

Российский Государственный Педагогический Университет
им. А. И. Герцена

Мантия земли

Выполнила: студентка 1 курса
магистратуры факультета химии
Халикова Р. И.

Проверил: к.х.н., доцент кафедры
неорганической химии Пузык М. В.

2010 г.

Содержание

1.Строение Мантии.....	3
2. Химическое строение и свойства мантии.....	9
3. Процессы обмена вещества с ядром и поверхностью.....	15
4. Источники информации о мантии	17
4. 1. Сейсмические волны.....	18
Заключение.....	25
Список литературы.....	26
Приложение.....	27

1.Строение Мантии

Широко известная модель внутреннего строения Земли (деление ее на ядро, мантию и земную кору) разработана сейсмологами Г. Джеффрисом и Б. Гутенбергом еще в первой половине XX века. Решающим фактором при этом оказалось обнаружение резкого снижения скорости прохождения сейсмических волн внутри земного шара на глубине 2900 км при радиусе планеты 6371 км. Скорость прохождения продольных сейсмических волн непосредственно над указанным рубежом равна 13,6 км/с, а под ним - 8,1 км/с. Это и есть граница мантии и ядра.

Мантия — часть Земли, от земной коры и до границы с ядром.. Мантия есть и на других планетах. **Мантия** – самая мощная из твердых оболочек Земли. Она простирается до глубины 2900 км и составляет более 60% массы планеты и около 80 % ее объема. С глубиной в мантии увеличивается температура – от нескольких сотен градусов до двух-трех тысяч. Одновременно происходит рост давления, которое превышает в наиболее глубинных частях этой оболочки $10 \cdot 10^{10}$ Па. Скорость продольных сейсмических волн постепенно возрастает до 13,6 км/с. Соответственно этому считают. Что плотность вещества также постепенно возрастает до 5,7 г/см³.

Что собой представляет вещество мантии, неизвестно. Это область догадок и гипотез. Не смотря на высокую температуру, вещество мантии твердое, о чем свидетельствует прохождение через него как продольных, так и поперечных волн. Одни ученые предполагают, что увеличение плотности связано с изменением химического состава вещества, другие – что изменяется не химический состав, а лишь кристаллохимическая структура соединений, которая становится более плотной.

В середине XX века в науку вошли представления о более детальном глубинном строении Земли. На основании новых сейсмологических данных оказалось возможным разделить ядро на внутреннее и внешнее, а мантию -

на нижнюю и верхнюю. Эта модель, получившая широкое распространение, используется и в настоящее время. Начало ей положил австралийский сейсмолог К.Е. Буллен, предложивший в начале 40-х годов схему деления Земли на зоны, которые обозначил буквами: А - земная кора, В - зона в интервале глубин 33-413 км, С - зона 413-984 км, D - зона 984-2898 км, Д - 2898-4982 км, F - 4982-5121 км, G - 5121-6371 км. Эти зоны отличаются сейсмическими характеристиками. Позднее зону D он разделил на зоны D' (984-2700 км) и D'' (2700-2900 км). В настоящее время эта схема значительно видоизменена и лишь слой D'' широко используется в литературе. Его главная характеристика - уменьшение градиентов сейсмических скоростей по сравнению с вышележащей областью мантии.

Мощная мантийная оболочка не остается однотипной на всем своем протяжении. В ее пределах ученые выделяют три зоны. Зона В - **верхняя мантия** простирается от поверхности Мохо* до глубины 400 км. В этой зоне на глубине от 100 до 200 км под материками и от 50 до 400 км под океанами температура достигает около 1200 °С. При такой температуре плавиться очень распространенная горная порода – базальт. Возможно, что в этой зоне вещество частично находится в расплавленном состоянии. Рассеянные расплавленные участки уменьшают скорость распространения сейсмических волн, способствуют пластичности вещества, в которое могут погружаться отдельные блоки земной коры. Область такого неустойчивого состояния мантийного вещества называется **астеносферой**.

Астеносфера (от греч. "астенос" - "слабый" и "сфера" - "шар") - слой пониженной вязкости в верхней мантии Земли, подстилающий более холодную и твердую литосферу. Астеносфера фиксируется сейсмическими методами по понижению скоростей сейсмических волн примерно на 4%. Толщина астеносферы порядка 100 км, но это размытая величина, поскольку жесткость возрастает с глубиной плавно.

Астеносфера находится в состоянии гидростатического равновесия, поскольку способна к медленному течению из областей высокого давления в

* Поверхность, разделяющая земную кору и верхнюю мантию. Была выделена по резкому возрастанию скоростей сейсмических волн А.Мохоровичем в 1909 г.

области пониженного давления, выравнивая его таким образом. Глубина залегания астеносферы значительно варьирует. Она наиболее близка к поверхности под континентальными рифтами срединно-океаническими хребтами (10-20 км). Под континентами глубина залегания астеносферы значительно больше (100-200, до 400 км). Под крупными горными сооружениями литосфера имеет максимальную мощность, и иногда зона пониженных скоростей, соответствующая астеносфере, вообще не фиксируется. Мощную субконтинентальную литосферу иногда называют литосферным килем.

