

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

- Диаграмма SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ использована для классификации всех магматических горных пород - как вулканических, так и интрузивных.

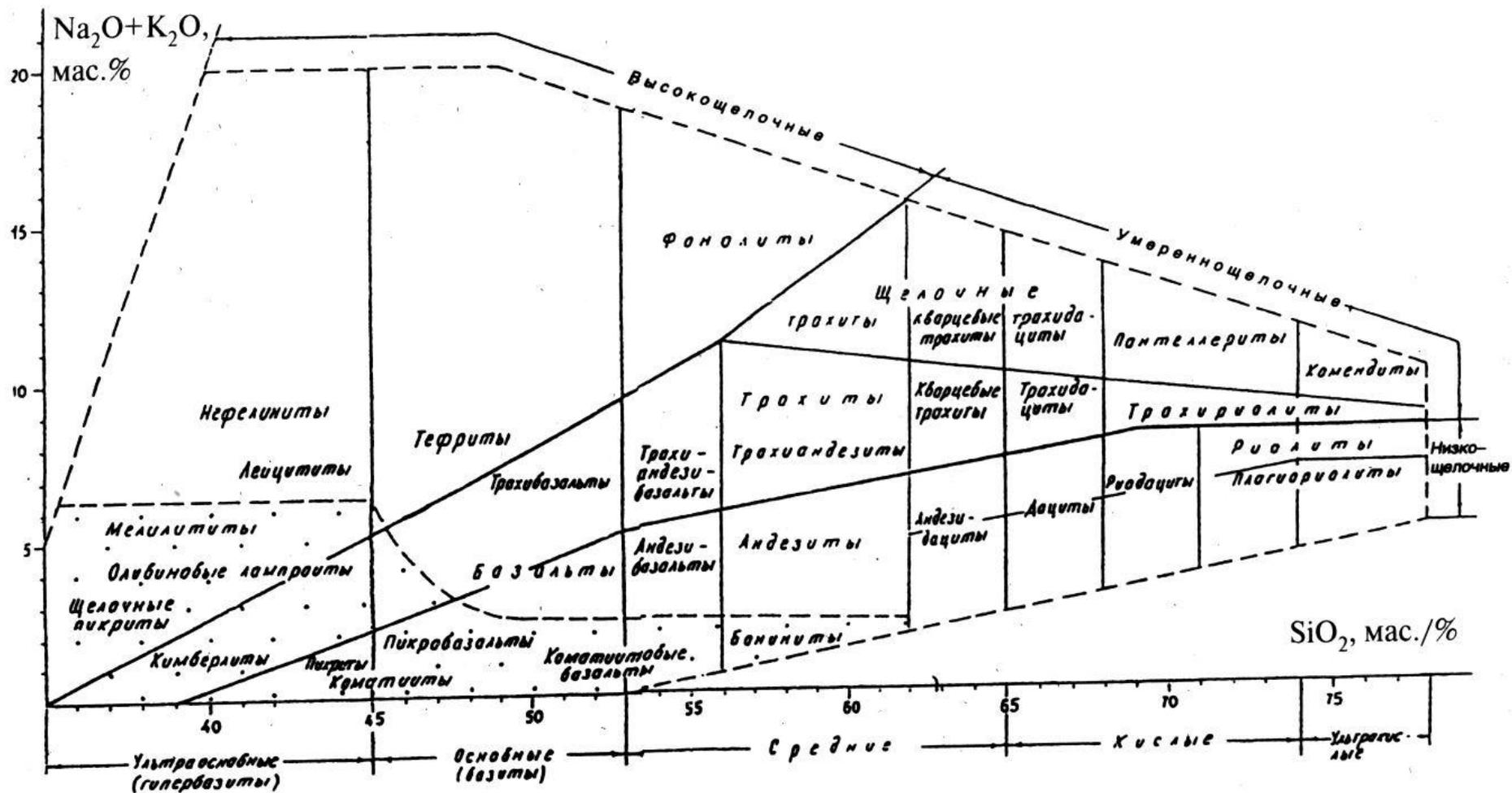
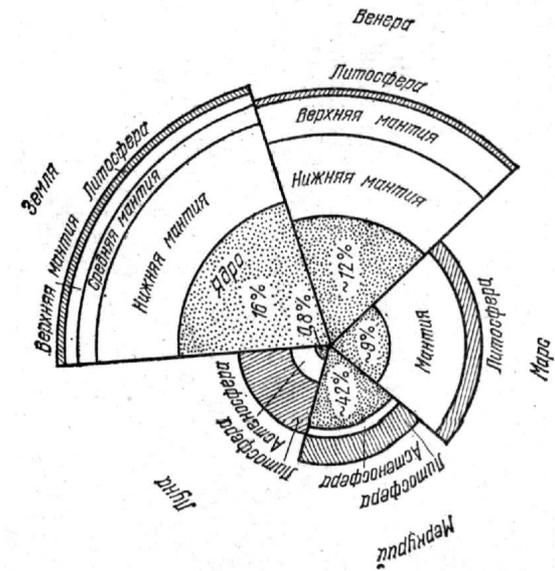


Рис. 2.5. Классификация вулканических пород, принятая в учебнике
($\text{MgO} \geq 18\%$) и мафических ($10\% < \text{MgO} < 18\%$) пород



- Земля является одной из планет земной группы, куда кроме нее входят Венера, Марс, Меркурий и Луна. Все они представляют собой твердые тела с железным ядром и силикатной оболочкой, и, по видимому развивались по сходному сценарию. Очевидно, что лучше всего изучена Земля, и о том, как она устроена, мы и поговорим в этой лекции

- Основные сведения о внутреннем строении Земли получены сейсмическими методами, основу которым заложил в начале прошлого века наш соотечественник академик Голицын. Этот метод основан на том, что сейсмические волны, возникающие при землетрясениях или крупных взрывах, проходя через толщу Земли, отражаются от границ масс пород разной плотности. Изучая распределение в глубину скоростей распространения сейсмических волн, Голицын впервые показал, что Земля состоит из нескольких оболочек с различными физическими свойствами, которые определяются как **составом** самого вещества, так и **давлением** и **температурой**, существующими на той или иной глубине.
- По аналогии с гидростатическим давлением в столбе воды, давление, вызванное весом вышележащих пород, называют **литостатическим**. Если плотность пород (ρ) постоянна, то на глубине h литостатическое давление $P = \rho gh$, где g - ускорение силы тяжести.
- Литостатическое давление измеряют в **барах** и **килобарах**, а также в **мега- и гигапаскалях**:
- бар = 1 000 000 дин/см² = 0,9869 атм (кг/см²) = 100 000 Па (ньютон / м²);
- килобар (кбар) = 1000 бар;
- мегапаскаль (МПа) = 1000 000 Па = 10 бар;
- 100 МПа = 100 000 000 Па = 1000 бар = килобар;
- гигапаскаль (ГПа) = 1 000 000 000 Па = 10 кбар.
- **При плотности горных пород, равной 3,3 - 2,5 г/см³, увеличение глубины на 3.5 км сопровождается ростом литостатического давления примерно на 100 МПа (1 кбар).**

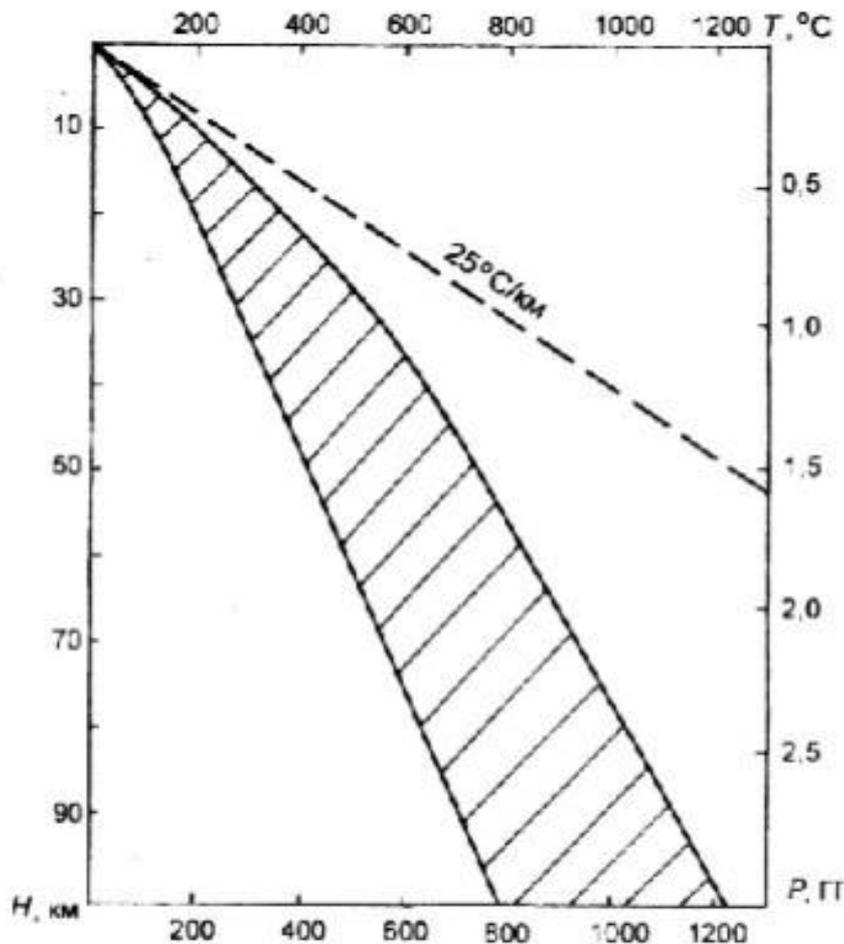


Рис. 1.1. Возможное распределение температур под континентами (левая кривая) и океанами (правая кривая); пунктир — см. в тексте

