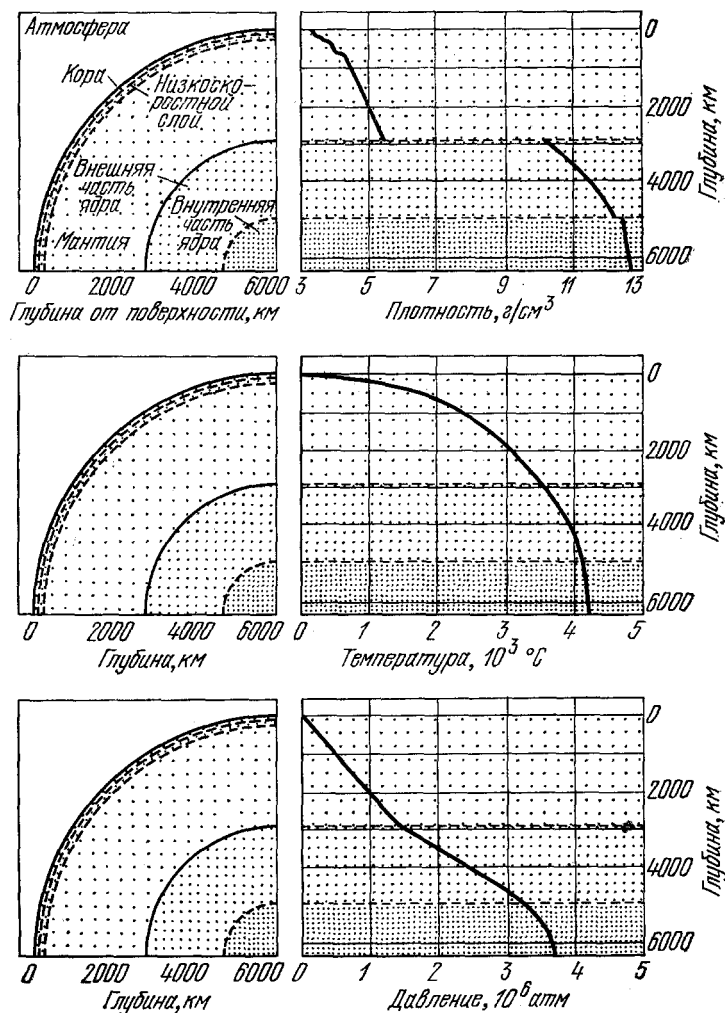


Рис. 2. Изменение физических свойств Земли по мере удаления вглубь от поверхности. В левом столбце показана зависимость плотности, температуры и давления от глубины.

земной поверхности. Несмотря на то, что мантия пока недоступна для непосредственного изучения, о ней уже накоплена значительная информация, базирующаяся на применении различных косвенных методов исследования.

Влияние мантии на поверхность Земли весьма разнообразно. К примеру, в течение $4,6 \cdot 10^9$ лет со времени образования Земли в Солнечной системе плавление наименее жаропрочных составляющих мантии приводило к извержению лавы, которая, попав на поверхность, застывала, меняя при этом саму поверхность. Вместе с лавой выбрасывались пары воды и других газов, которые попадали в атмосферу и оседали в океанах.

В частности, извергаемые мантией газообразные углеродистые соединения положили начало жизни на Земле, поскольку они обеспечили материал, необходимый для образования органических молекул.

Процессы, происходящие в мантии, лежат в основе разнообразных поверхностных явлений. Прежде всего, из-за медленного движения мантии деформируется сама поверхность Земли. Благодаря этому образовались и существуют горы. Без постоянного «давления» снизу эрозия сравняла бы их с уровнем моря еще около ста миллионов лет тому назад. Движением мантии обусловлена также вулканическая активность, землетрясения и дрейф континентов.

На рис. 1 показана Земля в разрезе. Мы видим концентрические слои, отвечающие ядру, мантии и коре. Они различаются химическим составом, физическим состоянием, или же тем и другим. Мантия состоит из силикатных минералов, обогащенных магнием и железом, содержание которых в среднем таково же, что и в горном перидотите. (Это название объясняется тем, что наиболее распространенным минералом в перидотите является оливин, более известный как прозрачный зеленый драгоценный камень — перидот.) Мантия в целом твердая, однако в сравнительно тонком слое от 100 до 250 км под поверхностью Земли она может быть частично расплавлена. Здесь вещество состоит из зерен твердых минералов, перемежающихся с тонкими жидкими пленками. Эту зону называют низкоскоростным слоем по причинам, которые станут очевидны ниже.

С глубиной плотность мантии возрастает от $3,5 \text{ г/см}^3$ вблизи поверхности до $5,5 \text{ г/см}^3$ около ядра Земли. Это возрастание не является вполне плавным. На рис. 2 видна специфическая нерегулярная зависимость плотности от глубины вблизи 400 и 650 км. Показанная на рис. 2 кривая плотности мантии служит основой для оценки доли содержащейся в ней массы Земли (до 67%).

ТЕКТОНИКА ПЛАСТОВ

Обрисованная выше статическая картина концентрического слоистого строения Земли не является полной. Необходимо учитывать также тектоническую активность (перемещение) пластов литосферы (рис. 3). Последняя включает кору и часть поверхностного слоя мантии и отличается от расположенной под ней астеносферы более низкой температурой и, следовательно, большей твердостью. Теория тектонических пластов призвана описывать динамические свойства подвижной части мантии, т. е. пластов литосферы толщиной порядка 100 км, движущихся непосредственно над астеносферой. Эти пласты перемещаются друг относительно друга, и вблизи их краев концентрируются тектонически активные области: здесь часто бывают землетрясения и извержения вулканов.

Границы пластов могут как сходиться, так и расходиться. Под гребнями подводных горных цепей астеносфера поднимается, по мере этого плавясь и образуя лаву, которая извергается в центральную рифтовую долину горной гряды и пополняет собой земную кору. Конвективные течения в мантии расталкивают пласты. При этом образуется новая литосфера.

Там, где пласты сталкиваются, кора вспучивается и образуются горы. Либо же в этих местах один пласт уходит под другой, возвращая часть литосферы в мантию. Таким образом постоянно поддерживается баланс общего количества литосферы. Для этих районов характерны глубоководные впадины и вулканические гряды, включающие архипелаги вулканических островов и действующие вулканы.