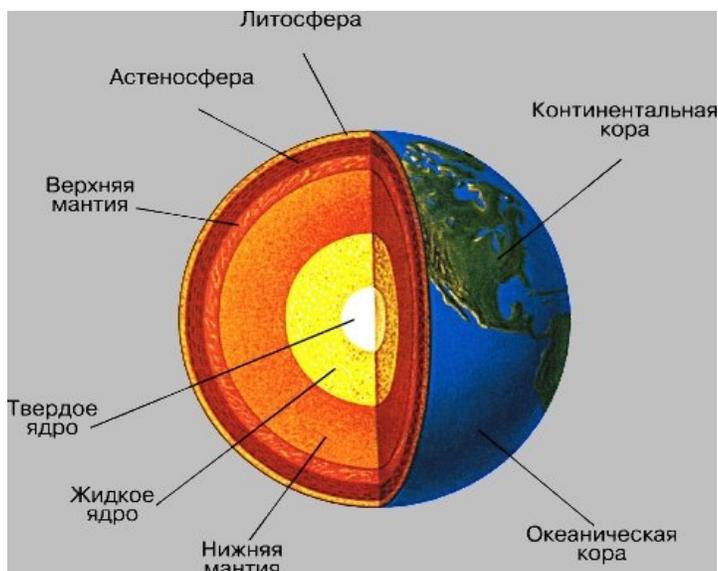


Рисунок 1. *Строение Земли*

Астеносфера играет в динамике Земли исключительно важную роль. Именно в астеносфере происходит наиболее интенсивная мантийная конвекция, которая приводит в движение литосферные плиты.

Следующая зона С простирается от 400 до 1000 км. В этой зоне резко возрастает скорость сейсмических волн, что было установлено в 1912 – 1913 г. Б. Б. Голицыным. На протяжении **слоя Голицына**^{*} происходит сильное уплотнение вещества мантии. Некоторые ученые предполагают, что именно здесь возникают сверхплотные кристаллохимические структуры.

^{*} Российский физик, академик Петербургской Академии наук (1908). Один из основоположников сейсмологии, геофизик, изобретатель первого электромагнитного сейсмографа (1906)

Границей нижней и верхней мантии в рассматриваемой схеме служит сейсмический раздел, лежащий на глубине 670 км. Он имеет глобальное распространение и обосновывается скачком сейсмических скоростей в сторону их увеличения, а также возрастанием плотности вещества нижней мантии. Этот раздел является также и границей изменений минерального состава пород в мантии.

Далее в зоне D - **нижняя мантия**, продолжается постепенное, менее сильное, чем в предыдущей зоне, уплотнение твердого вещества. Это продолжается вплоть до глубины 2900 км, на которой расположена поверхность раздела мантии и ядра Земли. Верхняя граница слоя D'' неопределенна; ее уровень от поверхности ядра может варьировать от 200 до 500 км и более. Таким образом, можно заключить, что данный слой отражает неравномерное и разноинтенсивное поступление энергии ядра в область мантии.

Таковы основы представлений о строении Земли, сложившиеся к настоящему времени. Далее обратимся к новейшим данным в отношении глубинных сейсмических рубежей, представляющих важнейшую информацию о внутреннем строении планеты.

В том же, 1994 году вышла в свет аналогичная работа японских геофизиков. В ней приведены 14 карт для уровней от 78 до 2900 км. На основе анализа карт японских геофизиков оказалось возможным предложить существенно более дробную структуру мантии Земли, показанную на рисунке 3, по сравнению с традиционной моделью земных оболочек.

Принципиально новыми являются два положения:

а) обособление мощной средней мантии в пределах ранее недифференцированной нижней мантии;

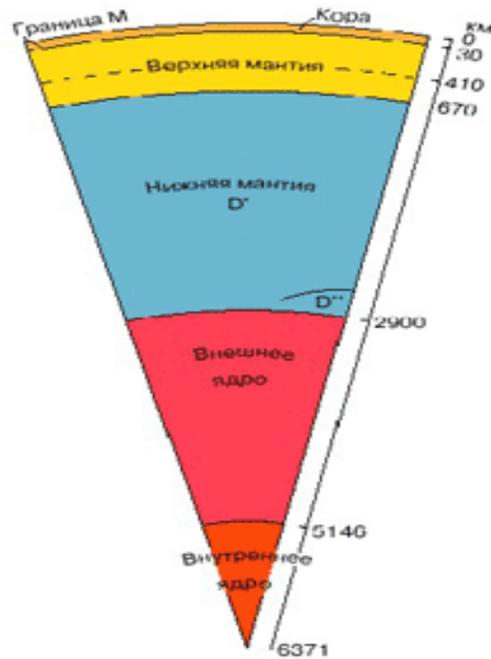


Рисунок 2. *Схема глубинного строения Земли*

б) выделение зон раздела между верхней и средней мантиями, а также между средней и нижней. В такой интерпретации мощность нижней мантии сократилась в три раза и составляет приблизительно 700 км. При этом нижняя мантия отвечает зоне непосредственного влияния внешнего ядра. Ее нижняя часть испытывает наиболее интенсивное влияние и соответствует слою D". Над этой оболочкой располагается область с существенно более пестрой картиной распределения сейсмоаномалий, имеющая мощность порядка 500 км. Эта область разграничивает нижнюю и среднюю мантию, отличающуюся более значительными по площади и менее контрастными сейсмическими ареалами. Мощность средней мантии около 860 км. Подчеркнем, что средняя мантия прекрасно обособляется также на картах американских сейсмологов. Над ней снова выделяется область с относительно более сложной картиной распределения сейсмоаномалий, которая отделяет верхнюю мантию. Мощность зоны раздела приблизительно 170 км. Это касается верхней мантии, то она соответствует традиционной модели. Рубеж 410, как уже отмечалось, делит ее на две части: нижнюю и верхнюю. Таким образом суммарно выделяются шесть глубинных геосфер.

Как же соотносятся предлагаемые границы глубинных геосфер с ранее обособленными сейсмологами сейсмическими рубежами? Сопоставление показывает, что нижняя граница средней мантии коррелирует с рубежом 1700, глобальная значимость которого подчеркнута в работе. Ее верхняя граница примерно соответствует рубежам 800-900. Это касается верхней мантии, то здесь расхождений нет: ее нижняя граница представлена рубежом 670, а верхняя - рубежом Мохоровичича. Особо обратим внимание на неопределенность верхней границы нижней мантии. В процессе дальнейших исследований, возможно, окажется, что намеченные недавно сейсмические рубежи 1900 и 2000 позволят внести коррективы в ее мощность. Таким образом, результаты сопоставления свидетельствуют о правомерности предлагаемой новой модели структуры мантии.