Стационарный геотермический градиент (т.е. систематическое повышение температуры с глубиной) вблизи поверхности Земли составляет в среднем $25^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Если бы такой градиент сохранялся и глубже, то почти вся Земля была бы расплавленной.

Однако, сейсмические данные ясно указывают на то, что верхние оболочки Земли находятся сейчас в твердом состоянии. Следовательно, геотермический градиент уменьшается с глубиной.

Самые низкие температуры в земной коре и верхней мантии характерны для древних щитов и платформ на континентах, а самые высокие - для подводных срединно-океанических хребтов и активных рифтовых зон на континентах. Возможное распределение температур под континентами и океанами показано на рисунке.

По изменению физических свойств с глубиной выделяются земная кора, верхняя и нижняя мантия, внешнее и внутреннее ядро.

Вот как выглядит внутренне строение Земли по сейсмическим данным

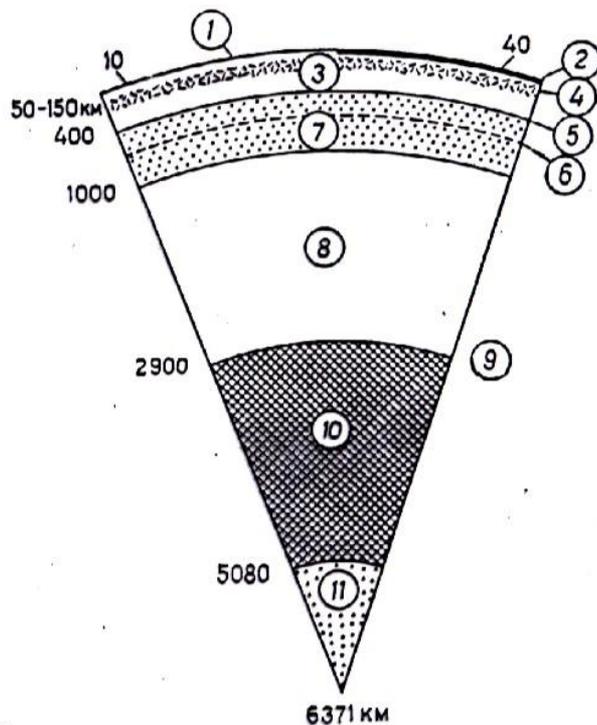
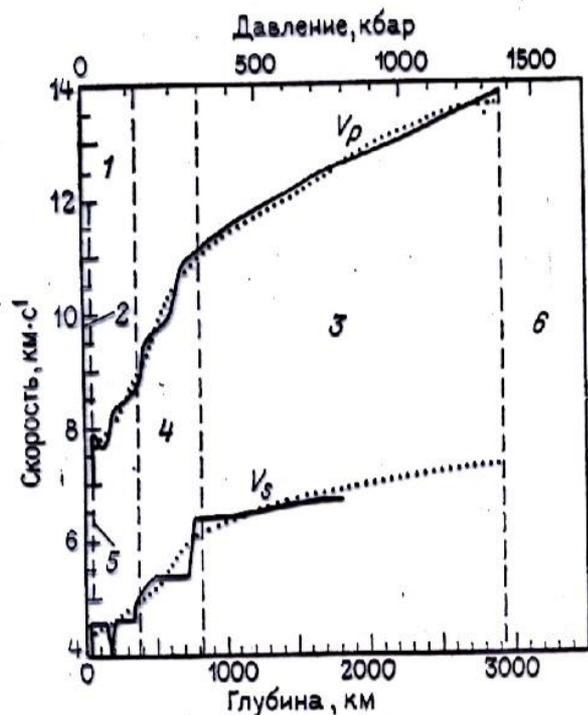


Рис. 1.1. Распределение скоростей прохождения продольных и поперечных сейсмических волн в мантии и внешней части ядра.

Сплошные линии — значения продольных V_p [278, 279] и поперечных волн V_s [407]; пунктир — то же [277].

1 — верхняя мантия; 2 — континентальная кора; 3 — нижняя мантия; 4 — переходная зона; 5 — граница Мохо под континентами; 6 — ядро

Рис. 1.2. Принципиальная схема под разделения Земли [473].

1 — кора; 2 — граница Мохо; 3 — верхняя мантия; 4 — слой пониженных скоростей; 5 — 20-градусная граница раздела; 6 — 650-километровая граница раздела; 7 — переходная зона; 8 — нижняя мантия; 9 — граница ядро-мантия; 10 — внешнее ядро; 11 — внутреннее ядро

