

IX. О ПРИРОДЕ ОСНОВНЫХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ И ГРАНИЦ РАЗДЕЛА МЕЖДУ НИМИ

Природа и характер границы Мохоровичича между земной корой и мантией. Земная кора континентов и океанов, ее строение и особенности, состав образующих кору слоев по геологическим и геофизическим данным.

Происхождение земной коры, гипотезы дифференциации, зонной плавки, океанизации и др., их сущность и критика. Образование земной коры с позиции новой глобальной тектоники.

Строение мантии. Строение и состав верхней мантии (слой «В»), геологические данные и геофизические модели. Астеносфера (волновод) и ее вероятная природа.

Переходная область (слой «С») как область аномально быстрого изменения физических свойств земного вещества с глубиной; гипотезы, объясняющие это явление и критические замечания к ним.

Соображения о природе нижней мантии (слой D) и ее разделение на слои D' и D''. О природе границы Гутенберга между мантией и ядром Земли.

Ядро Земли. Физические свойства, состав и состояние его слоев (E, F и G), доводы в пользу преобладания в его составе железа. Основные претенденты на роль легких элементов в составе ядра. Дискуссионность представлений о составе ядра и гипотезы о его происхождении.

При изложении материала этого раздела будем придерживаться классических работ (Гуттенберг, 1963; Магницкий, 1965; Ботт, 1974).

Природа и характер границы Мохоровичича между земной корой и мантией. Земная кора континентов и океанов, ее строение и особенности, состав образующих кору слоев по геологическим и геофизическим данным. Вся совокупность имеющихся данных свидетельствует о том, что земная кора континентов, по крайней мере, ее верхние части, сложена породами, или непосредственно изверженными из более глубоких зон планеты, или подвергшимися той или иной переработке после их поступления в зону коры. То же самое, хотя и с несколько меньшей достоверностью, относится и к земной коре океанического типа.

Таким образом, должна существовать разница между химическим составом коры (или, по крайней мере, ее верхних частей) и составом более глубоких зон. Следовательно, с одной стороны, в недрах Земли должны существовать химические границы или переходные области (слои). С другой стороны, широко известен факт возникновения фазовых переходов под воздействием высоких давлений и температур. Таким образом, в недрах Земли должны существовать также фазовые границы.

Поверхность (граница раздела) Мохоровичича, принимаемая за нижнюю границу земной коры, должна, естественно, относиться к одному из этих видов границ.

В настоящее время, наряду с уже установившемся представлением о химической природе границы Мохо, распространена и гипотеза о том, что эта граница является поверхностью фазового перехода. Последнее предположение не исключает наличия химических границ, которые должны лежать выше или ниже поверхности Мохо и могут или отождествляться с наблюдаемыми слабыми сейсмическими границами, или совсем могут не обнаруживаться сейсмологией в случае постепенного диффузного перехода.

Наконец, существует и компромиссная точка зрения о разной природе поверхности Мохо для различных районов.

Для решения этой проблемы первостепенное значение имеет состав верхних частей мантии Земли и основных слоев земной коры.

Было установлено, что данные о скоростях сейсмических волн под земной корой и составе ксенолитов, поступающих из мантии, совместимы с двумя предположениями о составе подкоровой среды: она или имеет основной состав из пород эцлогитовой группы, или состоит из ультраосновных пород – групп перидотитов, вероятнее всего, гранатизированных перидотитов. Сопоставление этого состава с составом метеоритов позволяет отдать предпочтение второму предположению, так как он близок к хондритам – наиболее распространенной группе метеоритов. Однако с эцлогитовым составом можно сопоставить состав другой группы метеоритов – эвкритов, правда, гораздо более редкой. Так как в настоящее время можно считать установленным наличие в верхней мантии горизонтальных неоднородностей, то следует сделать вывод и о вариациях ее состава в возможных пределах от перидотитов до эцлогитов.

Другим важным фактором является состав глубоких частей земной коры, прилегающих к границе Мохо. Было установлено, что, в сущности, единственное предположение, совместимое со всеми данными наблюдений, состоит в том, что нижние слои континентальной коры сложены основными породами, вероятнее всего, типа габбро (глубинный вариант базальта). Для океанической коры предполагается тот же состав, хотя некоторые исследователи указывают на возможность образования коры океанического дна из серпентинизированных перидотитов.