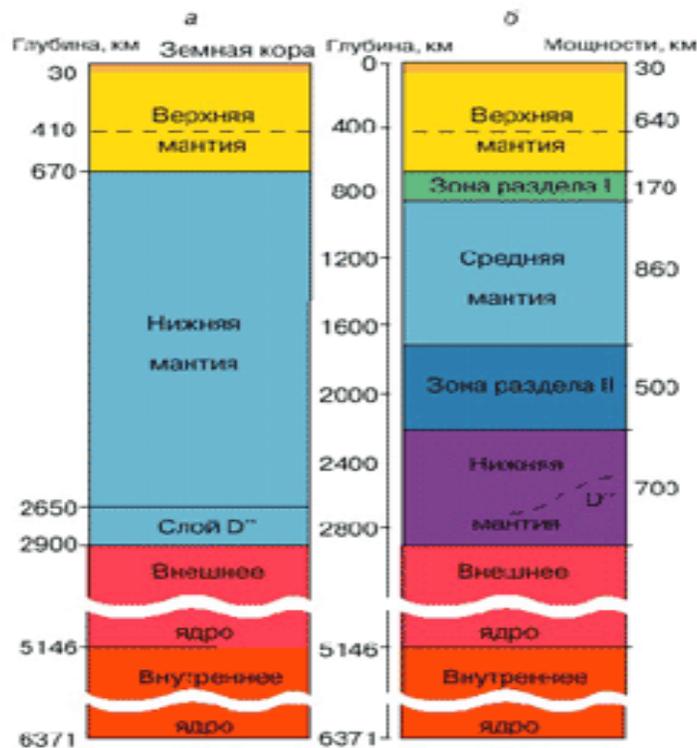


Рисунок 3. Модели строения Земли: а - традиционная модель, распространенная в настоящее время; б - новая модель, основанная на анализе сейсмотомографических карт и данных о сейсмических границах. Мощности могут варьировать в пределах до 10%.

2. Химическое строение и свойства мантии

Проблема состава, структуры и минеральных ассоциаций глубинных земных оболочек или геосфер, конечно, еще далека от окончательного решения, однако новые экспериментальные результаты и идеи существенно расширяют и детализируют соответствующие представления.

Состав верхней мантии

Согласно современным взглядам, в составе мантии преобладает сравнительно небольшая группа химических элементов: Si, Mg, Fe, Al, Ca и O. Предлагаемые модели состава геосфер в первую очередь основываются на различии соотношений указанных элементов, а также на различиях в содержании Al и некоторых других более редких для глубинных пород элементов. В соответствии с химическим и минералогическим составом эти модели получили свои названия: *пиролитовая* (главные минералы - оливин^{*}, пироксены и гранат в отношении 4 : 2 : 1), *пиклогитовая* (главные минералы - пироксен и гранат, а доля оливина снижается до 40%) и *эклогитовая*, в которой наряду с характерной для эклогитов пироксен-гранатовой ассоциацией присутствуют и некоторые более редкие минералы, в частности Al-содержащий кианит Al_2SiO_5 (до 10 вес. %).

Все предложенные модели весьма обобщенные и гипотетичные. Пиролитовая модель верхней мантии с преобладанием оливина предполагает ее значительно большую близость по химическому составу со всей более глубокой мантией. Наоборот, пиклогитовая модель предполагает существование определенного химического контраста между верхней и остальной мантиями. Более частная эклогитовая модель допускает присутствие в верхней мантии отдельных эклогитовых линз и блоков.

Большой интерес представляет попытка согласовать структурно-минералогические и геофизические данные, относящиеся к верхней мантии. Уже около 20 лет допускается, что увеличение скоростей сейсмических волн на глубине ~410 км преимущественно связано со структурной перестройкой

* <http://bitel.kg/mineraly-i-mineralogija/kamni/198-olivin-otnositsja-k-rombicheskoj-singonii.html>

оливина $a\text{-(Mg, Fe)}_2\text{SiO}_4$ в вадслеит $b\text{-(Mg, Fe)}_2\text{SiO}_4$, сопровождающейся образованием более плотной фазы с большими значениями коэффициентов упругости. Согласно геофизическим данным, на таких глубинах в недрах Земли скорости сейсмических волн возрастают на 3-5%, тогда как структурная перестройка оливина в вадслеит (в соответствии со значениями их модулей упругости) должна сопровождаться увеличением скоростей сейсмических волн примерно на 13%. Вместе с тем результаты экспериментальных исследований оливина и смеси оливин-пироксен при высоких температурах и давлениях выявили полное совпадение рассчитанного и экспериментального увеличения скоростей сейсмических волн в интервале глубин 200-400 км. Поскольку оливин обладает примерно такой же упругостью, как и высокоплотные моноклинные пироксены, эти данные должны были бы указывать на отсутствие в составе нижележащей зоны граната, обладающего высокой упругостью, присутствие которого в мантии неизбежно вызвало бы более значительное увеличение скоростей сейсмических волн. Однако эти представления о безгранатовой мантии вступали в противоречие с петрологическими моделями ее состава.

Так появилась идея о том, что скачок в скоростях сейсмических волн на глубине 410 км связан в основном со структурной перестройкой пироксен-гранат внутри обогащенных Na частей верхней мантии. Такая модель предполагает почти полное отсутствие конвекции в верхней мантии, что противоречит современным геодинамическим представлениям. Преодоление этих противоречий можно связать с недавно предложенной более полной моделью верхней мантии, допускающей вхождение атомов железа и водорода в структуру вадслеита.