Многие свойства Земли как целого сейчас уже хорошо изучены. Ее размер, форма и масса известны с большой точностью. Отсюда вычисле-

на средняя плотность земного вещества. Она равна $5,5 \text{ г/см}^3$, т. е. значительно выше, чем плотность породы, образующей земную кору. Следовательно, значительная часть глубинных областей Земли должна состоять

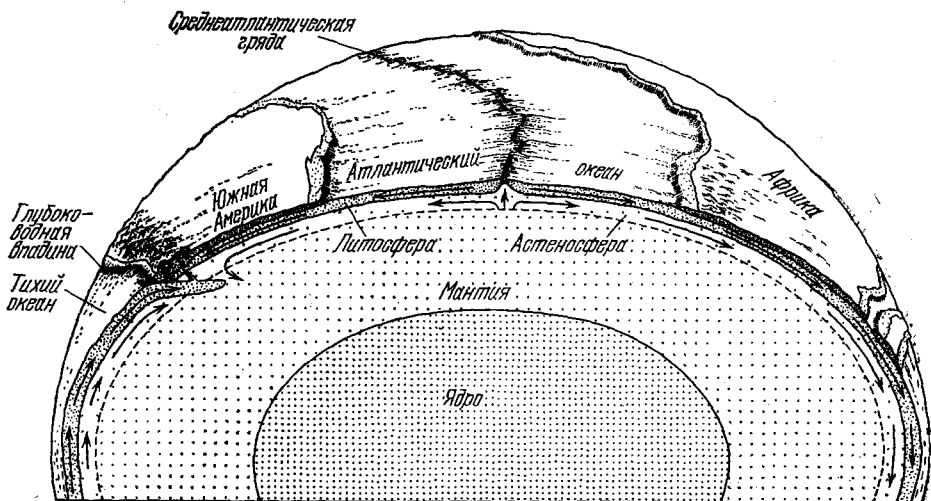


Рис. 3. Динамические процессы, протекающие в Земле, показаны в разрезе так, как они мыслятся в теории тектонических пластов.

Пласты литосферы, включающие кору и часть верхней мантии, перемещаются над астеносферой, которая представляет собой горячий и, по-видимому, частично расплавленный слой мантии. Под вершинами глубоководных хребтов астеносфера вспучивается, плавясь и извергаясь в виде лавы, из которой образуется новая кора на дне океана. По ходу этого процесса пласты старой литосферы расходятся. Появление новой литосферы уравнивается ее уменьшением за счет погружения в мантию на границах сходящихся пластов. С этими границами связаны океанские впадины и вулканические гряды.

из вещества с плотностью, большей чем $5,5 \text{ г/см}^3$. Изучение гравитационного поля Земли и физических свойств вращающейся сферы указывает на то, что плотность возрастает по мере приближения к центру.

ЧТО ГОВОРIT О СУЩЕСТВОВАНИИ МАНТИИ?

Основная информация о физике Земли связана с изучением землетрясений и их распространения вдоль земной поверхности. При сильном землетрясении Земля звенит подобно колоколу, и так же, как звучание колокола зависит от его формы и физических свойств, так и колебания почвы, регистрируемые высокочувствительными приборами, приносят сведения о физических свойствах Земли.

Энергия, выделяющаяся в эпицентре землетрясения, порождает волны различных типов. Как первичные, или *P*-волны, так и последующие, или *S*-волны, распространяются сквозь толщу Земли. Их характер свидетельствует о том, что механизм передачи энергии при этом не одинаков. Первые — это волны сжатия и разрежения, т. е. продольные волны, вторые — волны «встряски» (вибрации), т. е. поперечные волны (рис. 4). *P*-волны могут распространяться как в твердом теле, так и в жидкости, в то время как *S*-волны могут распространяться только в таких средах, которые способны передавать поперечные напряжения, т. е. реагирующих на деформацию или изгиб. Поэтому *S*-волны не могут существовать в жидкости, так как последняя из-за текучести не «запоминает» поперечных смещений.