Если верхняя мантия имеет эцлогитовый состав, то граница Мохо обусловлена фазовым переходом, так как базальт и эцлогит химически одинаковы и отличаются лишь по минералогическому составу. Если верхняя мантия перидотитовая, то поверхность Мохо имеет химическую природу, как это следует из химического состава пород.

Анализ зависимости скорости продольных волн от плотности породы сопоставление результатов такого анализа с сейсмическими данными позволяет предположить, что на континентах граница Мохо преимущественно химическая по природе (габбро или эцлогит – перидотит), однако в ряде областей молодой тектонической активности эта граница может быть фазовой (габбро – эцлогит).

Для океанической коры этот анализ неприменим, так как там возможно еще сильное влияние пор.

Для более полного решения вопроса о природе границы Мохо необходимо рассмотреть конкретные кривые фазовых переходов в условиях глубоких частей земной коры. К сожалению, еще нет достаточно полного анализа этих переходов, однако эксперименты, выполненные многими авторами, позволяют все же сделать основные выводы.

Анализ всех известных кривых перехода позволяет сделать вывод о том, что поверхность Мохо не может быть под океанами фазовой границей. Даже если предположить какой-либо неизвестный нам переход, то все равно в гипотезе о фазовом характере границы имеются огромные затруднения.

Несколько иначе складывается обстановка под континентами.

Происхождение земной коры, гипотезы дифференциации, зонной плавки и океанизации, их сущность и критика. То, что земная кора выделилась из мантии Земли в процессе ее исторического развития, не вызывает сомнений. Однако способ выделения вещества коры, пути развития коры еще не изучены, механизм и причины этого процесса и других, ему сопутствующих, представляют особый предмет дискуссии. Дискуссионными также являются и причины возникновения разных типов земной коры и общая направленность ее развития.

В свете имеющихся в настоящее время данных трудно согласиться с гипотезой о происхождении Земли в прошлом через стадию общего расплавления и с процессом выделения коры путем дифференциации по плотности вещества мантии в эту стадию. При такой схеме земная кора выделилась бы по всей Земле примерно одинакового состава и мощности. Для объяснения различий между разными типами коры, в первую очередь

континентального и океанического, приходится в этом случае прибегать к дополнительным, мало обоснованным гипотезам. Кроме того, при среднем составе мантии, близком к хондритам, при такой схеме развития образовалась бы кора гораздо большей мощности, чем это наблюдается. Даже при выделении вещества коры в количестве 7-8% мощность коры была бы около 200 км. Наконец, эта гипотеза не согласуется с тепловым режимом Земли и с составом коры.

В настоящее время более обоснованной гипотезой формирования коры является гипотеза выделения ее вещества в процессе зонной плавки, что подтверждено экспериментально зонной плавкой хондритового вещества.

Сопоставление и анализ большого количества материала показывает, что вещество хондритов или очень близкое к нему, теряя около 10% своей массы, способно создать земную кору и в остатке дать перидотитовую оболочку.

С точки зрения рассмотренного процесса земную кору океанов, по-видимому, следует считать как еще недоразвившуюся. В этих частях Земли процесс зонной плавки оказался замедленным. Причиной такого отставания могло быть несколько пониженное содержание радиоактивных элементов, что привело к замедлению разогрева таких областей.

Постепенное разрастание континентальной коры от ряда наиболее древних центров можно теперь объяснить следующим образом. Первоначальное содержание радиоактивных элементов несколько варьировало от одного места к другому. Места с наибольшим содержанием источников тепла или со сравнительно более глубоким их расположением первыми достигли условий зонной плавки, в процессе которой выделились ядра будущих континентов. При этом источники тепла были перенесены, в основном, в кору, что вместе с выносом тепла магмами привело к относительному охлаждению таких областей. Зонная плавка переместилась в соседние участки. Таким образом, шел процесс как бы концентрического разрастания континентов. Не следует думать, что следующая область активизации всегда примыкала к предыдущей. Нужные условия могли возникнуть и в некотором удалении, так что в тылу могли остаться еще не переработанные области (например, Новая Зеландия выброшена значительно вперед от Австралии). Области, оставшиеся в тылу, охватывались переработкой позже, это вместе с захватом новым циклом старых областей и создавало сложную мозаичную структуру континентов при все же заметной общей схеме разрастания. Именно период активной зонной плавки и соответствует геосинклинальному этапу развития коры, когда за счет недр осуществляется процесс прироста коры. Завершение геосинклинального процесса при этом объясняется исчерпанием первичного, глубинного процесса.