В то время как полиморфный переход оливина в вадслеит не сопровождается изменением химического состава, в присутствии граната возникает реакция, приводящая к образованию вадслеита, обогащенного Fe по сравнению с исходным оливином. Более того, вадслеит может содержать значительно больше по сравнению с оливином атомов водорода. Участие атомов Fe и H в структуре вадслеита приводит к уменьшению ее жесткости и

соответственно уменьшению скоростей распространения сейсмических волн, проходящих сквозь этот минерал.

Все предложенные в настоящее время модели состава мантийных пород допускают содержание в них Al_2O_3 в количестве ~ 4 вес. %, которое также влияет на специфику структурных превращений. При этом отмечается, что в отдельных областях неоднородной по составу верхней мантии Al может быть сосредоточен в таких минералах, как корунд Al_2O_3 или кианит Al_2SiO_5 , который при давлениях и температурах, соответствующих глубинам ~ 450 км, трансформируется в корунд и стишовит* - модификацию SiO_2 , структура которой содержит каркас из SiO_6 октаэдров. Оба этих минерала сохраняются не только в низах верхней мантии, но и глубже.

Важнейший компонент химического состава зоны 400-670 км - вода, содержание которой, по некоторым оценкам, составляет $\sim 0,1$ вес. % и присутствие которой в первую очередь связывают с Mg-силикатами [3]. Количество запасенной в этой оболочке воды столь значительно, что на поверхности Земли оно составило бы слой мощностью 800 м.

Состав мантии ниже границы 670 км

Проведенные в последние два-три десятилетия исследования структурных переходов минералов с использованием рентгеновских камер высокого давления позволили смоделировать некоторые особенности состава и структуры геосфер глубже границы 670 км. В этих экспериментах исследуемый кристалл помещается между двумя алмазными пирамидами (наковальнями), при сжатии которых создаются давления, соизмеримые с давлениями внутри мантии и земного ядра. Тем не менее в отношении этой части мантии, на долю которой приходится более половины всех недр Земли, по-прежнему остается много вопросов. В настоящее время большинство исследователей согласны с идеей о том, что вся эта глубинная (нижняя в традиционном понимании) мантия в основном состоит из перовскитоподобной фазы $(Mg,Fe)SiO_3$, на долю которой приходится около

* <http://wiki.web.ru/wiki/Стишовит>

70% ее объема (40% объема всей Земли), и магнезиовюстита $(\text{Mg, Fe})\text{O}$ (~20%). Оставшиеся 10% составляют стишовит и оксидные фазы, содержащие Ca, Na, K, Al и Fe, кристаллизация которых допускается в структурных типах ильменита-корунда (твердый раствор $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$), кубического перовскита (CaSiO_3) и Ca-феррита (NaAlSiO_4). Образование этих соединений связано с различными структурными трансформациями минералов верхней мантии. При этом одна из основных минеральных фаз относительно гомогенной оболочки, лежащей в интервале глубин 410-670 км, - шпинелеподобный рингвудит трансформируется в ассоциацию (Mg, Fe)-перовскита и Mg-вюстита на рубеже 670 км, где давление составляет ~24 ГПа. Другой важнейший компонент переходной зоны - представитель семейства граната пироп $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ испытывает превращение с образованием ромбического перовскита $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$ и твердого раствора корунда-ильменита $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$ при несколько больших давлениях. С этим переходом связывают изменение скоростей сейсмических волн на рубеже 850-900 км, соответствующем одной из промежуточных сейсмических границ. Трансформация Ca-граната андрадита при меньших давлениях ~21 ГПа приводит к образованию еще одного упомянутого выше важного компонента нижней мантии - кубического Ca-перовскита CaSiO_3 . Полярное отношение между основными минералами этой зоны (Mg,Fe)-перовскитом $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$ и Mg-вюститом $(\text{Mg, Fe})\text{O}$ варьирует в достаточно широких пределах и на глубине ~1170 км при давлении ~29 ГПа и температурах 2000-2800 °C меняется от 2 : 1 до 3 : 1.

Исключительная стабильность MgSiO_3 со структурой типа ромбического перовскита в широком диапазоне давлений, соответствующих глубинам низов мантии, позволяет считать его одним из главных компонентов этой геосферы. Основанием для этого заключения послужили эксперименты, в ходе которых образцы Mg-перовскита MgSiO_3 были подвергнуты давлению, в 1,3 млн раз превышающему атмосферное, и одновременно на образец, помещенный между алмазными наковальнями, воздействовали лазерным лучом с температурой около 2000 °C.

Таким образом смоделировали условия, существующие на глубинах ~2800 км, то есть вблизи нижней границы нижней мантии. Оказалось, что ни во время, ни после эксперимента минерал не изменил свои структуру и состав. Таким образом, Л. Лиу, а также Е. Ниттл и Е. Жанлоз пришли к выводу, согласно которому стабильность Mg-перовскита позволяет рассматривать его как наиболее распространенный минерал на Земле, составляющий, по-видимому, почти половину ее массы.

Не меньшей устойчивостью отличается и вюстит Fe_xO , состав которого в условиях нижней мантии характеризуется значением стехиометрического коэффициента $x < 0,98$, что означает одновременное присутствие в его составе Fe^{2+} и Fe^{3+} . При этом, согласно экспериментальным данным, температура плавления вюстита на границе нижней мантии и слоя D", по данным Р. Болера (1996), оценивается в ~5000 К, что намного выше 3800 °С, предполагаемой для этого уровня (при средних температурах мантии ~2500 °С в основании нижней мантии допускается повышение температуры приблизительно на 1300 °С). Таким образом, вюстит должен сохраниться на этом рубеже в твердом состоянии, а признание фазового контраста между твердой нижней мантией и жидким внешним ядром требует более гибкого подхода и уж во всяком случае, не означает четко очерченной границы между ними.