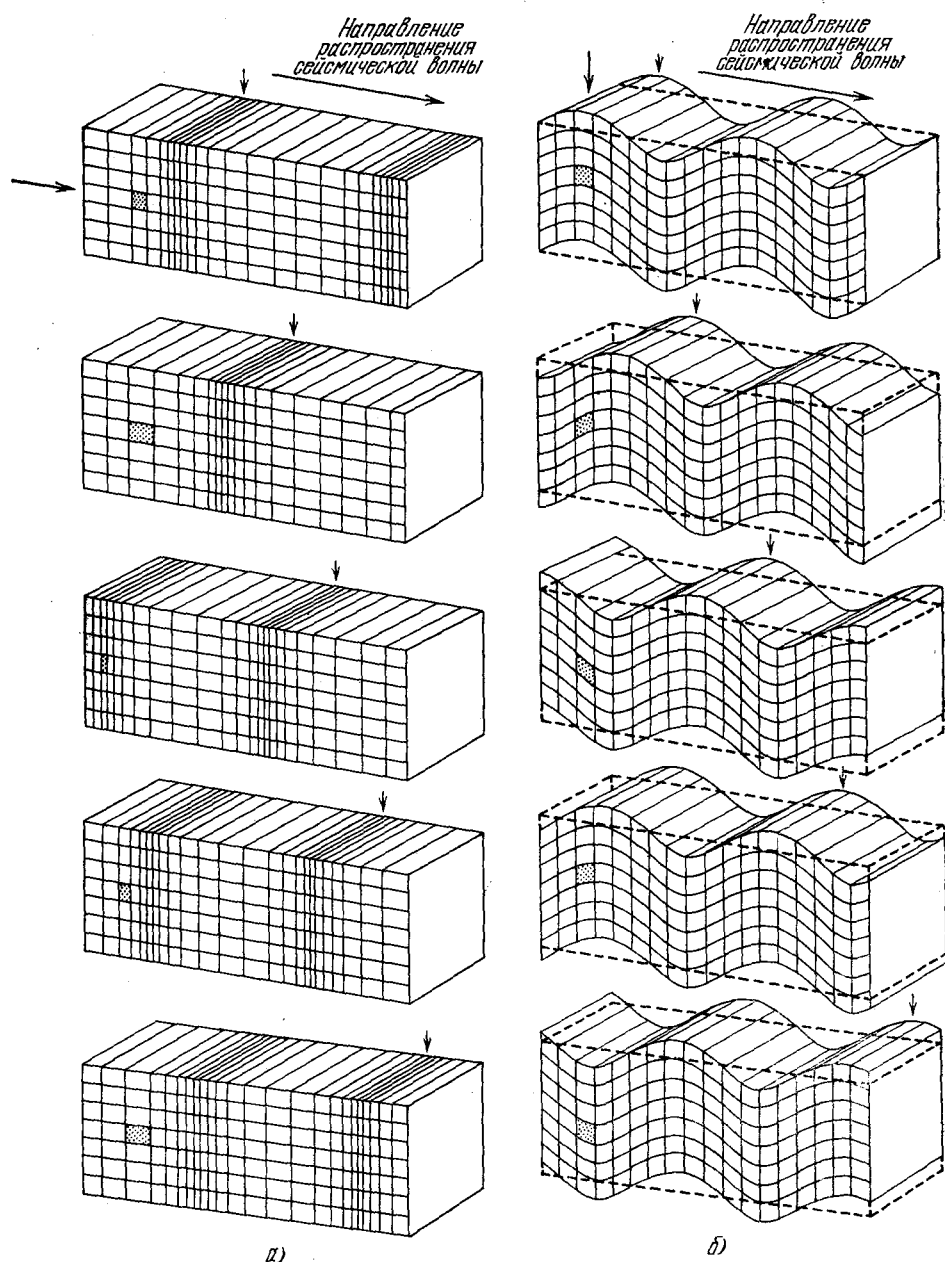


Рис. 4. Сейсмические волны двух типов, распространяющиеся сквозь толщу Земли от эпицентра землетрясения.

Слева — схема волн сжатия (Р-волн), при прохождении которых вещество деформируется (сжимается и растягивается) в направлении распространения волны. Справа — схема волны сдвига (S-волн), которые характеризуются тем, что давление действует по нормали к линии распространения. В результате порода вибрирует.

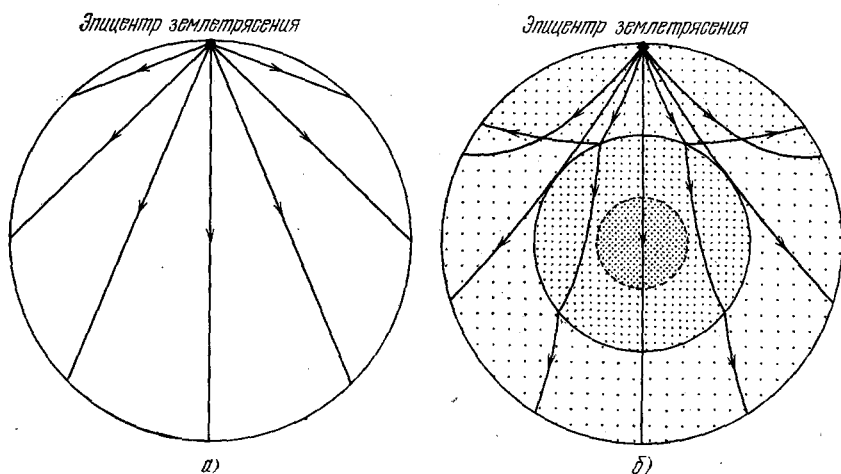


Рис. 5. Сейсмические волны, распространяющиеся сквозь толщу Земли, служат источником информации о структуре и физических свойствах концентрических слоев.

Из эпицентра землетрясения энергия передается во всех направлениях. Если бы Земля была однородной, то сейсмические волны распространялись бы прямолинейно с постоянной скоростью (а). Однако измерения времени распространения показывают, что скорость сейсмических волн, а, следовательно, и физические свойства вещества на определенных глубинах скачкообразно изменяются (б). Этим подтверждается слоистая структура Земли. *P*-волны распространяются как в твердых телах, так и в жидкостях. *S*-волны в жидкости распространяться не могут. Они не проходят сквозь ядро Земли, что указывает на то, что по крайней мере его внешняя часть находится в жидком состоянии.

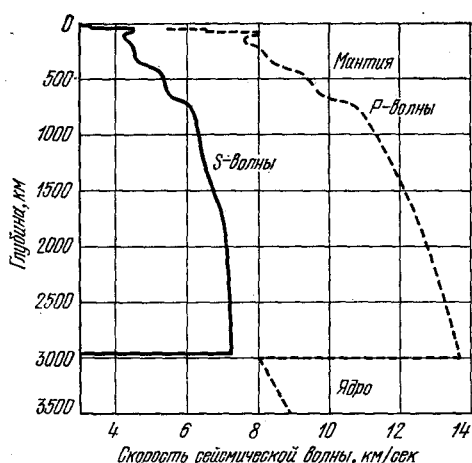


Рис. 6. Профиль скоростей сейсмических волн *S*- и *P*-типов в мантии.

Из-за возрастания давления и температуры скорости, вообще говоря, зависят от глубины, однако ступенчатый характер профиля от поверхности до глубин порядка 1000 км обусловлен изменениями физических свойств мантии. Уменьшение скорости в интервале от 100 до 250 км, по-видимому, объясняется присутствием частично расплавленной породы, что согласуется с представлением о подвижности астеносферы в модели тектонических пластов.

Если бы Земля была повсюду однородна, то порождаемые землетрясением волны распространялись бы из эпицентра прямолинейно и с постоянной для каждого типа волн скоростью, определяемой только временем, через которое они регистрируются станцией, расположенной на известном расстоянии (рис. 5). Между тем, в действительности дело обстоит иначе: результаты множества измерений свидетельствуют о том, что сейсмические волны распространяются сквозь Землю быстрее, чем по ее поверхности. Кроме того, они указывают, что волна распространяется тем дальше, чем больше ее скорость. Это означает, во-первых, что скорость волн в толще Земли больше, чем вблизи ее поверхности и, во-вторых, что она возрастает по мере приближения к центру.

Те же, равно как и другие наблюдения приводят к заключению о том, что внутри Земли происходит рефракция и отражение волн (см. рис. 5). Первая изгибает их путь по направлению к поверхности. Отражение происходит на границах раздела между слоями с существенно различными физическими свойствами, т. е. на границе между корой и мантией, мантией и ядром и внешней и внутренней частью последнего. В наблюдаемой картине распространения волн четко проявляется концентрическая структура Земли. Существенно, что *S*-волны достигают только границы между мантией и ядром и не проходят через него. Это означает, что во всяком случае внешняя часть ядра находится в жидком состоянии.

Измерения времени распространения сейсмических волн вдоль различных путей в мантии позволяют вычислить скорость, с которой они распространяются в веществе мантии на различных глубинах. В целом скорость возрастает с глубиной, однако до глубины порядка 1000 км это возрастание происходит не вполне плавно, а по ступенчатому закону (рис. 6). Последнее указывает на то, что верхняя часть мантии сама имеет сложную структуру.

Скорость волн обоих типов уменьшается в слое мантии, расположенном на глубине от 100 до 250 км от поверхности. Это соответствует представлению о существовании астеносферы в модели тектонических пластов, о которых упоминалось выше. Физические свойства слоев, вытекающие из ступенчатой зависимости скорости распространения волн от глубины, а также из других геофизических наблюдений, согласуются с представлением о вкраплениях жидкости, которая, возможно, частично состоит из расплавленной породы слоя.