То обстоятельство, что в настоящее время температура под океанами выше, чем под континентами, не противоречит сказанному. В прежние эпохи картина была обратной, но вынос радиоактивных элементов в кору и потеря тепла при подъеме магм привели к охлаждению континентальных частей. В океанических же областях хотя и имеется меньшее количество источников тепла, но они рассредоточены на большую глубину. Благодаря этому к настоящему времени в рассматриваемых областях образовались условия, близкие к континентальным в термическом отношении и в ряде мест приближающиеся к условиям начала зонной плавки.

Однако наряду с объяснением процесса формирования континентальной коры возникает и проблема объяснения процесса океанизации этой коры. Такой обратный процесс, по мнению ряда исследователей, приводит к образованию океанов на месте ранее существовавших континентов.

Как отмечалось, слой D можно считать с большой степенью достоверности однородным. В слое B однородность если и нарушена, то незначительно. Слой D резко неоднороден.

Строение мантии. Строение и состав верхней мантии (слой «В»), геологические данные и геофизические модели. Астеносфера (волновод) и ее вероятная природа. Мантия Земли включает три области – В, С и D – из тех, на которые разделяет Землю Буллен. Позднее Буллен подразделил область D на части D' и D''. Б.Гутенберг полагает, что не имеется никаких определенных указаний на существование в мантии какого-либо разрыва непрерывности первого рода и что зависимость скорости упругих волн от глубины выражается непрерывными кривыми (рис. 3.16). Однако между С и D' на глубине в интервале от 900 км до 1000 км отношение возрастания скорости упругих волн с глубиной уменьшается или скачком, или по крайней мере достаточно быстро, так что там может существовать «разрыв непрерывности второго рода». Возможно, существуют еще слабые границы второго порядка в области D'.

На основе современных данных мы полагаем, что граница между В и С находится на глубине 200 км, тогда как по Буллену ее глубина 410 км. Детальное строение этой «границы» пока еще является спорным, и нет определенного мнения относительно того, соответствует ли она разрыву непрерывности или же переход от области В к области С происходит непрерывно, как полагает Б. Гутенберг. Граница между областями С и D находится приблизительно на глубине 950 км, а между D' и D'', вероятно, на глубине 2700 км. Ни одна из этих границ, по-видимому, не является резкой (рис. 3.16), и переход от одной области к другой, вероятно, происходит постепенно.

Признавая для верхней мантии Земли перидотитовый состав, близкий к составу силикатной фракции хондритов, следует подчеркнуть, что уже непосредственно под корой континентов или на небольших глубинах под ней эта перидотитовая мантия должна находиться в условиях эклогитовой фации, т. е. это должны быть не обычные полевошпатовые перидотиты, а перидотиты с эклогитовыми минералами, в первую очередь, гранатовые перидотиты, что и подтверждается составом ксенолитов. Более того, анализ глубинных пород показывает, что при практически одинаковом химическом составе, близком к гранатизированным перидотитам, могут быть периоды различного минералогического состава, например, оливин + амфиболы; оливин + плагиоклаз + энстотит + клинопироксены; оливин + энстатит + диопсид + шпинель; оливин + пирон + пироксены.

Конечно, сейсмические границы, возникающие под корой при таких минералогических переходах, будут очень слабыми. Также слабыми будут и вариации скоростей в горизонтальном направлении, что и соответствует наблюдениям.

Вскоре после открытия изостазии было установлено, что ниже относительно прочной «литосферы» находится слой с относительно малым пределом текучести, который позволяет путем медленных движений постепенно приближаться к состоянию гидростатического равновесия. Баррел в 1914 г. назвал этот слой «астеносферой».

В 1958 г. Джеффрис подтвердил существование особенности годографа волн Р на расстояниях около 20° . Однако по годографам продольных волн для Азорского землетрясения 1931 г. он заключил, что «переход должен представлять собой значительный разрыв градиента скорости». «Глубина перехода должна быть около 200 км». Это находится в хорошем соответствии с кривой зависимости скорости от глубины, построенной Б. Гутенбергом (рис. 9.1), за исключением того, что Б. Гутенберг считает изменение градиента скорости на этой границе быстрым, но постепенным, а не разрывным.