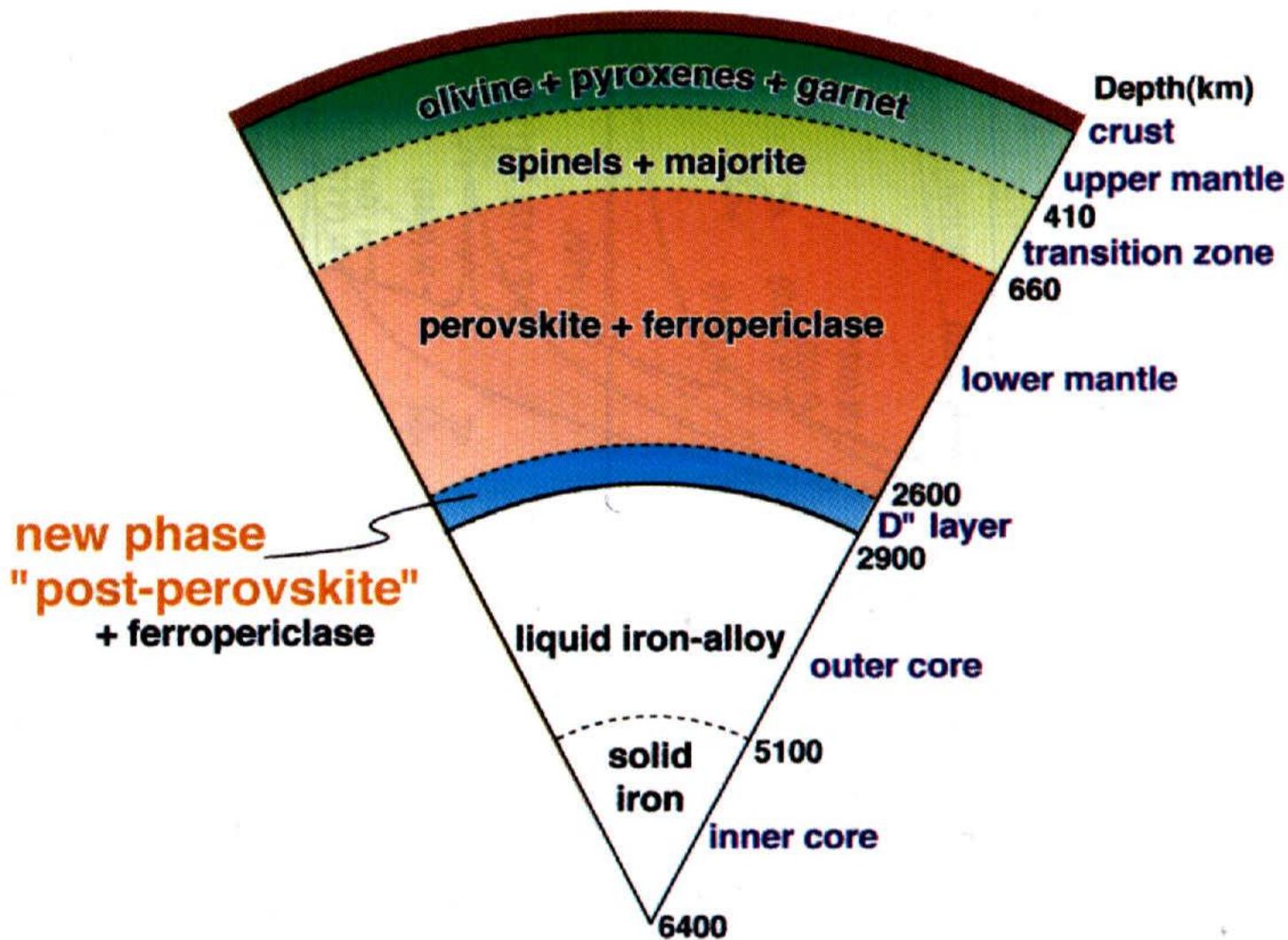


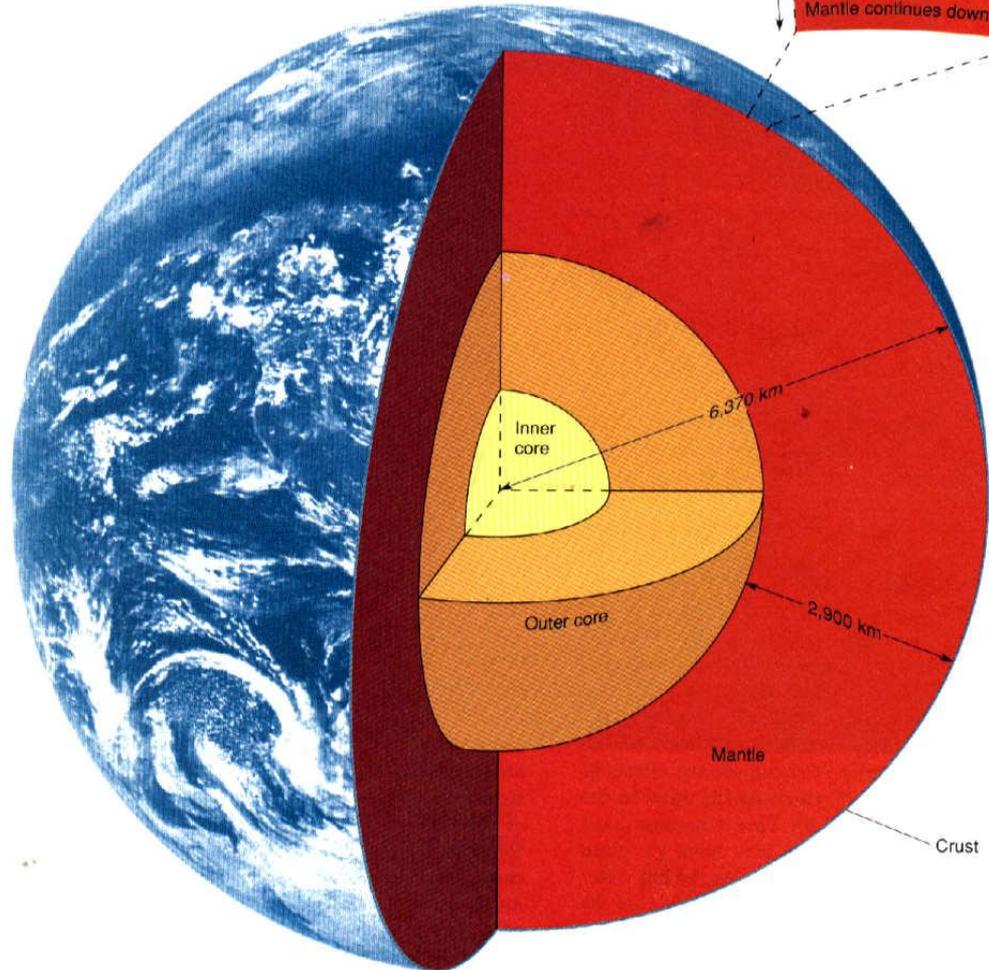
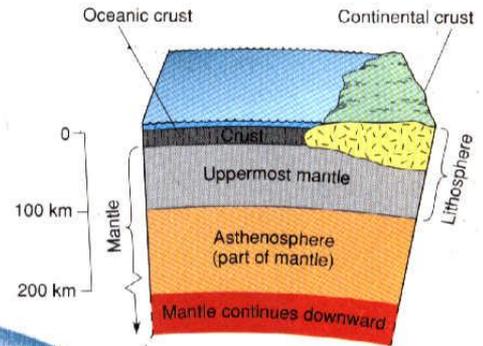
FIGURE 1 Simplified cross-section of the Earth. The main constituent minerals in the mantle change from olivine + pyroxenes + garnet (or Al-rich spinel) in the upper mantle, to spinels + majorite in the transition zone, to perovskite + ferropericlase in the lower mantle, and to post-perovskite + ferropericlase in the D" layer. The boundaries between the layers are characterized by seismic-wave discontinuities.

ЗЕМНАЯ КОРА

Самая верхняя оболочка Земли - **земная кора** - существенно различается по составу и строению под континентами и под океанами.

Мощность (толщина) **континентальной коры** варьирует от 25 до 75 км; в среднем она равна 35-40 км.

Мощность **океанической коры** (без слоя воды) составляет всего 7-10 км.

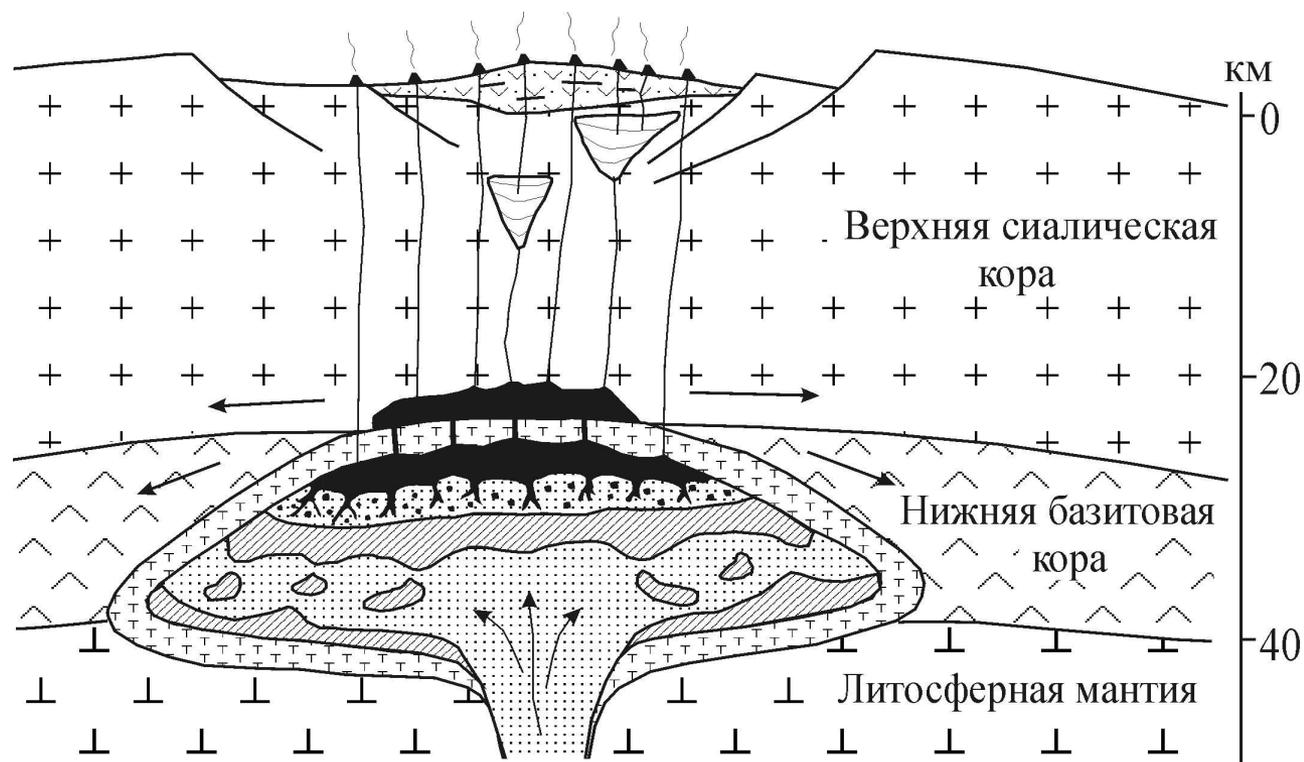


• **Континентальная земная кора**

- *Под континентами* по скоростям распространения упругих волн обычно выделяют три слоя: (1) осадочный: (2) гранитно-метаморфический, или "гранитный", которые слагают верхнюю кору, и (3) гранулит-базитовый, или "базальтовый" (нижняя кора). Как верхняя, так и нижняя кора образованы разнородными породами. Термины "осадочный", "гранитный" и "базальтовый" слои в большей мере отражают интегральные физические характеристики этих слоев, чем их реальный состав.
- Для **осадочного слоя**, который местами содержит большое количество вулканитов, характерно пологое залегание пород и отсутствие метаморфизма. Основание осадочного слоя четко фиксируется сейсмическими методами.
- Ниже располагается кристаллический фундамент, который обычно представляет собой **гранитно-метаморфический слой**. Кроме гранитов и их метаморфических эквивалентов – гнейсов, в строении этого слоя принимают участие средние, основные и даже ультраосновные магматические породы, а также дислоцированные и метаморфизованные осадочные толщи.