ГРАНИЦЫ СЛАНЦЕВЫХ ПЛАСТОВ

Землетрясения приносят информацию не только об описанной выше статической структуре концентрических слоев Земли, но, в известной степени, и о динамике тектонической активности сланцевых пластов. Так как землетрясения могут возникать только в достаточно холодных и твердых породах, распределение их эпицентров позволяет очертить границы стабильных пластов. Глубина, на которой расположены эпицентры в районах подводных горных хребтов, не превосходит 100 км. Это указывает на то, что здесь непосредственно под литосферой находится горячая мантия. Там же, где пласты сходятся, наползая друг на друга (при этом нижний погружается в мантию), эпицентры находятся на глубине порядка 700 км. Распределение последних позволяет получить представление о местоположении участков погружающейся литосферы. Детальное изучение характера распространения волн в этих районах согласуется с представлением о проникновении пластов сравнительно холодной литосферы в мантию на значительную глубину.

Изучая землетрясения, мы получаем совершенно определенные сведения о строении и физических свойствах мантии. В то же время, для того чтобы извлечь информацию о химических свойствах глубинных слоев Земли, приходится прибегать к весьма косвенным методам. Единственными доступными непосредственному изучению образцами являются незначительные количества породы, выброшенной на поверхность из самых верхних участков мантии. Наши представления о химическом составе Земли в целом и, в частности, о составе ее ядра и мантии опираются на химический анализ внеземных объектов, таких, как звезды, Солнце и метеориты. При этом, разумеется, приходится предполагать, что по химическому составу Земля и эти объекты в основном сходны. Такой подход прямо связан с физическими и химическими гипотезами образования Солнечной системы и Земли.

В настоящее время считается общепринятым, что Солнечная система сформировалась примерно $4,6 \cdot 10^9$ лет назад в результате гравитационного коллапса материи, до этого распыленной в космическом пространстве. На предшествовавшей стадии огромная масса, ставшая впоследствии Солнцем, была окружена сравнительно тонкой туманностью, имевшей форму диска и состоявшей из пылевидных частиц и газа. В результате слипания этих частиц и конденсации газа из этого вращающегося огромного облака сформировались сравнительно небольшие объекты, из которых затем образовались планеты. Тогда же образовались и метеориты. Поскольку в Солнце содержится более 99,6% массы всей Солнечной системы, очевидно, что они должны быть практически одинаковы по составу. В то же время распространенность различных элементов в Солнце и других звездах определяется с помощью спектроскопических методов, основанных на том, что каждый элемент характеризуется вполне определенным спектром электромагнитного излучения.

О ЧЕМ СВИДЕТЕЛЬСТВУЮТ МЕТЕОРИТЫ

Метеориты проходят через Солнечную систему, двигаясь по эллиптическим орбитам. Случайно на их пути может оказаться Земля. Известно, что они приходят из астероидного пояса, представляющего собой огромное скопление небольших планетоподобных тел и расположенного на расстоянии от 2,2 до 3,2 а. е. от Солнца. Метеориты существенно различаются по структуре, равно как и по химическому и минералогическому составу, однако в свете обсуждаемых здесь вопросов достаточно указать на существование двух основных групп: железных и каменных метеоритов (последние называют также аэролитами). Первые состоят, в основном, из сплава железа с никелем, в котором никеля содержится от 4 до 20%. Кроме того, в них содержится в небольших количествах сульфид железа.

Аэролиты состоят преимущественно из кремниевых минералов с примесью в различных пропорциях металлических сплавов и сульфида железа. Относительное содержание нелетучих элементов, таких, как магний, кремний, алюминий, кальций и железо, примерно одинаково во многих типах аэролитов и таково же, что в Солнце и других звездах. Следовательно, разумно считать, что их распространенность в этих телах может служить хорошей основой для оценки их распространенности в Земле и других планетах.

В глобальных моделях возникновения и эволюции Солнечной системы формирование химического состава Земли мыслится как процесс, начавшийся с обогащенного летучими веществами каменного метеорита, в котором протекали различные процессы, в том числе химические изменения, которые можно наблюдать в других типах метеоритов и в современных

земных условиях. Соответствующие оценки позволяют получить представление о составе ядра и мантии.

Упрощенный подход к этой проблеме, приводящий к аналогичным результатам, состоит в выборе определенной группы аэролитов и предположении, что среднее относительное содержание кремниевых составляющих в них такое же, как и в земной мантии. Состав ядра Земли оценивался по содержанию сульфида железа в сочетании со сплавом железа и никеля в тех же метеоритах. Железные метеориты служат для проверки правильности соответствующих оценок.

Каких бы рассуждений ни придерживаться, состав мантии получается приблизительно таким:

1. Более 90% ее массы приходится на окислы кремния, магния и железа (SiO_2 , MgO и FeO); ни один другой окисел не вносит вклад более 4%.

2. Окислы алюминия (Al_2O_3), кальция (CaO) и натрия (Na_2O) в сумме составляют от 5% до 8% массы мантии.

3. Эти шесть окислов в совокупности составляют более 98% массы мантии, а концентрация любого другого окисла не превосходит 0,6%. Концентрации других элементов, присутствующих в мизерных количествах, неизвестны. В мантии окислы комбинируются между собой, образуя различные минералы.

Из всех горных пород, найденных в земной коре, только перидотиты по своему составу удовлетворяют тем оценкам, которые были получены для породы, составляющей мантию, посредством изучения небесных тел. По этой причине перидотиты представляют для геологов особенный интерес, так как они несут детальную информацию о составе мантии, включая сведения о концентрации элементов, присутствующих лишь в едва уловимых количествах. Разумеется, при таком анализе необходима осторожность: нужно быть уверенным, что эти ничтожные примеси присутствовали в мантии, а не внедрились в перидотит после того, как он был выброшен на поверхность. В этой связи особенный интерес представляют округлые валуны или галька, которые встречаются в кимберлитовых «трубах» (цилиндрических интрузиях с диаметром порядка нескольких сотен метров, которые, выступая из мантии в некоторых местах, пробивают кору и выходят на поверхность).

КИМБЕРЛИТЫ И ЛАВА

Кимберлиты замечательны тем, что они выносят алмазы на поверхность Земли. Последние представляют собой особую структуру углерода, которая формируется только при очень высоких давлениях. Поэтому можно не сомневаться, что кимберлиты образуются на глубинах от 150 до 300 км, т. е. заведомо внутри верхней части мантии.