Переходная область (слой «С») как область аномально быстрого изменения физических свойств земного вещества с глубиной; гипотезы, объясняющие это явление и критические замечания к ним. Уже в 1909 г. кривые зависимости скорости от глубины (рис. 3.16) указывали на хорошо выраженное изменение наклона годографов при эпицентральной дистанции 45° . В результате самых первых расчетов было установлено, что наиболее глубокая точка луча, выходящего на поверхность при 45° , находится на

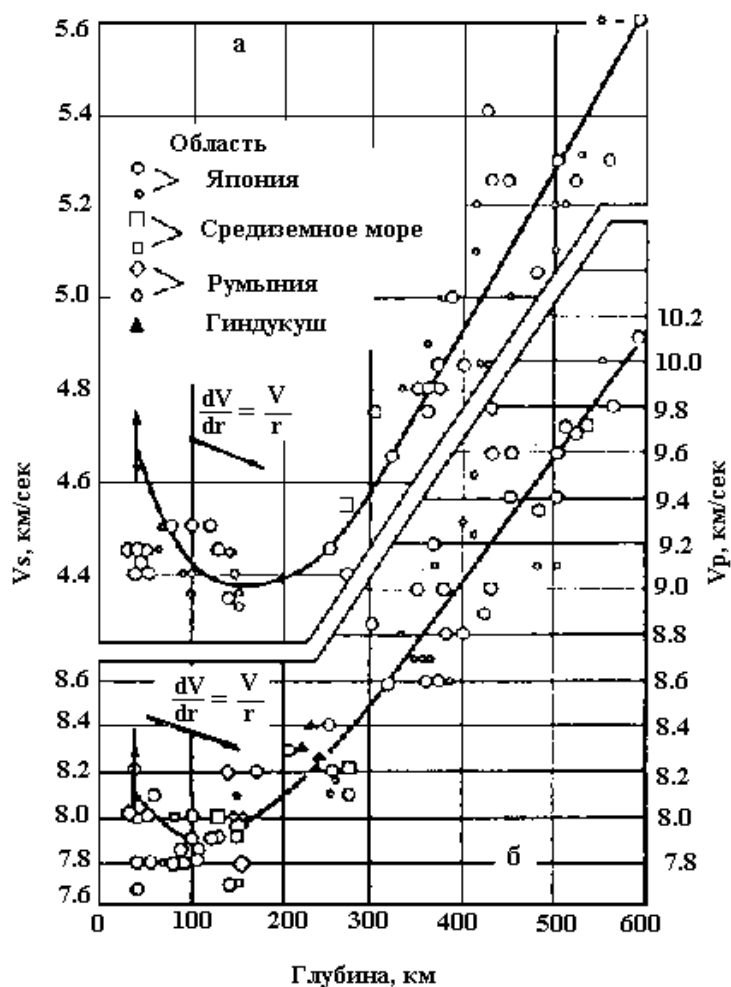


Рис. 9.1. Скорости V_s поперечных (а) и V_p продольных (б) волн в функции глубины, вычисленные по известным временам пробега P и S для толчков, возникших на разной глубине (Гуттенберг, 1963; с. 106-107).

глубине около 1500 км. Вихерт и др. предположили, что эта глубина «границы» означает границу ядра. Более поздние вычисления показали, что глубина разрыва второго рода для производной скорости по радиусу, которая соответствует внезапному изменению вблизи 45° , несколько меньше и составляет около 900-950 км. Это изменение, производной скорости по радиусу, позднее обнаруживалось во всех исследованиях, и каждый раз его интерпретировали, как результат существования границы между слоями с различной скоростью изменения состава. В период между 1925 и 1930 гг. для слоя С иногда употребляли выражение «промежуточный слой». Слои В и С образуют верхнюю мантию.