- О составе и структуре **верхней коры** до глубины 15 - 20 км можно судить по породам, выведенным на дневную поверхность в пределах древних щитов, например, Балтийского, восточная часть которого распложена на территории Карелии и Кольского полуострова.
- В большинстве случаев ниже этого слоя скорость сейсмических волн возрастает до 6-7 км/сек, что характерно для пород основного состава. Судя по ксенолитам (фрагментами пород со стенок канала, захваченных магмой по пути наверх), породы **нижней коры** в большинстве случаев действительно имеют основной состав, хотя и преобразованы в условиях высоких температур и давлений (гранулитовая фация метаморфизма), и поэтому ряд исследователей называет этот слой гранулитобазитовым.
- В настоящее время предполагается, что происхождение нижней коры связано с явлением **андерплейнга**, или подслаивания, т.е. внедрения базальтовой расплава вдоль границы коры и мантии. Из этого следует, что нижняя кора могла формироваться независимо от верхней, причем может быть существенно ее моложе.

Сейсмический раздел между "гранитным" и "базальтовым" слоями - **граница Конрада**, или **поверхность К** - прослежен в разных районах на неодинаковых глубинах и характеризуется разными граничными скоростями, что указывает на неоднородность земной коры и условность ее деления на горизонтальные слои.



1 – вулканиты; 2- промежуточные камеры; 3 – расплав; 4-зона плавления; 5- рестит (тугоплавкий остаток); 6 –краевая часть мантийного плюма; 7 – свежий материал плюма

- Все бы хорошо, но результаты глубокого и сверхглубокого бурения, особенно Кольской сверхглубокой скважины (12700 м), показали, что многие сейсмические границы в земной коре могут отражают изменение не столько состава пород, сколько их напряженного состояния, пористости и проницаемости. Так, в Кольской скважине, пробуренной в районе Печенги, “гранитный” слой геофизиков оказался сложным древними вулканическими породами основного состава, а верхняя часть подстилающего “гранулитобазитового” слоя – наоборот, гранитоидными породами.
- Эти данные подтверждают условность деления земной коры на слои глобального распространения. Так что ситуация на самом деле не так проста как хотелось бы.
- Верхняя и нижняя части континентальной коры различаются и по механическим свойствам. Если в верхней коре преобладают хрупкие разрывы, то в нижней коре возрастает значение пластических деформаций. Многие тектонические нарушения, достигая нижней коры, затухают или выполаживаются. Внутри нижней коры преобладают пологие ослабленные зоны и срывы.

- Нижняя кромка континентальной коры - **граница Мохоровичича**, или **поверхность М** - фиксируется по резкому увеличению скорости распространения продольных упругих волн от 6.5--7.0 до 8.0--9.0 км/сек, что должно соответствовать смене основных пород нижней коры более плотными породами верхней мантии: ультрамафитами и, в меньшей мере - эклогитами (высокоплотными метаморфическими породами преимущественно основного состава).
- Поверхность М наиболее уверенно прослеживается под древними кратонами. Под тектонически активными зонами, например, под современными рифтами – областями растяжения в земной коре, такими как рифты Байкальский, Рейнский, Восточной Африки и др.), граница М нередко теряет свою определенность благодаря появлению крупных линзообразных тел с промежуточными скоростями продольных волн, так называемых **рифтовых подушек**. В их пределах наблюдается частичная потеря поперечных волн. Поэтому большинство исследователей полагает, что здесь происходит частичное плавление мантии, которое обеспечивает базальтовый магматизм, столь характерный для рифтовых структур. По существу, это и есть растекающаяся головная часть мантийного плюма, о чем я уже говорил во вводной лекции.

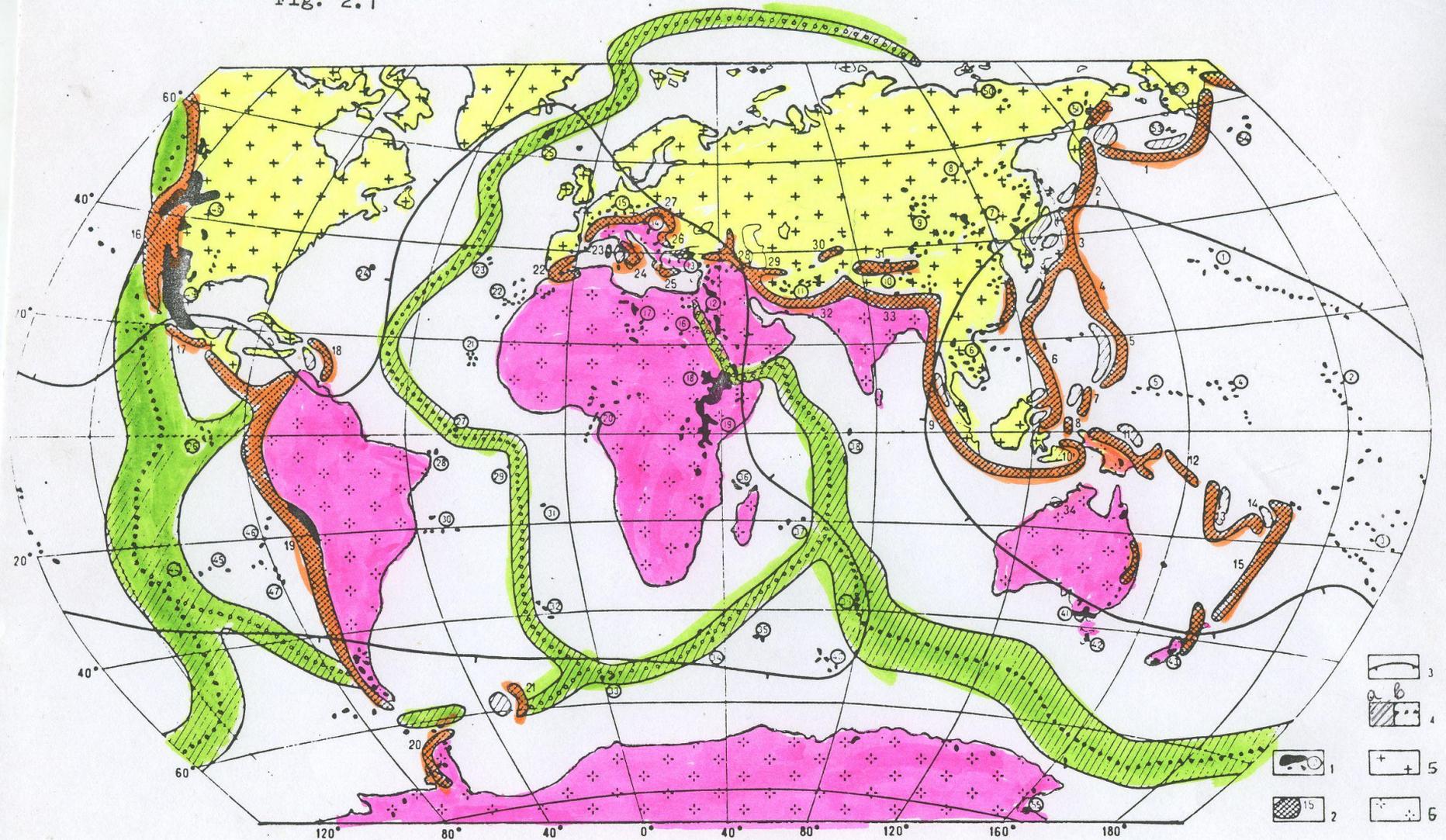
- Предложено несколько геохимических моделей, характеризующих средний состав верхней и нижней континентальной коры, а также континентальной коры в целом.
- Оценки среднего состава верхней коры, основанные на результатах изучения ее обнаженной части, во всех моделях оказываются сходными: верхняя кора имеет в среднем *гранодиоритовый*, или *андезитовый* состав. Следует подчеркнуть, что речь идет не о распространенности тех или иных пород, а о средних составах, представляющих смесь основных и кислых пород; собственно породы среднего состава редки.
- В общем-то не очень ясна и природа самого раздела Мохоровичича под континентами, особенно под древними платформами. Как уже говорилось, часть исследователей полагает, что он имеет чисто механическую природу и соответствует границе окончательного перехода от хрупких к пластическим деформациям. Так что здесь еще многое предстоит выяснить.