Существуют указания на то, что кимберлиты вначале быстро пробиваются сквозь кору в виде текучих взвесей твердого вещества, расплавленной породы и газов, вырывающихся на поверхность в результате мощного взрыва в ходе непродолжительного извержения вулкана. Куски породы вырываются из стенок трубки и выбрасываются вверх валуны перидотита и других камней. Они округляются и шлифуются под многократным воздействием газосодержащих фрагментов, сопутствующих взрыву.

Камни, сходные с теми, которые содержатся в кимберлитах, были обнаружены также и в некоторых вулканических лавах. Как правило, они выносятся из более поверхностных слоев мантии, нежели кимбер-

литы. Многие сведения о составе мантии основаны на минералогическом и химическом анализе камней, находящихся в кимберлитах и лаве. Той же цели служат перидотиты, содержащиеся в других геологических образованиях. Однако при работе с последними очень важно учитывать природу геологического окружения и влияние различных геологических процессов, чтобы была уверенность в том, что выводы, сделанные на основе их исследования, действительно относятся к мантии, а не обусловлены процессами, происходившими в коре.

В дополнение к двум рассмотренным подходам — изучению космических объектов и выбрасываемой из мантии породы — существует еще и третий, состоящий в мысленном конструировании гипотетического перидотита с химическим составом, который согласуется со свойствами вулканической лавы, возникшей вследствие частичного плавления мантии. В результате этого плавления появляется базальтовая магма, в большом количестве извергаемая на поверхность вулканами, а перидотит остается в мантии в противовес менее тугоплавким соединениям, которые увлекаются магмой. Наделяя этот оставшийся внизу перидотит подходящими химическими свойствами, можно объяснить состав внешней части мантии. Один из таких гипотетических перидотитов известен под названием пиролита.

ГЕТЕРОГЕННАЯ МАНТИЯ

Основываясь на физических моделях, предполагалось, что верхняя часть мантии однородна по своему составу. Однако, как мы уже говорили выше, детальные геофизические исследования последних лет указывают на ее слоистую структуру. Действительно, изучение валунов и гальки подтверждает точку зрения, что эта часть мантии весьма неоднородна как по химическим, так и по минералогическим свойствам. Мы видим образцы породы, составляющей мантию от ее границы с корой до глубин порядка 250 км, с которой выталкиваются на поверхность кимберлитовые «трубки». Среди них перидотиты, которые никогда не плавились; образцы «выжатых» перидотитов, из которых вытекли менее тугоплавкие компоненты; расплавленные составляющие, которые попадают на поверхность вместе с магмой, а не кристаллизуются под действием высокого давления в мантии; образцы породы, которая является промежуточной между перечисленными формами; и, наконец, образцы, состоящие из тех же минеральных составляющих, но образовавшиеся вследствие весьма сложных процессов, которые мы здесь обсуждать не можем.

Оценки состава мантии в целом, полученные на основе изучения космических объектов, приводят к тем же представлениям, что и изучение пород, выброшенных из верхней части мантии. В совокупности эти результаты подтверждают мнение о том, что химический состав мантии незначительно зависит от глубины. В то же время, сравнивая различные данные, мы приходим к выводу, что содержание калия в верхней части мантии, предсказываемое схемой с гипотетическим пиролитом, существенно выше, чем обнаруженное в естественном перидотите, выброшенном непосредственно из мантии, а обе эти оценки значительно ниже тех, которые получаются из анализа космических объектов.

Очень неоднозначны сведения и о концентрациях и распределениях других элементов, содержащихся в мизерных количествах, равно как и о летучих компонентах вроде воды и двуокиси углерода (углекислого газа). Между тем эти компоненты решающим образом влияют на такие факторы, как нагрев вследствие радиоактивного распада (скажем, распада урана и тория, а также радиоактивного изотопа калия, K^{40}), на

температуру плавления (при больших давлениях в присутствии хотя бы небольшого количества воды порода начинает плавиться при меньших температурах, нежели сухая порода) и на физическую прочность мантии. Последняя резко понижается в присутствии хотя бы незначительной доли расплавленного вещества и пузырьков газа.

ВОДА И ДВУОКИСЬ УГЛЕРОДА

В некоторых перидотитах встречаются минералы флогопит и амфибол, которые содержат воду. Это обстоятельство рассматривается как указание на присутствие воды, во всяком случае в некоторых зонах верхней части мантии. Вряд ли ее количество больше 0.1% от общего веса вещества, и, по всей вероятности, ее распределение внутри мантии неоднородно.

В рассматриваемых под микроскопом кристаллах оливина и пироксена из некоторых перидотитов, содержащихся в кимберлитах и лаве,



Рис. 7. Электронная микрофотография с увеличением в 20 000 раз пузырьков двуокиси углерода в образце перидотита, указывающая на ее присутствие в мантии.

видно множество мельчайших трещин с диаметром до пяти микрон. Многие из них заполнены плотной жидкой двуокисью углерода, сжатой большим давлением. Это указывает на то, что в том или ином виде она тоже содержится в верхней части мантии.

Использование высоковольтного электронного микроскопа в последние годы позволило увидеть детальную картину дефектов в кристаллах — нарушения кристаллической структуры в отдельных частичках минералов (рис. 7). Эти дефекты недоступны для наблюдения с помощью обычного микроскопа. На электронной микрофотографии видны мельчайшие пузырьки двуокиси углерода, находящиеся вдоль разрывов решетки

в оливине, пироксене и некоторых перидотитах. Это значит, что двуокись углерода была первоначально растворена в твердых минералах, откуда выделилась в виде пузырьков газа из-за упругих напряжений вблизи кристаллических дефектов.

Полученные различными независимыми способами данные о физических и химических свойствах мантии должны находиться во взаимном соответствии. Чтобы убедиться в их непротиворечивости, нужно знать физические свойства изучаемой породы в интервале давлений и температур, которые характерны для мантии. Если будет известно, как изменяются свойства минералов в зависимости от давления и температуры, то можно будет получить представление о глубине, с которой была выброшена на поверхность соответствующая порода, и о температуре, при которой она образовалась или пришла в равновесие с окружающим веществом.

ДАВЛЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРА

В кристаллической решетке кремниевых минералов доминируют атомы кислорода. Другие атомы, которых значительно меньше, расположены между ними. При низких давлениях каждый атом кремния окружен четырьмя атомами кислорода, которые расположены в вершинах тетраэдра. При повышении давления атомы кислорода сближаются, и образуется более плотная «упаковка», в которой каждый атом кремния окружен шестью атомами кислорода. Такое изменение кристаллической структуры называется фазовым переходом. Последовательностью фазовых переходов обусловлено ступенчатое изменение физических свойств мантии.