Ключевой проблемой физики мантии является проблема о физической природе слоя С, который характеризуется ненормально быстрым возрастанием скоростей V_p и V_s , плотности и электропроводности. Существует ряд предположений о природе этого переходного слоя. Предположение о том, что быстрый рост плотности связан с увеличением содержания тяжелых элементов с глубиной, не противоречит условиям равновесия в гравитационном поле. Однако эта гипотеза совершенно противоречит ходу скоростей сейсмических волн с глубиной. Единственный, достаточно распространенный тяжелый элемент в Земле – железо, но увеличение его содержания в породах всегда ведет к снижению скоростей. Таким образом, предположение о химической неоднородности слоя С отпадает. Скорости в слое D также совершенно не соответствуют железистым минералам.

В настоящее время наибольшим признанием пользуются различные варианты гипотезы о том, что в слое С происходит фазовый (полиморфический) переход без существенного изменения химического состава. Доказательством возможности такого перехода служат данные эксперимента по сжатию габбро.

Впервые гипотеза о полиморфическом переходе в слое С была высказана Берналом в 1936 г. Бернал предположил, что при давлении на глубине 400-700 км происходит перестройка ромбической структуры форстерита в кубическую решетку типа шпинели с увеличением плотности при этом примерно на 10%. Несмотря на возражения, основанные на том, что подобный переход должен происходить скачком, в то время как переход в слое С «размазан» на интервал глубин в 300-500 км, т. е. на интервал давлений примерно в 150 тыс. ат, эта гипотеза была поддержана с той модификацией, что кроме перехода в оливине, был предложен ряд других переходов. Постепенный переход в слое С рассматривается состоящим из нескольких малых скачков.

Ряд работ был посвящен изучению этой проблемы, исходя из аналогий силикатов и германатов.

Переход от слоя В к слою D по этой гипотезе происходит путем ряда последовательных превращений, которые схематически описываются реакциями, происходящими по мере возрастания давления.

Другое направление связано с представлениями о распадении силикатов на окислы под действием высокого давления.

Во избежание объяснения ряда трудностей было предложено еще одно объяснение природы слоя С, не связанное с определенными представлениями о составе мантии. Согласно этой гипотезе в слое С происходит хотя и быстрый, но постепенный переход от преобладающего ионного типа связей в веществе мантии в слое В к ковалентным связям в слое С. В основе этой гипотезы лежит известный факт, что ионные соединения, валентные и металлы образуют последовательность, в которой нет четких границ. В сущности даже не бывает чисто ионных и чисто валентных соединений, а преобладают смешанные. Например, галогениды серебра образуют целую гамму переходов от почти чистого ионного AgF к почти чисто валентному AgI . Такой тип перехода полностью снимает затруднения, связанные с отсутствием заметного скачка свойств в слое С.

Соображения о природе нижней мантии (слой D) и ее разделение на слои D' и D'' . О природе границы Гутенберга между мантией и ядром Земли. Для суждения о природе и составе слоя D мы пока располагаем недостаточным количеством экспериментальных данных. Наиболее полные сведения имеются для габбро и дунита. Из этих данных следует, что дунит не может быть главной компонентой слоя D. Что касается габбро. При разумных температурах габбро по плотности подходит к слою D. Однако, кроме плотности, должны также соблюдаться и скорости сейсмических волн, что становится приемлемым только при давлениях выше $2 \cdot 10^6$ ат.

Появившиеся в последнее время данные по ударному сжатию ряда горных пород – дунита, перидотита, базальта, пироксенита, диорита – показывают, что все они, по-видимому, испытывают фазовые переходы при давлениях 150-300 тыс. ат. После этого перехода плотности всех становятся очень схожими между собой и достаточно близкими к плотности слоя D. Такое сближение свойств горных пород при высоких давлениях может быть объяснено тем, как показывают эксперименты, удельный объем и сжимаемость элементов, резко различные при малых давлениях, при больших давлениях становятся почти одинаковыми для всех (химических) элементов.

Другое объяснение этого явления состоит в том, что при давлениях 150-300 тыс. ат. Силикаты и алюмосиликаты, возможно, распадаются на смесь окислов. Так как окислы одни и те же, то и свойства их смеси будут схожими, несколько меняясь в связи с разным соотношением окислов в смеси.

Гипотеза о составе слоя D из окислов получила поддержку в экспериментальном синтезе новой модификации SiO_2 с решеткой рутила, которую обычно называют стиповерит или стишовит. Стишовит был синтезирован в условиях статического сжатия при 120-140 тыс. ат. и $T = 1500^\circ\text{C}$. Исследованные свойства стишовита таковы, что они «с избытком» удовлетворяют слою D.