Кора океанического типа

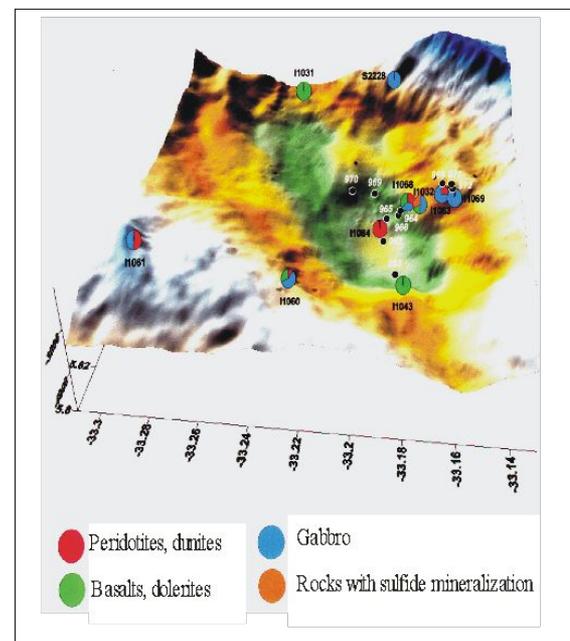
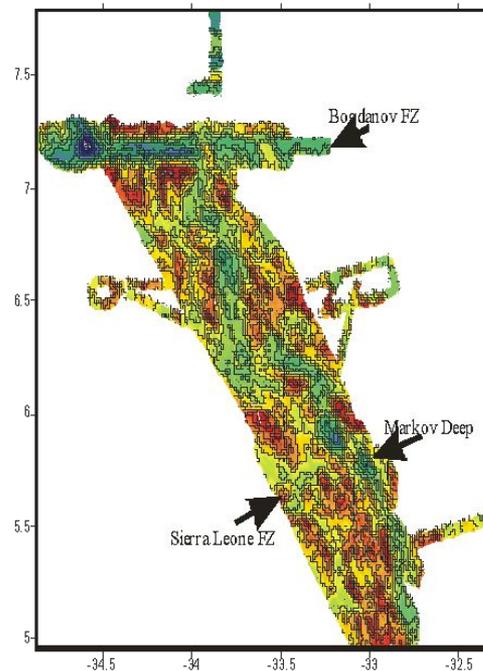
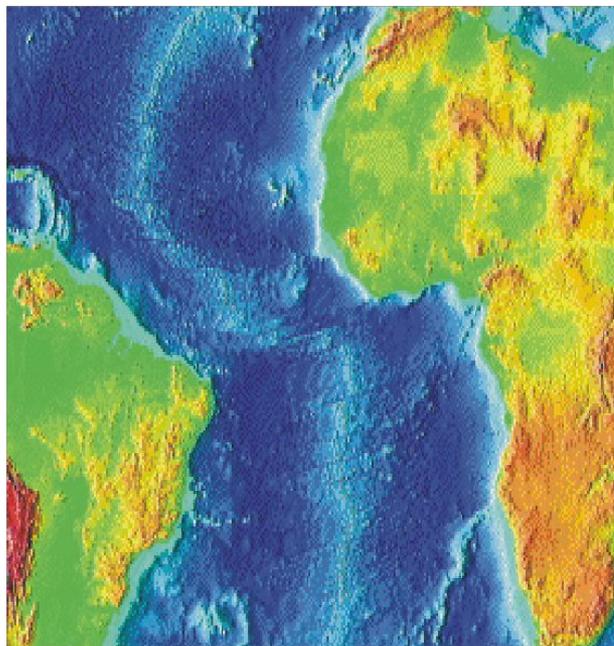
- На долю коры океанического типа приходится около 60% твердой поверхности Земли. Она, конечно, изучена значительно хуже, чем континентальная, поскольку находится под слоем воды в среднем около 4.5 км глубиной.



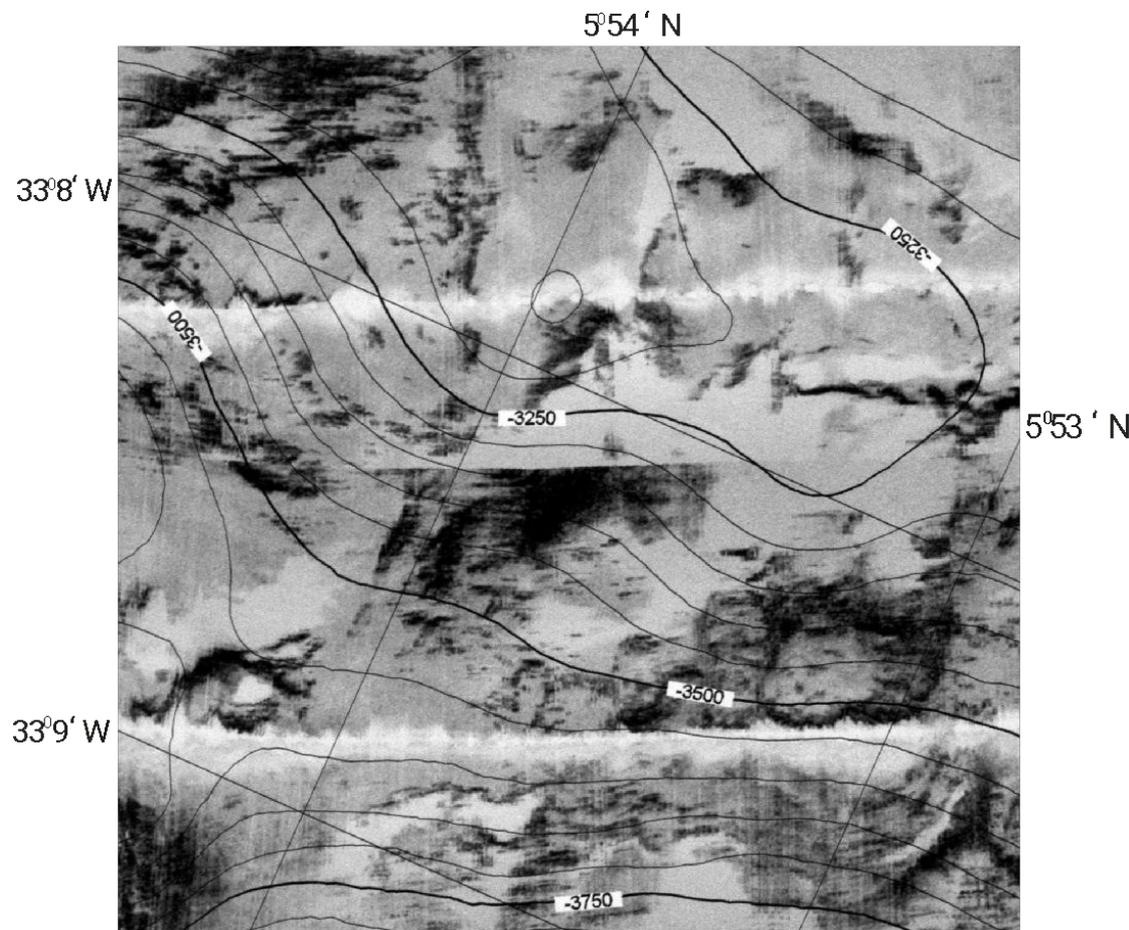
Fig. 2.1



Главным тектоническими структурами дна океанов являются срединно-океанические хребты, в осевых частях которых, согласно существующим представлениям, происходит рождение новой океанической коры. Так выглядит строение Срединно-Атлантического хребта в Центральной Атлантике, где мы проводили свои исследования. Как видите, в его осевой части наблюдается система впадин, ограниченных разломами (осевой рифт). Одной из таких структур является впадина Маркова глубиной до 5 км.



Вот так выглядит фрагмент восточного борта впадины Маркова по данным сонара бокового обзора (22-й рейс нис «Профессор Логачев»). Кора здесь имеет хорошо выраженную субгоризонтальную расслоенную структуру, частично маскируемую осадками. Хорошо видны многочисленные крутопадающие нормальные разломы, один из которых (в левой части снимка), по-видимому, заполнен дайкой долерита.