Если взять вещество с известной структурой, скажем, перидотит, который, как полагают, содержится в мантии, то его фазовые переходы будут определяться давлением и температурой. В лабораторных условиях была экспериментально найдена диаграмма фазовых переходов для перидотита в интервале давлений до 200 *кбар*, что эквивалентно погружению в глубь Земли примерно на 600 *км*. Посредством косвенных методов эта диаграмма была экстраполирована на более высокие давления.

Из изучения кимберлитов и лавы известно, что перидотиты в мантии могут образовывать кристаллы как минимум трех типов: плагиоклаз, шпинель и гранат. Опыты при высоком давлении показали, что эти типы кристаллизации перидотита связаны фазовыми переходами. По мере повышения давления плагиоклаз сначала переходит в шпинель, а затем в гранат.

Эксперименты показали, что при дальнейшем повышении давления гранат претерпевает следующий фазовый переход, в результате которого его плотность возрастает почти на 10%; преобладающий в верхней части мантии оливин становится подобным шпинелю, а глиноземный пироксен приобретает структуру граната и образует твердый раствор с уже имевшимся гранатом. При давлениях порядка 200 *кбар* минералы подвергаются дальнейшему сжатию и образуют кристаллические структуры, в которых каждый атом кремния окружен уже шестью атомами кислорода. Возникающие в результате минералы не встречаются на поверхности Земли. Такое сжатие приводит к повышению плотности еще примерно на 10%. Реальное давление, при котором происходит фазовый переход, зависит от температуры и повышается по мере ее роста.

Если на какой-то глубине повышается температура, то в конечном счете это приведет к тому, что порода начнет плавиться. Соответствующая температура растет вместе с давлением, что показано кривой, разграничивающей твердую и смешанную фазу на фазовой диаграмме (рис. 8).

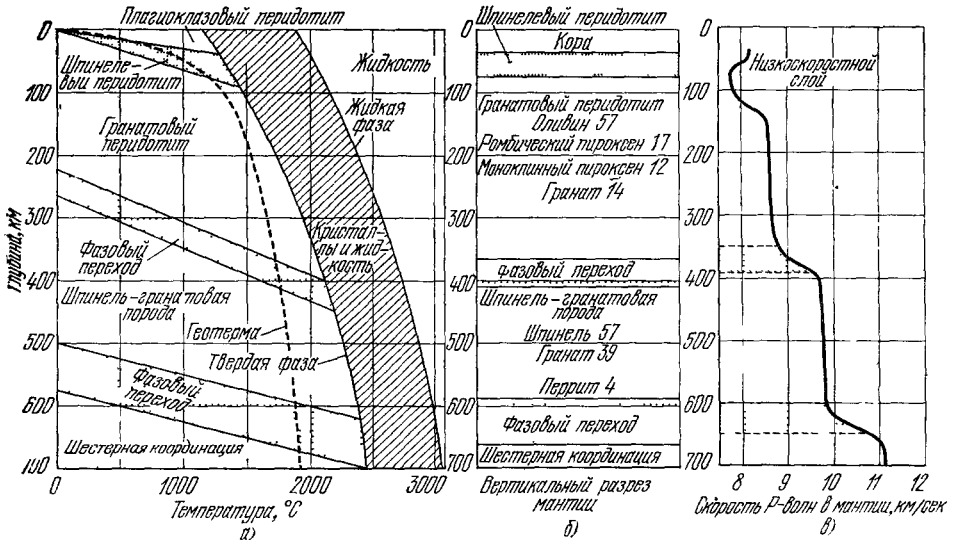


Рис. 8 Фазовая диаграмма перидотита.

На заданной глубине повышение температуры приводит, в конечном счете, к плавлению породы. Начало и завершение плавления показаны соответствующими кривыми (твердая фаза и жидкая фаза). Следуя вниз по геотерме на левой части рисунка а), мы видим слоистую структуру верхней части мантии с происходящими в ней последовательными фазовыми переходами. Цифры на диаграмме б) соответствуют процентному содержанию минералов в породе. Профиль скоростей Р-волн (в) показывает, что глубины, на которых существенно изменяются свойства мантии, тесно связаны с областями фазовых переходов.

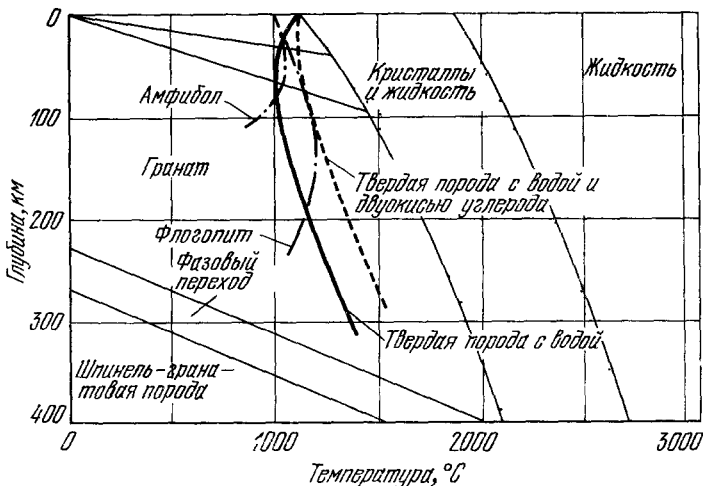


Рис. 9. Низкоскоростной слой верхней части мантии связан с присутствием воды и двуокиси углерода, которые способствуют плавлению породы при более низких температурах и давлениях.

Сравнивая эту диаграмму с соответствующей диаграммой для сухой породы, мы видим, что геотерма пересекает границу между твердой и частично расплавленной фазами перидотита на глубине порядка 100 км, т. е. вблизи начала низкоскоростного слоя сейсмических волн в верхней части мантии.

Порода, состоящая из нескольких минералов, постепенно плавится в интервале температур, где твердая (кристаллическая) и жидкая фазы сосуществуют, после чего первая исчезает и остается только вторая.

Кривая зависимости температуры от глубины называется геотермой. Она показана на рис. 8 и дает представление о влиянии температуры на состояние вещества в мантии. Будучи нанесена на фазовую диаграмму перидотита, она показывает, в каком фазовом состоянии находится минерал в зависимости от глубины. Вертикальный разрез состоящей из перидотита гипотетической мантии строится в соответствии с положением геотермы на фазовой диаграмме. Мы видим, что каждый слой характеризуется определенным состоянием минерала. Границы между слоями, вероятно, проходят на глубинах, где геотерма пересекает области фазовых переходов. Оказывается, что эти границы тесно связаны с глубинами, на которых изменяется скорость сейсмических волн. Это обстоятельство служит веским указанием на то, что верхняя часть мантии по составу не близка к гипотетическому перидотиту, а имеет слоистую структуру, обусловленную скорее фазовыми переходами, нежели изменениями состава.