Таким образом, высказана гипотеза, что слой D состоит из смеси окислов с SiO_2 в форме стишовита, или вещество слоя D представляет собой квазиоднородную среду из плотнейшей упаковки ионов кислорода с октаэдрическими пустотами, занятыми катионами Mg, Fe, Si. При этом кремний переходит из четверной координации в шестерную, как в стишовите. Такой переход и позволяет анионам кислорода максимально приблизиться к плотнейшей упаковке.

Имеются сравнительно слабые, но ясные указания на то, что изменение скоростей с глубиной в слое D не совсем регулярно и, более того, наблюдается слабое уменьшение скорости (в слое D^{''}) при приближении к границе ядра. На рис. 9.2 приведены значения обратных величин кажущихся скоростей для продольных волн, вступающих на расстояниях между 23° и 103° в случае неглубокого источника. На этот же график нанесены логарифмы средней максимальной амплитуды смещения почвы (в мк) в прямой продольной волне на тех же расстояниях. Амплитуды приведены к значениям амплитуд в продольной волне с периодом 1 сек в случае толчка с магнитудой 7,0.

Кривая обратных величин кажущихся скоростей теоретически должна резко падать на расстояниях, при которых наибольшая глубина проникновения пришедших лучей приходится на слой, в котором скорость довольно быстро увеличивается с глубиной. Она должна быть близка к горизонтальной, если наибольшая глубина проникновения соответствует слою с почти постоянной скоростью. Совершенно горизонтальные участки кривой как, например, на расстояниях больше 90° , показывают, что в самой глубокой точке луча, выходящего на этих расстояниях, скорость уменьшается с глубиной с быстротой, близкой к критической, которая определяется соотношением $dV/dr = V/r$. Вблизи границы ядра она составляет около 0,4 км/сек на 100 км глубины для продольных волн и около 0,2 км/сек на 100 км для поперечных волн.

Амплитуды смещения почвы должны быть сравнительно большими на эпицентральных расстояниях, где вступают волны с глубиной проникновения, соответствующей относительно быстрому возрастанию скорости с глубиной; амплитуда будет уменьшаться, стремясь к нулю, если глубина проникновения луча соответствует уменьшению скорости с глубиной по закону, близкому к критическому.

На рис. 9.2 отмечены расстояния, на которых выходят волны, коснувшиеся границы между областями C и D['] и границы между D['] и D^{''}. Предполагается, что лучи, выходящие на расстоянии 103° , касаются ядра. Соответствующее расстояние для поперечных волн несколько отличается, так как коэффициент Пуассона изменяется с глубиной. Это расстояние не может быть точно установлено ни для волн P ни для волн S, так как переход от прямых волн к дифрагированным постепенный.

Существуют указания на дополнительные нерегулярности в пределах верхней части слоя D['] (рис. 9.2). Это неоднократно отмечалось, начиная с 1911 г. Однако, подробности их неизвестны. Заслуживает внимания тот факт, что такие особенности обнаружены в слое D['], где увеличение скорости с глубиной часто рассматривается как следствие только увеличения давления.

Наблюдения времен пробега, так же как и амплитуд P (рис. 9.2), показывают, что возрастания скорости волн замедляется с приближением к ядру и наконец в слое D^{''}, по-видимому, постепенно сменяется слабым уменьшением с глубиной (рис. 3.16). Предполагают, что на глубине около 2800 км, существует граница, и скорость там внезапно уменьшается: от 13,24 до 12,57 км/сек, но это не подтверждено.

Берч поднял вопрос, каким образом в слое D['], если он однороден по составу и фазе (что, по-видимому, на самом деле имеет место), может достигаться такое условие. Он

указал, что существуют, по меньшей мере, две возможности: «или этот слой был однородным с самого начала...или это явилось результатом процесса дифференциации, который происходил во всей мантии». Сам Берч склоняется ко второму предположению.