Выделение отдельных промежуточных сейсмических границ, расположенных ниже рубежа 670, коррелирует с данными о структурных трансформациях мантийных минералов, формы которых могут быть весьма разнообразными. Иллюстрацией изменения многих свойств различных кристаллов при высоких значениях физико-химических параметров, соответствующих глубинной мантии, может служить, согласно Р. Жанлозу и Р. Хейзену, зафиксированная в ходе экспериментов при давлениях 70 гигапаскалей (ГПа) (~1700 км) перестройка ионноковалентных связей вюстита в связи с металлическим типом межатомных взаимодействий. Рубеж 1200 может соответствовать предсказанной на основе теоретических квантово-механических расчетов и впоследствии смоделированной при

давлении ~ 45 ГПа и температуре ~ 2000 °С перестройке SiO_2 со структурой стишовита в структурный тип CaCl_2 (ромбический аналог рутила TiO_2), а 2000 км - его последующему преобразованию в фазу со структурой, промежуточной между $\alpha\text{-PbO}_2$ и ZrO_2 , характеризующуюся более плотной упаковкой кремнийкислородных октаэдров (данные Л.С. Дубровинского с соавторами). Отмеченные особенности позволяют рассматривать вюстит как один из наиболее сложных минералов с необычными свойствами, определяющими специфику обогащенных им

Можно прогнозировать, что новые данные о структурных изменениях минеральных фаз на больших глубинах позволят найти адекватную интерпретацию и другим важнейшим геофизическим границам, фиксируемым в недрах Земли. Общее заключение таково, что на таких глобальных сейсмических рубежах, как 410 и 670 км, происходят значительные изменения в минеральном составе мантийных пород. Минеральные преобразования отмечаются также и на глубинах ~ 850 , 1200, 1700, 2000 и 2200-2300 км, то есть в пределах нижней мантии. Это весьма важное обстоятельство, позволяющее отказаться от представления об ее однородной структуре.

3. Процессы обмена вещества с ядром и поверхностью

Процессы, идущие в мантии, оказывают самое непосредственное влияние на земную кору и поверхность земли, являются причиной движения континентов, вулканизма, землетрясений, горообразования и формирования рудных месторождений. Всё больше свидетельств того, что на саму мантию активно влияет металлическое ядро планеты.

Несомненно, что земная кора выделилась из мантии; процесс дифференциации мантии. продолжается и сейчас. Есть предположение, что и земное ядро разрастается за счёт мантии. Процессы в земной коре и мантии. тесно связаны; в частности, энергия для тектонических движений земной коры, по-видимому, поступает из мантии.

Верхнюю часть верхней мантии и земную кору слитно выделяют как литосферу, являющуюся верхней твердой оболочкой Земли, в противоположность гидро- и атмосфере. Благодаря теории тектоники литосферных плит термин "литосфера" получил широчайшее распространение. Теория предполагает движение плит по астеносфере - размягченном, частично, возможно, жидком глубинном слое пониженной вязкости. Однако сейсмология не показывает выдержанной в пространстве астеносферы. Для многих областей выявлены несколько астеносферных слоев, расположенных по вертикали, а также прерывистость их по горизонтали. Особенно определенно их чередование фиксируется в пределах континентов, где глубина залегания астеносферных слоев (линз) варьирует от 100 км до многих сотен.

Под океанскими абиссальными впадинами астеносферный слой лежит на глубинах 70-80 км и менее. Соответственно нижняя граница литосферы фактически является неопределенной, а это создает большие трудности для теории кинематики литосферных плит, что и отмечается многими исследователями.

На границе ядра и мантии отмечается резкий скачок не только в скорости продольных волн, но и в плотности. В мантии она снижается до $5,5 \text{ г/см}^3$. Слой D", находящийся в непосредственном соприкосновении с внешним ядром, испытывает его влияние, поскольку температуры в ядре значительно превышают температуры мантии. Местами данный слой порождает огромные, направленные к поверхности Земли сквозь мантийные тепломассопотоки, называемые плюмами*. Они могут проявляться на планете в виде крупных вулканических областей, как, например, на Гавайских островах, в Исландии и других регионах.

Периодичность в деятельности вулканов отражает, несомненно, происходящие время от времени изменения в верхней мантии Земли, куда уходят корни вулканов. Выход лавы и газов на поверхность связан с глубокими разрывами в земной коре, поэтому деятельность вулканов можно связывать с перемещением участков земной коры в стороны от разломов. Так создаются зоны проницаемости для магмы†, под давлением газов устремляющиеся к поверхности.

Движение магмы к поверхности обусловлено, во-первых, огромным давлением толщ горных пород; во-вторых, с уменьшением давления увеличивается объем магмы за счет выделения растворенных газов. Магматическое вещество, содержащее 9-10% воды, при подъеме с глубины в 40 м к поверхности увеличивает свой объем в 1000 раз. Резкое увеличение объема начинается с глубины около 5 км от поверхности.

Непосредственное изучение магмы в наше время технически не возможно. Раскаленная масса, изливающаяся из вулканов, доступна нашему изучению, но это уже не магма, а ее силикатная часть, лишенная паров и газов, которая называется лавой. Точно так же нельзя получить магму, если расплавить базальт или другую горную породу.

* Плюм (англ. plume) — горячий мантийный поток,двигающийся независимо от конвективных течений в мантии.

† Магма (др.-греч. μάζα — месиво, густая мазь)

4. Источники информации о мантии

Мантия Земли недоступна непосредственному исследованию: она не выходит на земную поверхность и не достигнута глубинным бурением. Поэтому большая часть информации о мантии получена **геохимическими** и **геофизическими** методами. Данные же о её геологическом строении очень ограничены.

Мантию изучают по следующим данным:

Геофизические данные. В первую очередь данные о скоростях сейсмических волн, электропроводности и силе тяжести.

Мантийные расплавы — базальты, коматииты, кимберлиты, лампроиты, карбонатиты и некоторые другие магматические горные породы образуются в результате частичного плавления мантии. Состав расплава является следствием состава плавившихся пород, механизма плавления и физико-химических параметров процесса плавления. В целом, реконструкция источника по расплаву — сложная задача.