Уменьшение скорости сейсмических волн в соответствующей зоне можно объяснить присутствием в верхней части мантии воды или двуокиси углерода. Они могут послужить причиной плавления хотя бы ничтожной части перидотита. Результатом этого является изменение физических свойств породы (рис. 9).

До конца первой половины нашего столетия среди геофизиков было широко распространено убеждение, что конвекция — перемещение вверх более горячего и вниз более холодного вещества — внутри твердой мантии происходить не может. По этой причине у теории дрейфа континентов было мало приверженцев. Однако в последнее время было предложено несколько моделей, в которых конвективные процессы в мантии рассматриваются как механизм, вызывающий перемещение пластов литосферы. Детали и масштабы этих процессов в мантии остаются неопределенными, но вряд ли можно сомневаться, что соответствующие скорости чрезвычайно малы — малы настолько, что в рамках наших привычных масштабов времени мантию можно считать практически неподвижной.

Пласты литосферы и покоящиеся на них континенты дрейфуют со скоростью порядка нескольких сантиметров в год. Допустим для наглядности, что вещество в мантии перемещается со скоростью 5 см в год, что эквивалентно скорости 0,005 мм/час. Заметим, что кончик часовой стрелки обычных домашних часов движется со скоростью примерно 5 см/час, и это движение не улавливается человеческим глазом, хотя скорость его в десять тысяч раз больше, чем предположенная выше скорость перемещения вещества в мантии. И несмотря на это, последняя весьма существенна, если принять во внимание геологические масштабы времени. При такой скорости порода могла бы переместиться со дна мантии на ее поверхность за время порядка $5,8 \cdot 10^7$ лет, которое само всего лишь малая часть возраста Земли (напомним, что он оценивается в $4,6 \cdot 10^9$ лет).

ДВИЖЕНИЕ МАНТИИ

Как представить себе, что твердая порода оказывается способной течь даже так медленно? Приведем наглядный пример. Взяв заготовку холодной стали, кузнец, конечно, не может ее согнуть, однако, нагрев ее, он сделает это легко, несмотря на то что сталь все еще остается в твердой фазе. Аналогично обстоит дело с веществом мантии, которое под действием высоких температур способно деформироваться, не будучи жидким.

В лабораторных условиях оливин, пироксен и перидотит были подвергнуты напряжениям при высоких давлениях и температурах, и выяснилось, что они деформируются. Недавно соответствующие образцы были исследованы с помощью высоковольтного электронного микроскопа с целью выяснения механизма пластичности. В результате пришли к выводу, что, прежде всего, деформируются отдельные кристаллы, которые затем перекристаллизуются и образуют новые зерна. Механизм течения зависит от давления и температуры

Были предложены различные схемы и механизмы конвекционных течений (рис. 10). В схеме на рис. 10, а предполагается, что существуют

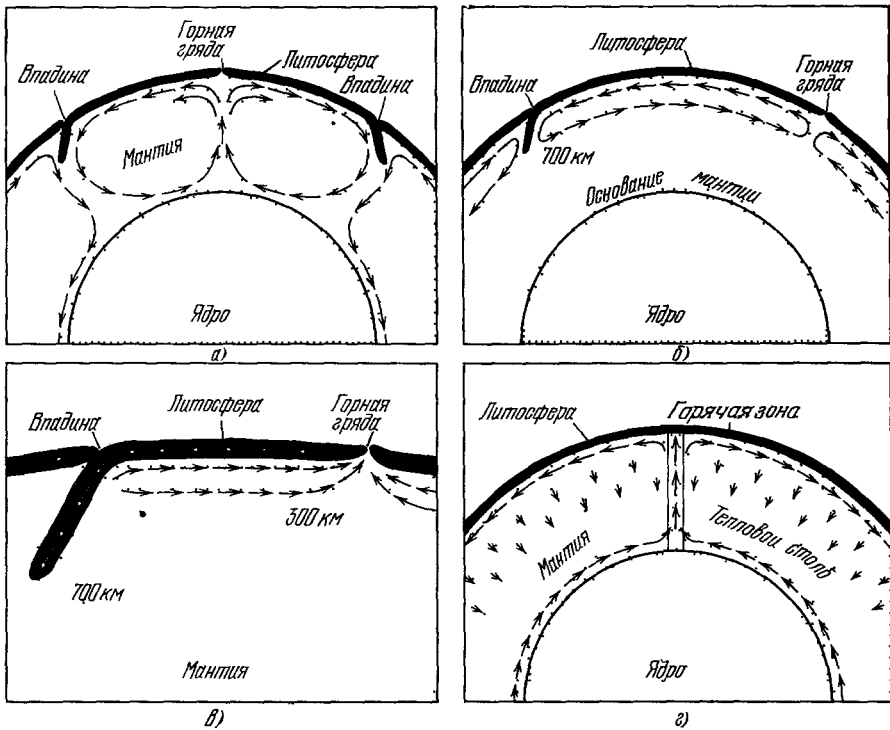


Рис. 10 Модели конвекции, предложенные для объяснения того, как процессы, происходящие в мантии, могут приводить в движение пласты литосферы

Конвекция состоит в том, что теплое вещество поднимается вверх, а холодное опускается вниз. Различные гипотезы о возможном механизме этого процесса обсуждаются в тексте

большие конвекционные контуры, охватывающие всю толщу мантии. Альтернативная схема на рис. 10, б базируется на аргументах, что поглощение тепла при фазовых переходах может ограничивать область конвекции поверхностными слоями мантии. В третьей модели (рис. 10, в) конвективная область ограничивается астеносферой, т. е. слоем мантии, простирающимся по глубине от 100 до 300 км. Между тем, зоны, где литосфера может «проваливаться» в мантию и, следовательно, участвовать в конвекции, охватывают глубину до 700 км. Наконец, есть еще одна модель (рис. 10, г), в которой предполагается, что конвекционный механизм состоит в образовании внутри мантии тепловых «столбов». Согласно этой модели, все восходящие потоки сконцентрированы примерно в двадцати таких столбах с основанием на границе между мантией и корой, каждый из которых имеет диаметр порядка нескольких сот километров.

Встречный (нисходящий) поток слагается из медленного понижения всего остального вещества мантии.

Когда восходящий поток достигает литосферы, он расплывается в горизонтальном направлении, образуя нагретые зоны, которые на поверхности характеризуются вулканической активностью. Он может также приподнимать литосферу, вызывая тем самым движение ее пластов.