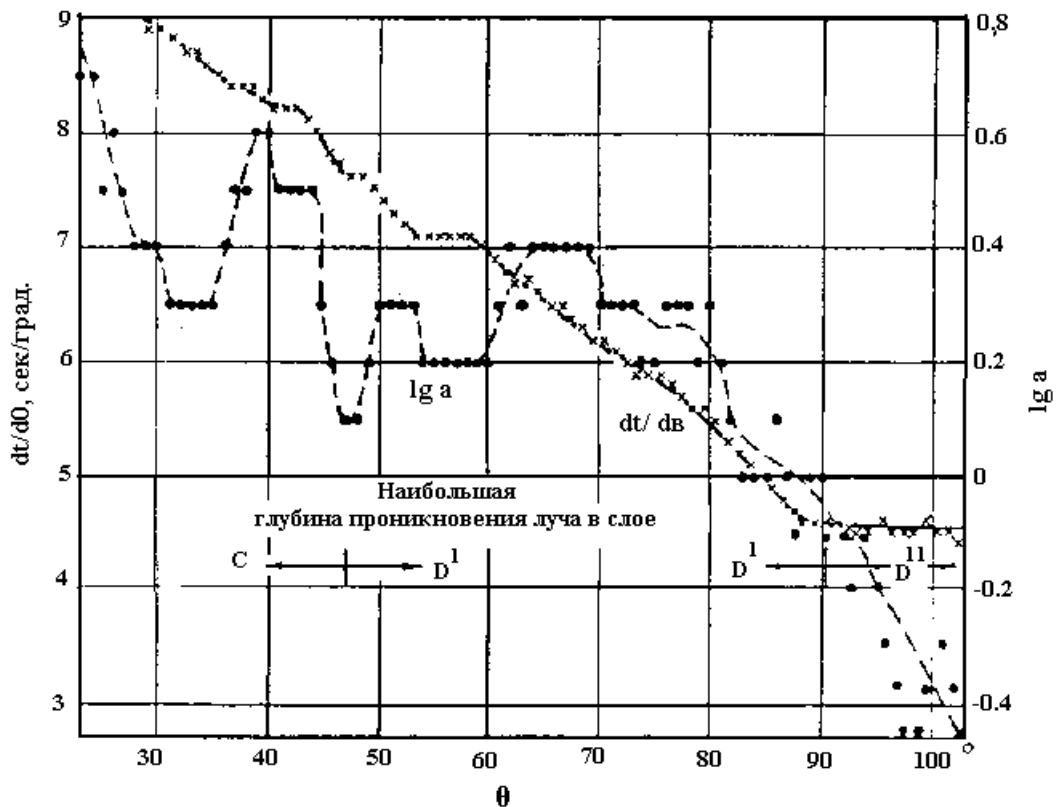


Рис. 9.2. Обратная величина кажущейся скорости $dt/d\theta$ (крестики) и $\lg(a/T)$ для продольных волн P в функции эпицентрального расстояния ($\lg a$ при $T = 1$ сек) для землетрясения с магнитудой $M=7.0$ (точки) (Гутенберг, 1963; с. 120).

Изменения в слое D'' , вероятно, являются следствием процессов, которые вызываются различиями между твердой мантией и нетвердым внешним ядром. Никаких конкретных предположений на это счет, по-видимому, не сделано.

Ядро Земли. Физические свойства, состав и состояние его слоев (E, F и G), доводы в пользу преобладания в его составе железа. Основные претенденты на роль легких элементов в составе ядра. Дискуссионность представлений о составе ядра и гипотезы о его происхождении. О природе границы Гутендерга (продолжение). Переход от мантии к ядру Земли сопровождается сильным увеличением плотности (примерно на 70%), резким снижением скоростей продольных волн, появлением высокой электропроводности. Высокая плотность вещества ядра и его электропроводность убедительно говорят, что в ядре вещество находится в металлической фазе. Кроме того, сейчас уже можно считать установленным, что внешнее ядро (2900-5100 км) находится в жидком состоянии. Граница мантия – ядро резко выражена.

Из тяжелых металлов только железо встречается в природе в больших количествах и только оно в металлической фазе составляет существенную часть метеоритов, чтобы быть материалом, пригодным для образования ядра Земли. Поэтому уже на ранних стадиях развития геофизики высказывалась гипотеза о железном или железо-никелевом составе ядра Земли.

Таким образом, гипотеза железного ядра с примесью некоторых других элементов может быть согласована с основными геофизическими данными о свойствах ядра Земли.