Основными методами изучения океанической коры является драгирование образцов, бурение глубоководных скважин со специальных кораблей, и изучение с помощью глубоководных обитаемых аппаратов типа Мир, о которых вы могли читать в газетах и видеть по телевизору, а также путем изучения тектонических блоков древней океанической коры в складчатых поясах – так называемых офиолитов. В отличие от современных океанов, в пределах офиолитов мы можем изучить строение океанической коры прямыми геологическими методами и сопоставить их с материалами, полученными драгированием дна океана и «булавочными уколами» скважин глубоководного бурения, и тем самым составить общую картину.

Строение **океанической коры** намного проще, чем континентальной. Здесь она состоит из трех слоев: I - рыхлые осадки, II - базальтовые потоки и III – глубинные магматические породы основного и ультраосновного состава, преимущественно различные габброиды. Общая мощность океанической коры составляет 7-10 км. Ниже располагается мантия, сложенная ультрабазитами. Граница Мохоровичича расположена в среднем на глубине 12-15 км от поверхности океана.

I и II слои океанической коры могут быть сопоставлены с осадочным слоем и верхней корой континентов, а III слой, толщиной до 4-5 км - с «базальтовым» слоем континентальной коры, но здесь он значительно тоньше. Такой разрез, например, был вскрыт наиболее глубокой - около 2 км - скважиной, пробуренной неподалеку от Коста-Рики в Тихом океане. Он также наблюдается в пределах некоторых поднятий на осях срединно-океанических хребтов, в частности, впадине Маркова, а также и известен по результатам изучения офиолитовых ассоциаций, о чем я скажу позже.

«Гранитного» слоя под океанами нет. Нижняя кора залегает непосредственно на мантийных ультрабазитах. Граниты там встречаются, но в незначительных количествах – примерно 0.2% от общей массы пород.

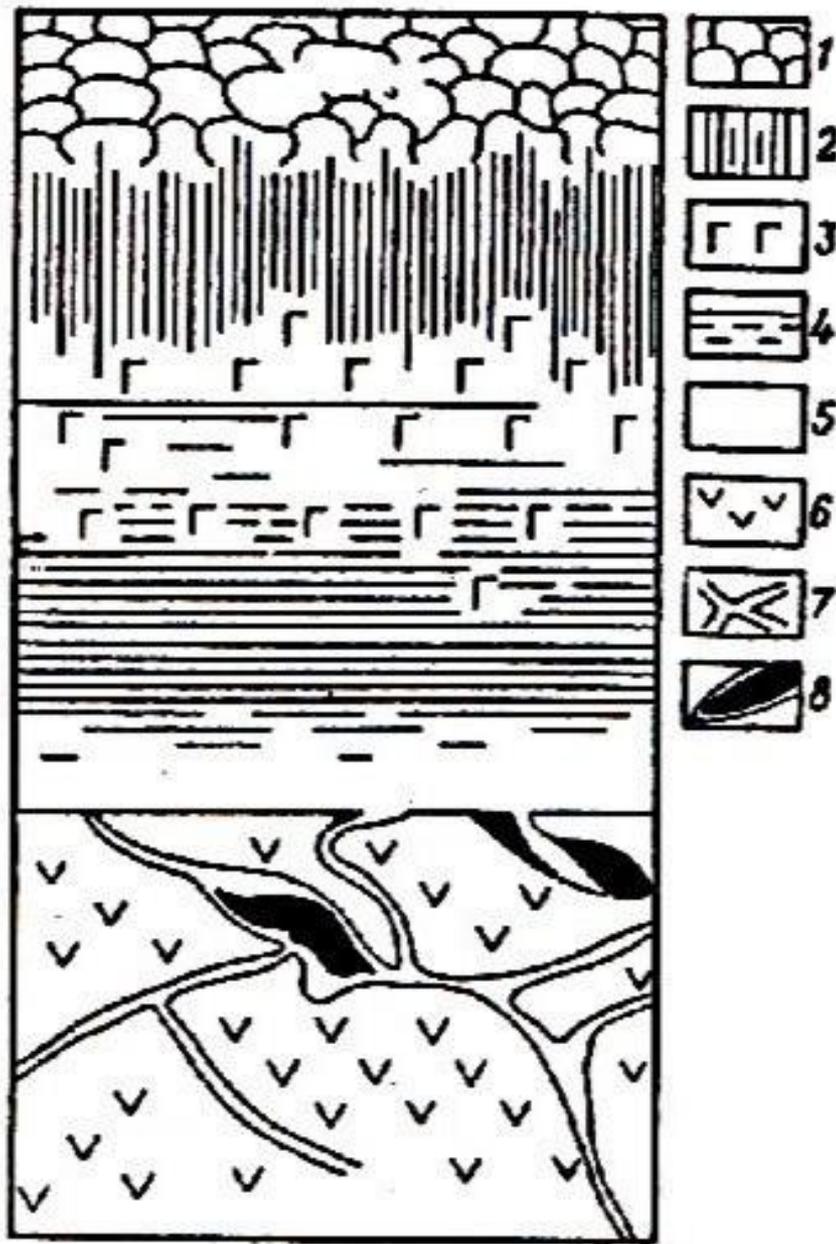


Рис. 12.8. Принципиальная схема строения офиолитовой ассоциации

Офиолитовые ассоциации

представляют собой тектонические пластины древней океанической коры, надвинутые на край континента. Они широко представлены в складчатых поясах, в частности на Урале.

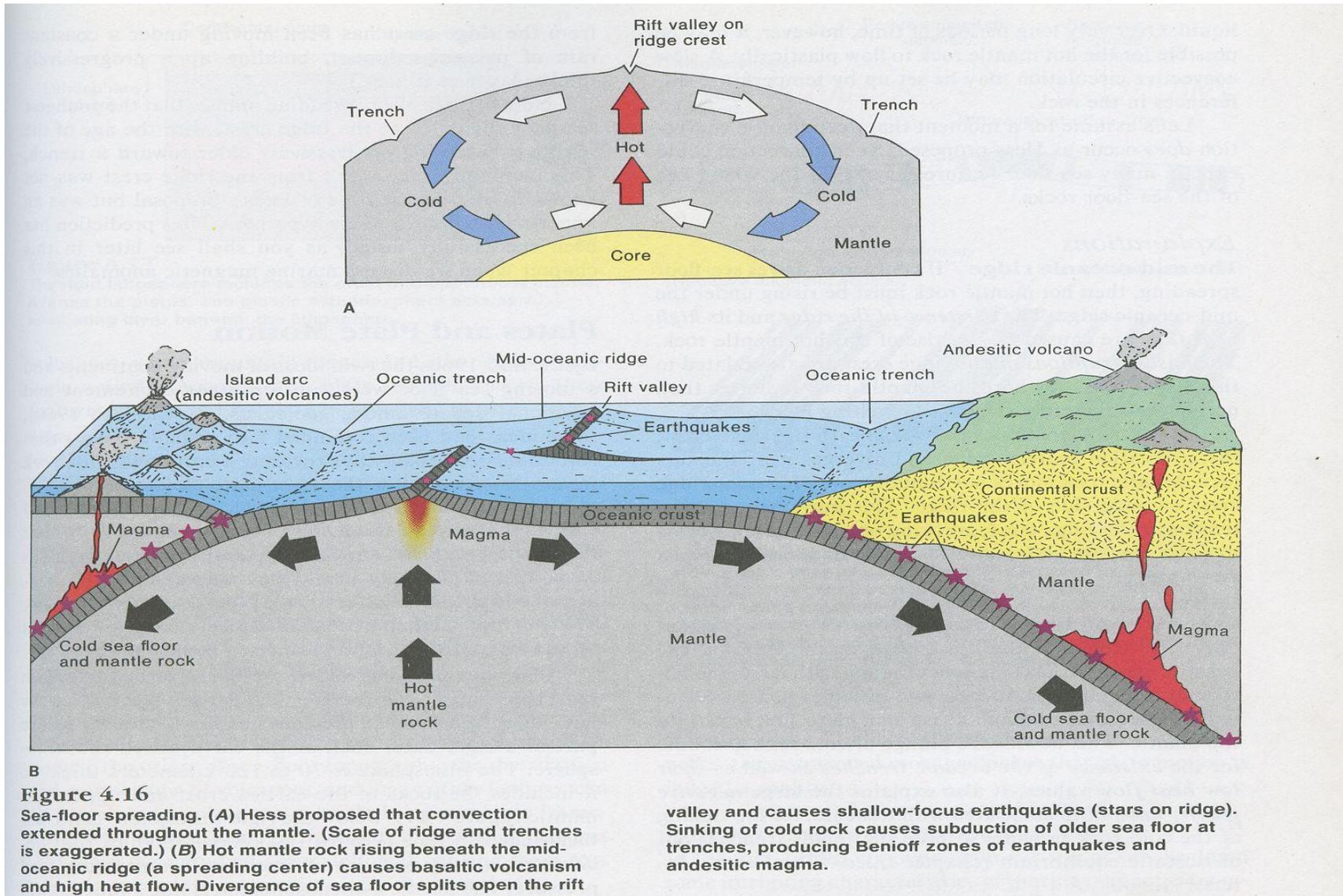
Офиолиты обычно имеют 4-х-членный разрез. В их низах встречены мантийные ультрабазиты, на которых залегают габброиды нижней коры. Еще выше залегает комплекс параллельных даек, и завершают разрез пиллоу-лавы, нередко ассоциирующие с глубоководными осадками, что в целом совпадает с имеющимися данными по дну океанов.