Фрагменты мантийных пород, выносимые на поверхность мантийными же расплавами — кимберлитами, щелочными базальтами и др. Это ксенолиты, ксенокристы и алмазы. Алмазы занимают среди источников информации о мантии особое место. Именно в алмазах установлены самые глубинные минералы, которые, возможно, происходят даже из нижней мантии. В таком случае эти алмазы представляют собой самые глубокие фрагменты земли, доступные непосредственному изучению.

Мантийные породы в составе земной коры. Такие комплексы в наибольшей степени соответствуют мантии, но и отличаются от неё. Самое главное различие — в самом факте их нахождения в составе земной коры, из чего следует, что они образовались в результате не совсем обычных процессов и, возможно, не отражают типичную мантию. Они встречаются в следующих геодинамических обстановках:

1. Альпинотипные гипербазиты — части мантии, внедренные в земную кору в результате горообразования. Наиболее распространены в Альпах, от которых и произошло название.

2. Офиолитовые гипербазиты — перidotиты в составе офиолитовых комплексов — частей древней океанической коры.

3. Абиссальные перidotиты — выступы мантийных пород на дне океанов или рифтов.

Эти комплексы имеют то преимущество, что в них можно наблюдать геологические соотношения между различными породами.

Недавно было объявлено, что японские исследователи планируют предпринять попытку пробурить океаническую кору до мантии. Для этого построен кораблю Тикю. Начало бурения планируется на 2007 год.

Основной недостаток полученной из этих фрагментов информации — невозможность установления геологических соотношений между различными типами пород. Это кусочки паззла*. Как сказал классик, «определение состава мантии по ксенолитам напоминает попытки определения геологического строения гор по галькам, которые из них вынесла речка».

4. 1. Сейсмические волны

Всем известно, как выглядит поверхность Земли, так как мы часто видим карты и рисунки нашей планеты; мы имеем представление о земной поверхности, видя ее ландшафт. Но как выглядит Земля внутри?

Никто не может совершить путешествие к центру нашей планеты, чтобы познакомиться с ее строением, но сейчас мы многое знаем о внутреннем строении Земли благодаря приборам, регистрирующим волны, которые возникают во время землетрясений.

* Складная картинка, пазл, пазл (от англ. jigsaw puzzle) — игра-головоломка, представляющая собой мозаику, которую требуется составить из множества фрагментов рисунка различной формы.

Ежегодно нашу планету сотрясает не менее десятка сильных, разрушительных землетрясений. В процессе самого слабого из таких землетрясений высвобождается энергия в тысячу раз больше, чем при взрыве атомной бомбы. Волны, возникающие в результате толчков, распространяются через толщу Земли; их путь искривляется из-за различных характеристик внутренних слоев Земли. Таким образом, сейсмические волны показывают характер слоев, через которые они проходят. Записав волны с помощью сейсмографов, можно изучать их и на основе этого составить картину внутреннего строения Земли. Фактически, сейсмографы просвечивают Землю как будто рентгеном, хотя иногда они видят ее как бы сквозь затемненное стекло.

До появления науки сейсмологии наши знания о внутреннем строении Земли основывались на гипотезах и догадках. Благодаря достижениям этой науки современные знания о структуре Земли основываются на научных исследованиях. С учетом геологических данных, получаемых в ходе исследования горных пород на поверхности Земли, лабораторных экспериментов с горными породами при высоких давлениях и некоторым астрономическим наблюдениям мы хорошо представляем себе условия в толще Земли, ее слоистую структуру, химический состав, физические характеристики слоев, давление и т.д.

Если бросить камень в воду (например, в пруд), можно наблюдать волны, расходящиеся от точки соприкосновения камня с поверхностью воды; но эти волны также распространяются и в толще воды, расходясь от той же точки. Что-то похожее происходит и во время землетрясения. От очага или места разрыва земной коры расходятся волны упругих колебаний во всех направлениях внутри и по поверхности Земли.

Для большинства землетрясений* с глубиной очага не более 70 километров упругие волны возникают в результате разлома участка земной коры. Другими словами, напряжение в горной породе на данном участке

* Землетрясения — подземные толчки и колебания поверхности Земли, вызванные естественными причинами (главным образом тектоническими процессами). Небольшие толчки могут вызывать также подъём лавы при вулканических извержениях.

превышает предел прочности на разрыв и поэтому в породе образуется трещина, появляется разрыв, который обычно называется "разломом". В результате возникновения этого разлома образуются сейсмические волны.



Рисунок 4. Прохождение сейсмических волн в толще Земли

Разлом можно охарактеризовать как относительное перемещение блоков земной коры, что видно на нижеследующем рисунке.

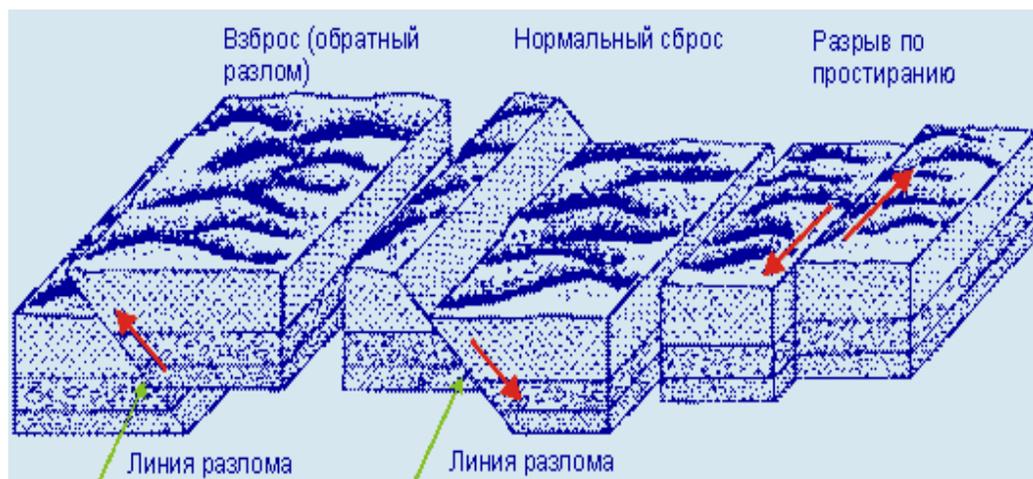


Рисунок 5. Характеристика разлома

Как только напряжение превышает величину предела прочности на разрыв горных пород в данном месте (т.е. образуется разлом), возникают сейсмические волны трех основных типов.