Гораздо более серьезные трудности возникают перед гипотезой железного ядра при сопоставлении с данными о других планетах и при попытках объяснить способ образования ядра.

При сопоставлении плотности планет земной группы (включая Луну) выясняется интересная зависимость. Оказывается, что средняя плотность вещества планеты (с приведением к одному давлению) растет с увеличением размеров и массы планеты. Получается, что чем больше планета, тем больше в ней тяжелых элементов, т. е. преимущественно железа. Таким образом, Луна и Марс почти не содержат железа и не имеют ядра. Земля и очень близкая к ней по размеру Венера имеют большое плотное ядро. Исключением из этой закономерности является маленький, но очень плотный Меркурий.

Объяснить такое закономерное и очень значительное изменение содержания железа в планетах пока не удается.

Также не очень понятен путь образования железного ядра. В «термическом разделе» было показано, что при возникновении Земли температура в ее недрах была везде существенно ниже точки плавления. Таким образом, возникновение ядра путем плавления железных включений и их стекания к центру стало возможным на более позднем этапе. Но если в этих условиях еще можно как-то представить стекание железного расплава, то очень трудно понять, как силикатная или окисная масса, занимавшая место будущего ядра, поднялась вверх в мантию и как при этом возникла четкая граница ядро-мантия.

Все эти трудности снимаются, если предположить, что граница ядро – мантия не химическая, а фазовая, отделяющая мантию с веществом в неметаллическом состоянии от ядра того же состава, но с веществом в металлической фазе. Если это так, то плотность и давление в модели «А» Гутенберга – Буллена можно рассматривать как уравнение состояния для вещества планет.

Для решения проблемы необходимо показать возможность перехода в металлическую фазу пород и минералов, слагающих мантию Земли. Такой переход («резонансный») в металлическую фазу происходит у элементов IV группы (C, Si, Ge), имеющих четыре валентных электрона, что и приводит к резонансу, если число ближайших соседей больше четырех. Видимо, то же имеет место для соединений элементов III и V групп с тремя и пятью электронами.

Для приложения этого объяснения к гипотезе металлизации вещества Земли следует учесть, что основой всех силикатов служат сложные ионы SiO_4^{-4} , которые также имеют четыре валентных электрона. Таким образом, можно ожидать, что их поведение под давлением будет аналогично поведению элементов IV группы.

Другая трудность, встающая перед гипотезой фазовой природы границы мантия – ядро, состоит в том, что при переходе к ядру совершается переход не только в металлическую, но и в жидкую фазу. Термодинамические соображения подтверждают возможность существования такой границы. Такая граница может быть пропущена продольными волнами, однако крайне неправдоподобно, что ее не замечают поперечные волны, например, SH, для которых такая граница была бы сильной. Это, видимо, серьезный аргумент против рассматриваемой схемы.

Таким образом, приходится признать вероятными два варианта объяснения природы границы ядра Земли.

1. Граница является химической по природе, и ядро состоит из некоторого сплава железа.

2. Граница обусловлена фазовым переходом, и ядро состоит из вещества нижних частей мантии, но в металлической фазе. В этом случае вещество глубоких частей мантии должно обладать не совсем типичной фазовой диаграммой. Однако такая диаграмма возможна и в ряде случаев действительно существует, как показывают опыты. Таков переход в металлическую фазу Sn, C (алмаз), InSb, InP и ряд других соединений и элементов.

Полностью вопрос о физике и составе ядра и мантии Земли может быть решен только в результате проведения дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Не последнюю роль в решении этого вопроса могут играть данные о строении других планет солнечной системы. Например, согласно представлениям модели «горячей» Земли (Кузнецов, 2000), ядро нашей планеты содержит значительное количество водорода.

Проблема же земной коры и верхней мантии в силу большой сложности только с трудом поддается теоретико-физическому анализу. В этой области главное слово, видимо, будет принадлежать эксперименту, как лабораторному, так и полевому, в виде целого комплекса геофизических, геологических и геохимических наблюдений вплоть до сверхглубинного бурения с проникновением в мантию Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ботт М.** Внутренне строение Земли. М.:Мир. 1974. 376.
2. **Гуттенберг Б.** Физика земных недр. М.: ИЛ. 1963. 264 с.
3. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
4. **Магницкий В.А.** Внутреннее строение и физика Земли. М. Недра. 1965. 379 с.