Считается, что дайки – крутопадающие пластинообразные тела долеритов – представляли собой подводные каналы для базальтовых излияний на дно океана;

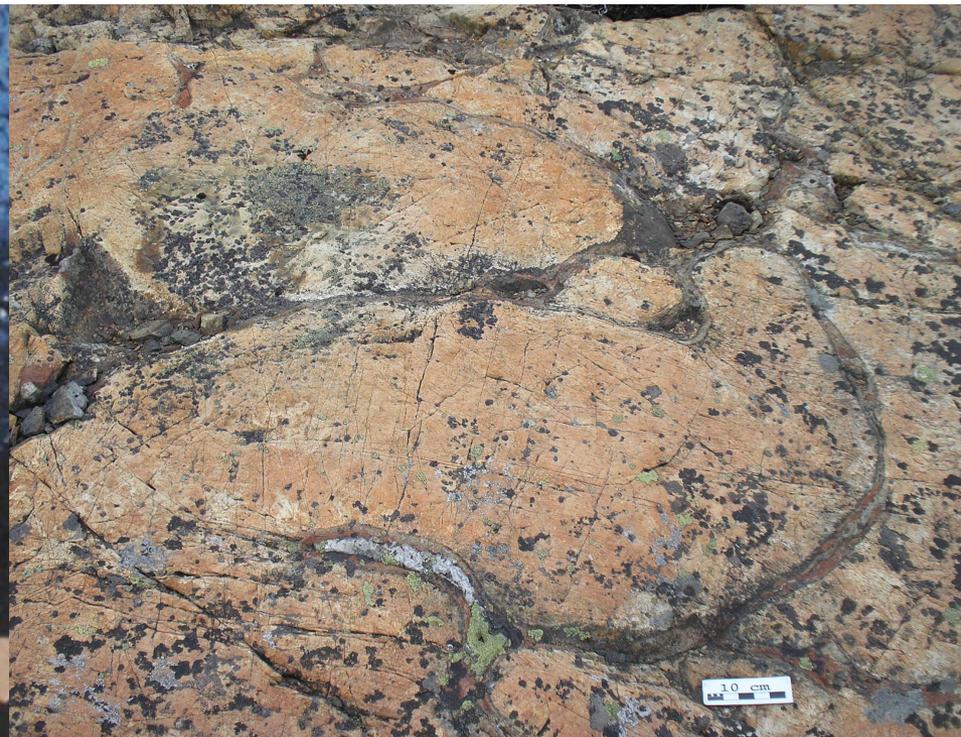
габброиды были промежуточными магматическими камерами (интрузивами), где накапливались и затвердевали эти расплавы, поступавшие из областей плавления в мантии;

ультрабазиты представляют собой выходы древней мантии; обычно они сильно изменены (серпентинизованы).

Схема, иллюстрирующая процессы в океанических сегментах Земли



Слева - современные пиллоу-лавы на дне океана, Восточно-Тихоокеанское поднятие (срединно-океанический хребет); снято из обитаемого подводного аппарата на глубине 2.5 км. Справа – древние пиллоу-лавы, возраст 2 млрд. лет, Печенгская структура на Кольском полуострове



Согласно современным представлениям, океаническая кора возникает в осевых частях срединно-океанических хребтов, куда практически непрерывно поступает базальтовый расплав из нижележащей мантии. Затем эта новообразованная кора растекается в обе стороны, так что возраст этой коры постепенно увеличивается по мере удаления от оси хребта.

Это хорошо видно по знаменитым полосовым магнитным аномалиям океанского дна, которые располагаются симметрично осевой рифтовой долине, где рождается новая океаническая кора, и удревняясь по мере удаления от оси хребта.

Возраст этих аномалий совпадает с возрастом периодического изменения полярности магнитного поля (инверсиям магнитного поля), известному по палеомагнитным данным на суше. Иными словами, как по кольцам роста в стволе дерева, по этим аномалиям можно определить возраст конкретного участка дна.

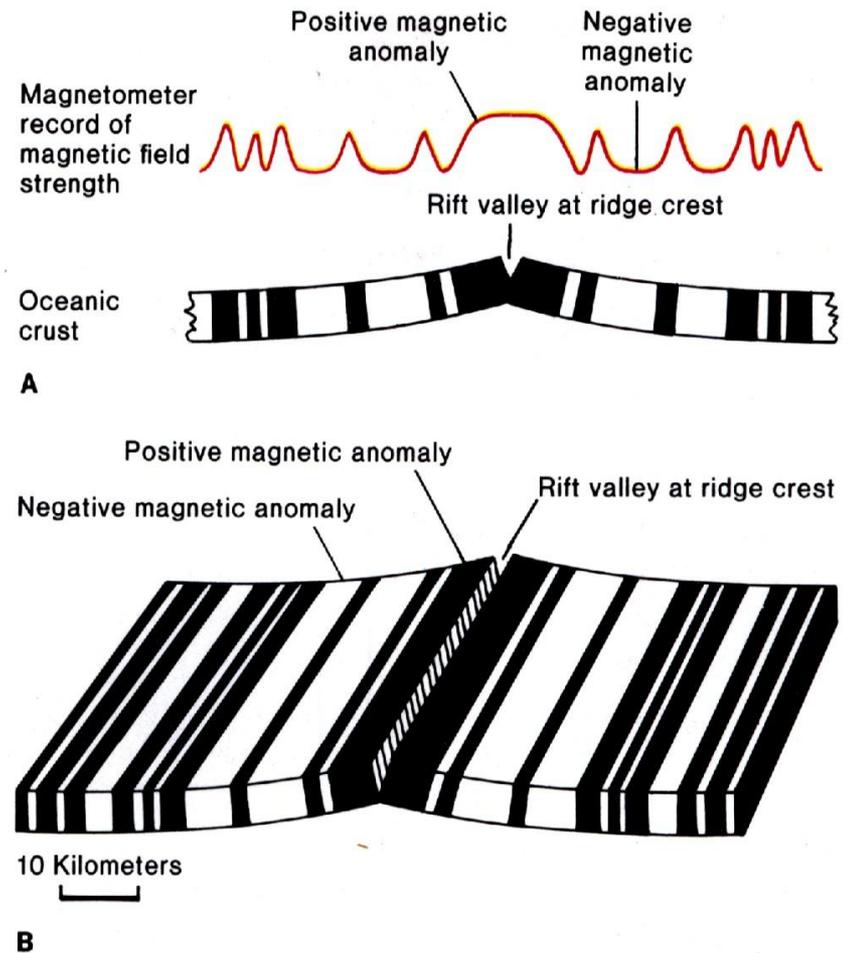
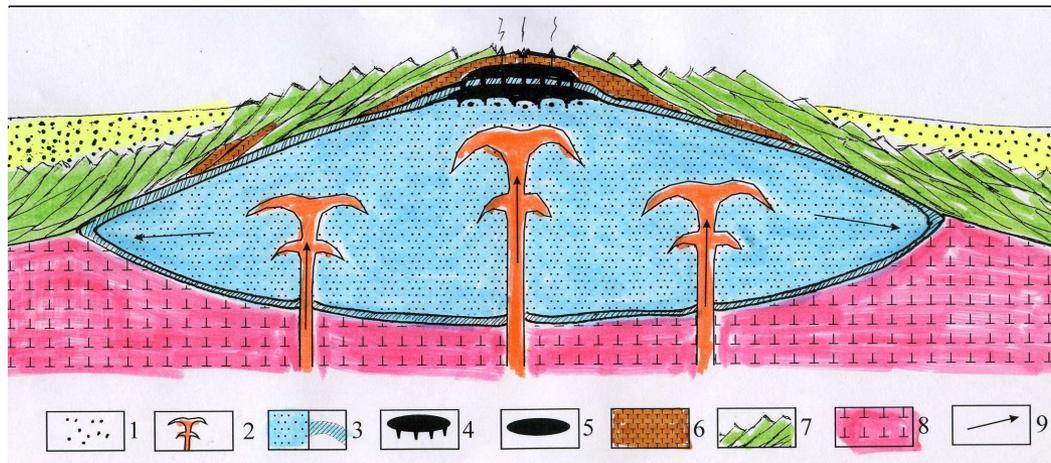


Figure 4.18

Marine magnetic anomalies. (A) The red line shows positive and negative magnetic anomalies as recorded by a magnetometer towed behind a ship. In the cross section of oceanic crust, positive anomalies are drawn as black bars and negative anomalies are drawn as white bars. **(B)** Perspective view of magnetic anomalies shows that they are parallel to the rift valley and symmetric about the ridge crest.