1. Волна сжатия – растяжения, Р-волна. Эта волна представляет собой звуковую волну. Ее еще называют продольной волной. Когда такая

волна в стадии сжатия достигает сейсмической станции, порода в зоне станции сжимается, и грузик сейсмографа отклоняется в направлении движения волны или от эпицентра землетрясения. И наоборот, когда такая волна проходит станцию в стадии растяжения, земная поверхность расширяется, и грузик сейсмографа движется по направлению к эпицентру. Эти направления регистрируются сейсмографом. Из всех сейсмических волн продольная волна. Самая быстрая и поэтому она используется для регистрации первичного толчка Р. Продольные волны, как и звуковые волны, могут распространяться в твердой породе и в жидкости.

2. Поперечная волна, или волна сдвига, или S-волна. Эта волна аналогична световой волне или поперечным колебаниям струны. Частица материала всегда перемещается поперечно по отношению к направлению распространения волны. Внутренние поперечные волны распространяются со скоростью, которая составляет примерно 0,6 от скорости продольной волны Р, и появляются позднее в качестве второй наиболее заметной группы волн. Поэтому они используются для регистрации вторичного толчка S. Эти волны не могут распространяться через жидкости и газы. Скорость распространения волн Р и S зависит от плотности и упругости горных пород, через которые они проходят. Стандартные скорости распространения волны Р в граните и воде составляют соответственно 5,5 и 1,5 км/с, в то время как скорость S-волны в тех же породах составляет примерно 3,0 и 0 км/с. Последнее значение равно нулю, потому что модуль сдвига жидкостей равен 0.

3. Поверхностные волны, L-волны. В них заключается большая часть волновой энергии, они называются поверхностными, потому что они распространяются вблизи поверхности Земли.

Есть два типа поверхностных волн. Наиболее быстрая из двух - это волна сдвига, известная как волна Лява (L_q), названная так в честь физика, который разработал ее теоретическую концепцию, или как G-волна, названная в честь сейсмолога Гутенберга, который обнаружил и исследовал наличие этой волны на сейсмограммах. Движение частицы поперечно

направлению распространения волны и происходит только в горизонтальной плоскости, как показано на представленных здесь рисунках. В этой волне нет вертикальной составляющей. Вторым типом поверхностной волны является волна Рэлея (Lr), названная так в честь физика, который разработал теоретическую концепцию этой волны. Эта волна прибывает вскоре после поверхностной волны сдвига, так как ее скорость составляет 0,92 от скорости волны сдвига. В волне Рэлея частица грунта совершает возвратное движение по эллиптической орбите в вертикальной плоскости вдоль направления распространения волн, как показано на рисунках.

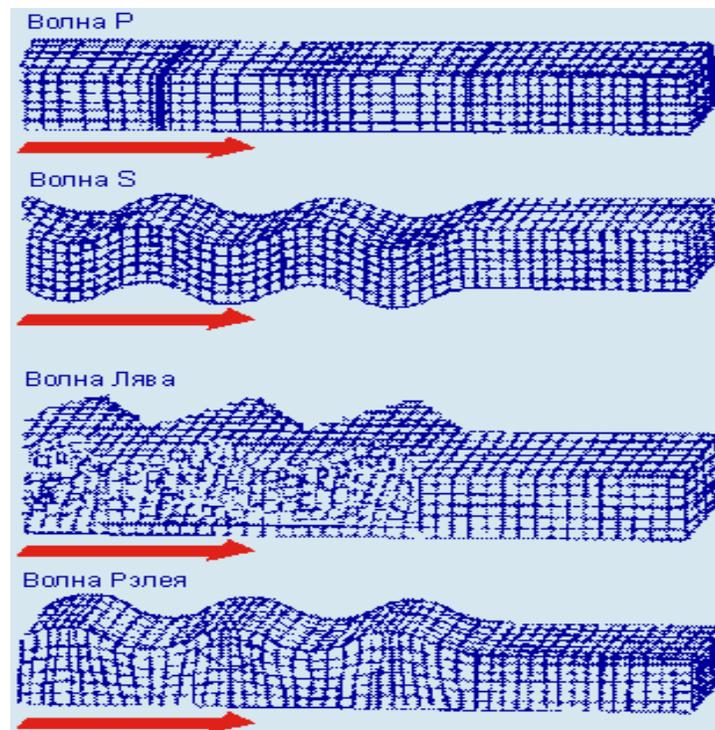


Рисунок 6. Распространение сейсмических волн

На основании всех этих знаний Олдем в 1906 году доказал, что Земля имеет центральное ядро, а в 1914 году Бено Гутенберг определил, что верхняя граница ядра находится на расстоянии 2 896 километров от поверхности Земли. Так как радиус Земли составляет 6 370 км, то радиус ядра равен 3 474 км. Благодаря этим и другим исследованиям (Датский сейсмолог Инге Леманн в 1936 г. обнаружила существование твердого внутреннего ядра Земли) было доказано, что Земля состоит из четырех основных слоев или геосфер.