Последняя гипотеза сейчас очень «модна», и многие геологи пытаются использовать ее для объяснения различных явлений, в том числе для объяснения природы гряд вулканических островов, таких, как, скажем, Гавайские. В то же время другие ученые подвергают эту гипотезу нападкам, выражая сомнение в том, что тепловые столбы способны, не разрушаясь, пройти сквозь всю толщу мантии, т. е. подняться на высоту порядка 2800 км.

При любом механизме конвекции вертикальное перемещение вещества в мантии приводит к изменениям распределения температуры внутри нее. На заданной глубине температура повышается, если здесь проходит восходящий поток горячего вещества, и падает, если холодный поток опускается вниз. Поэтому в результате конвекции вид геотермы изменяется как во времени, так и в пространстве. Минералогический состав перидотита тоже зависит от давления и температуры, как показало экспериментальное изучение его фазовых диаграмм.

Таким образом, в результате конвекции перидотит в мантии, подвергаясь изменениям давления и температуры, претерпевает фазовые изменения, приходя в состояние равновесия с изменяющейся окружающей средой. Так как все перемещения в мантии происходят достаточно медленно, равновесие обычно достигается. Если же какая-то порода внезапно выбрасывается на поверхность, как, скажем при извержении кимберлитов, времени на перестройку оказывается недостаточно, и минерал оказывается на поверхности в том состоянии, в котором он перед этим находился в мантии.

Минералогический состав перидотита при определенных давлениях и температурах установлен экспериментально. Опираясь на эти данные как на калибровку, можно, зная минералогический состав образцов перидотита, оценить давление (или глубину) и температуру тех участков мантии, из которых он был выброшен.

ИСТОРИЯ ГЕОТЕРМЫ

Применение описанных выше методов привело в последнее время к ряду удивительных результатов. По образцам камней, взятых из одного кимберлитового ствола, на диаграмме был получен ряд точек, соответствующих глубине (давлению) и температуре среды, с которой они находятся в равновесии перед извержением. Положение этих точек характеризует геотерму в ту геологическую эпоху, когда эти камни были выброшены на поверхность. Другими словами, в минералогическом составе каждого камня записана информация о соответствующем равновесном давлении и температуре мантии перед его извержением. На основе изучения кимберлитовых стволов в Южной Африке занимавшиеся этими вопросами ученые пришли к выводу, что до глубин порядка 150 км древнейшие геотермы соответствовали тому же градиенту температуры, что и современная геотерма, но на больших глубинах градиент возрастал. Очевидно, более ста миллионов лет назад — в эту эпоху вышли на поверхность изучавшиеся кимберлитовые стволы — температура там была выше нормальной.

Эти результаты представляют исключительный интерес для геофизиков, занимающихся тепловой эволюцией Земли, динамикой мантии и тек-

тоническими процессами. Одно из возможных объяснений обнаруженного факта состоит в том, что точка излома древней геотермы соответствует поверхности астеносферы во времена порядка 120 млн. лет назад, когда началось сравнительно быстрое движение африканского пласта литосферы, связанное с образованием Атлантического океана. Согласно такой версии, обусловленный этим движением, фрикционный нагрев астеносферы «сдвинул» геотерму в ней в сторону повышенных температур, оставив ее практически неизменной в литосфере из-за крайне низкой теплопроводности последней. В результате на границе между литосферой и астеносферой возник излом геотермы.

Возможна, однако, и другая интерпретация. Она была предложена геофизиками, считающими, что фрикционный нагрев астеносферы не может обусловить столь значительный тепловой эффект. Они полагают, что ниже точки излома геотерма пошла круче под воздействием восходящего теплового потока, которым и был вытолкнут на поверхность кимберлит.

Этот пример иллюстрирует, насколько различны точки зрения ученых на причины и механизм тектонических процессов, происходящих в мантии. Геологи-практики, минералоги, геофизики, химики и физики совместно изучают информацию, содержащуюся в кимберлитовых минералах, с целью теоретически воссоздать картину движения мантии, начиная со времени образования Земли (около $4,6 \cdot 10^6$ лет тому назад) и до наших дней.

Перед взором космонавтов Земля предстает как огромная вращающаяся масса, гладкая, как бильярдный шар. Глубина самых глубоких из пробуренных в Земле скважин едва достигает 9 км. Это составляет всего лишь 0,15% радиуса Земли и в сравнении с ее размерами подобно булавочному уколу. Тем более замечательно, что мы так много знаем о недоступной непосредственному исследованию мантии.

НЕОДНОЗНАЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ

И все же информация, которой мы сейчас располагаем, недостаточна для полного понимания природы динамических процессов, протекающих в мантии и являющихся ключом к объяснению многих геофизических и геологических явлений. Степень неоднозначности наших представлений иллюстрируется хотя бы сравнением двух гипотез о природе островов Гавайской вулканической гряды. Каждый остров образовался в результате извержения над расплавленной породой, покоящейся в астеносфере. Затем движущиеся пласты литосферы в течение длительного времени «растаскивали» эти острова, образовав из них цепь. Согласно одной гипотезе, этот расплав расположен в горячей зоне над восходящим тепловым потоком. Согласно другой, механизм локализации связан с фрикционными процессами в породе, столб которой погружается из астеносферы в глубь мантии. Предполагается, что этот столб образует нечто вроде гравитационного «якоря», поддерживающего более или менее стабильное положение расположенной над ним породы.

Эти диаметрально противоположные точки зрения высказываются весьма авторитетными специалистами по физике Земли. Как же обстоит дело в действительности? Покоятся Гавайские острова на восходящем тепловом потоке или на проваливающемся гравитационном «якоре»? Я убежден, что пройдет еще много лет, прежде чем будут накоплены дополнительные сведения и усовершенствованы теоретические гипотезы и мы сможем получить более ясное представление о структуре и динамических свойствах мантии.

ЛИТЕРАТУРА

- Ultramafic and Related Rocks, Ed. P. J. Wyllie, N.Y., J. Wiley and Sons, 1967.
- P. J. Wyllie, The Dynamic Earth: Textbook in Geosciences, N.Y., J. Wiley and Sons, 1971.
- Continents Adrift: Readings from Scientific American. Introductions by J. T. Wilson, San Francisco, W. H. Freeman and Co., 1972.
- F. Press, R. Siever, Earth, San Francisco, W. H. Freeman and Co., 1974.
- Earth, Mechanical Properties of; Earth, Structure and Composition of; Earth as a Planet; Earthquakes, in: The New Encyclopaedia Britannica: Macropaedia, v. 6, Lnd., Encyclopaedia Britannica, 1974.
- Planet Earth: Readings from Scientific American, Ed. F. Press and R. Siever, San Francisco, W. H. Freeman and Co., 1974.