Как говорилось ранее, в земной коре, мантии и ядре отмечаются различные скорости распространения сейсмических волн. Концентрическую слоистость Земли можно выразить и в других терминах, связанных с прочностью и вязкостью вещества. В соответствии с этим подходом можно выделить литосферу, астеносферу и мезосферу. Литосфера представляет собой самую верхнюю оболочку Земли (толщиной до 100 км) и включает земную кору и самую верхнюю мантию. Она отличается своей способностью выдерживать большие поверхностные нагрузки без прогибания. Она достаточно холодная и поэтому прочная. Под литосферой (примерно до глубины 700 км) располагается астеносфера ("астенос" по-гречески "мягкий"). Температура астеносферы близка к точке плавления; поэтому астеносфера не такая прочная и со временем деформируется под воздействием прилагаемых сил. Следующий слой называется мезосферой. Мезосфера более прочная, чем астеносфера, но более вязкая, чем литосфера. Мезосфера простирается до ядра и таким образом включает большую часть мантии.

Эти концентрические слои и их соотношение со слоями, о которых говорилось выше, показаны на нижеследующем рисунке.

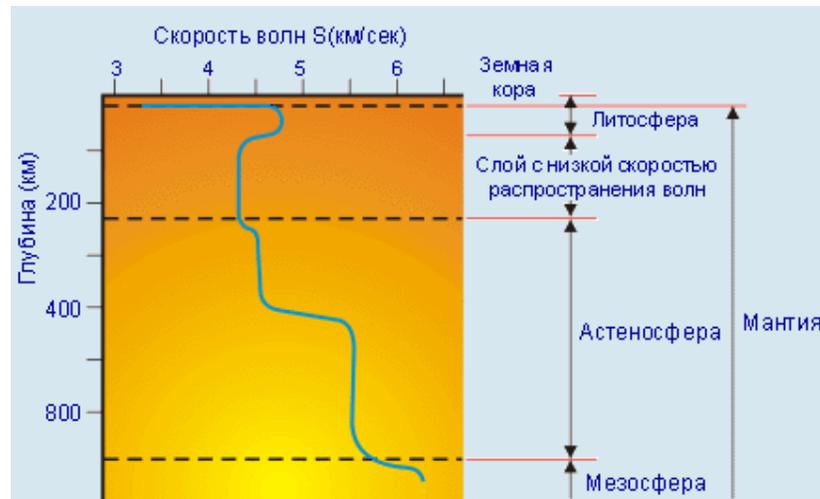


Рисунок 7. Внутреннее строение Земли на основании данных о скорости распространения S -волн

Мантия в основном твердая. Сейсмические волны распространяются со скоростями, которые растут с глубиной, так как плотность увеличивается с 3,3 до 5,5 грамм на кубический сантиметр. Это увеличение плотности происходит дискретно. Строение мантии сложное, в ней различаются структуры с разными характеристиками как в вертикальной плоскости, так и в горизонтальной. Что касается вертикальной плоскости, наиболее важное значение имеет уменьшение скорости распространения S-волны с 4,7 до 4,3 км/с на глубине от 75 до 150 км. Возможно этот слой с низкой скоростью распространения волн представляет зону частичного расплавления вещества в верхней мантии, что может быть источником расплавленной породы или магмы, которая поднимается на поверхность, образуя изверженные магматические или вулканические породы.

Заключение

Исследование глубинного строения Земли относится к наиболее крупным и актуальным направлениям геологических наук. Новая стратификация мантии Земли позволяет значительно менее схематично, чем прежде, подойти к сложной проблеме глубинной геодинамики. Различие в сейсмических характеристиках земных оболочек (геосфер), отражающих различие в их физических свойствах и минеральном составе, создает возможности для моделирования геодинамических процессов в каждой из них в отдельности. Геосферы в этом смысле, как теперь совершенно ясно, обладают известной автономностью. От дальнейшего развития сейсмотомографии*, как и некоторых других геофизических исследований, а также изучения минерального и химического состава глубин будут зависеть существенно более обоснованные построения в отношении состава, структуры, геодинамики и эволюции Земли в целом.

* Целевым назначением сейсмотомографии является детальное изучение состояния грунтов на обследуемом участке по результатам геофизических исследований

Список литературы

1. Войткевич Г. В., Закруткин В. В.. Основы геохимии. – М.: «Высшая школа» 1976. с 109 - 121
2. Добровольский В. В. Химия Земли – М.: Просвещение, 1980. с. 5 – 31.
3. Магницкий В. А., Внутреннее строение и физика Земли, М., 1965; Проблемы строения земной коры и верхней мантии. Сборник статей, М., 1970.
4. Пушаровский Д.Ю. Глубинные минералы Земли // Природа. 1980. N 11. С. 119-120.
5. Пушаровский Ю.М. Сейсмотомография и структура мантии: Тектонический ракурс // Доклады АН. 1996, N 6. С. 805-809.
6. Щербина В. В Основы геохимии. М., «Недра», 1972. с. 11 – 17.

Список интернет-источников.

Материал из [GeoWiki - открытой энциклопедии по наукам о Земле.](#)

[Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 584 с.](#)

<http://tsun.sgcc.ru/tsulab/>

Список иллюстраций

Рисунок 1. <i>Строение Земли</i>	5
Рисунок 2. <i>Схема глубинного строения Земли</i>	7
Рисунок 3. <i>Модели строения Земли: а - традиционная модель, распространённая в настоящее время; б - новая модель, основанная на анализе сейсмотомографических карт и данных о сейсмических границах. Мощности могут варьировать в пределах до 10%. </i>	8
Рисунок 4. <i>Прохождение сейсмических волн в толще Земли</i>	20
Рисунок 5. <i>Характеристика разлома</i>	20
Рисунок 6. <i>Распространение сейсмических волн</i>	22
Рисунок 7. <i>Внутреннее строение Земли на основании данных о скорости распространения S-волн</i>	23