- Граница М под срединно-океаническими хребтами, как и под континентальными рифтами, теряет свою определенность - здесь наблюдаются мощные линзы разуплотненной аномальной мантии - астеносферы - толщиной до 200-300 км. По-видимому, такое разуплотнение связано с частичным плавлением мантии, результатом которого и является столь масштабный базальтовый магматизм, на долю которого приходится 70% всего магматизма современной Земли.
- Рост новой океанической коры приводит к смещению блоков континентальной литосферы, т.е. к дрейфу континентов.

• Верхняя мантия

- Верхняя граница мантии фиксируется поверхностью Мохо по резкому скачку скорости упругих волн. Как я уже говорил, под срединно-океаническими хребтами и под континентальными рифтами эта граница не очень определена в связи с появлением линзовидных зон частичного плавления.
- Верхняя мантия под континентами и океанами образована преимущественно перидотитами. Главные разновидности **мантйных перидотитов** - *лерцолиты* и *гарцбургиты*. Кроме перидотитов в строении верхней мантии континентов принимают участие *эклогиты* - гранат-пироксеновые породы высокого давления, отвечающие по валовому химическому составу базальту или габбро.
- Источниками информации о составе и строении верхней мантии служат **геофизические данные, глубинные ксенолиты, вынесенные базальтовыми лавами и кимберлитовыми трубками взрыва, а также тектонические блоки мантийного вещества, в частности, офиолитовые ассоциации**, о которых я говорил.

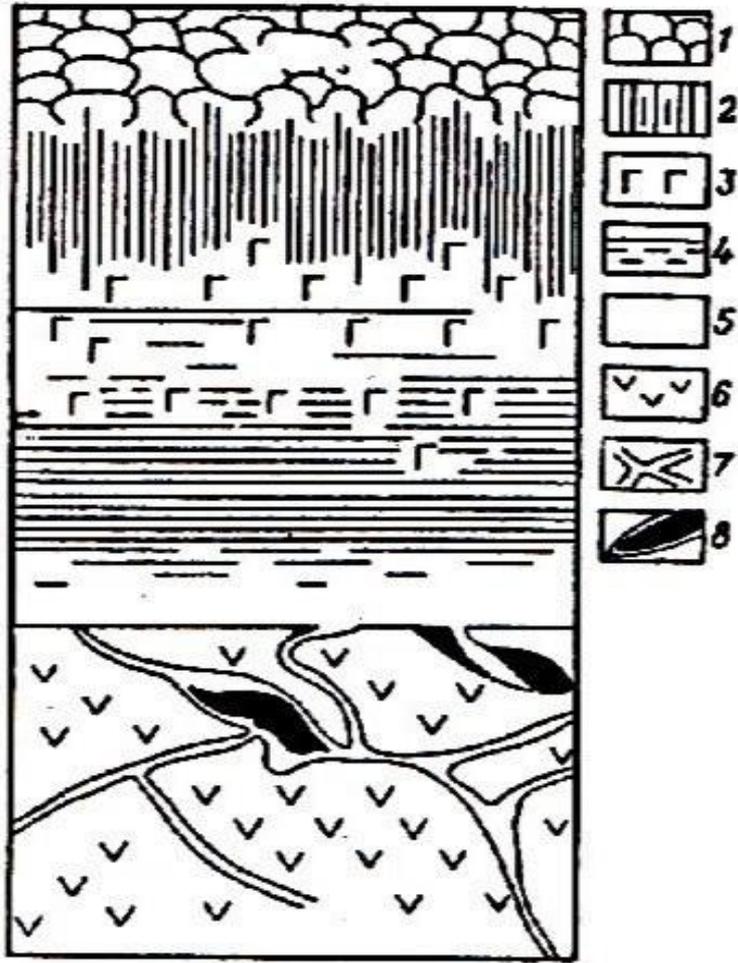


Рис. 12.8. Принципиальная схема строения офиолитовой ассоциации

1 — вулканиты; 2 — параллельные дайки; 3 — габброиды; 4 — чередование ультрамафитов и габброидов; 5 — дуниты; 6 — гарцбургиты и лерцолиты; 7 — жилеобразные ультрамафиты и габброиды; 8 — хромититы

- **Тектонические блоки пород верхней мантии**
- Нижние части разрезов *офиолитовых ассоциаций* сложены интенсивно деформированными перидотитами, которые первоначально залегали ниже поверхности М.
- Петрографические и геохимические особенности этих перидотитов приводят к выводу, что большая часть этих пород представляет **твёрдый материал верхней мантии океана, оставшийся после выплавления и удаления из него базальтового расплава**. Такие породы называют реститами (*от англ. rest, residue — остаток*); они и представлены гарцбургитами и дунитами.
- Раньше считалось, что ультрабазиты мантии являются тугоплавкими остатками мантийного вещества, при плавлении которого и образовался весь офиолитовый разрез. Однако в дальнейшем это не подтвердилось как в офиолитовых комплексах, так и в современных океанах.

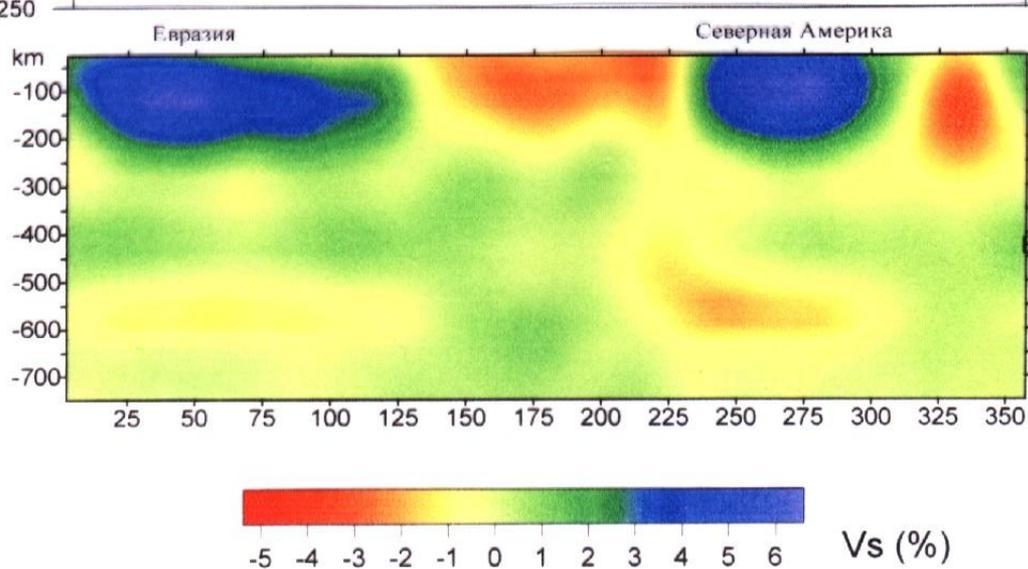
Peridotite xenolith with remnant of amphibole vein



Включения мантийного вещества в базальтах и кимберлитах
Среди кристаллических включений (ксенолитов) мантийных пород, выносимых на дневную поверхность вулканами и трубками взрыва, встречаются перидотиты, пироксениты, дуниты, и эклогиты. **Ксенолиты** представляют собой обломки мантийного вещества размером от сантиметров до дециметров в поперечнике.

В **базальтах** среди включений преобладают породы, которые устойчивы до глубины 60-80 км. **Кимберлиты** выносят к поверхности более глубокие включения, представленные гранатовыми перидотитами, а также эклогитами. Эти породы устойчивы уже на глубинах 80-150 км. В некоторых перидотитовых и эклогитовых включениях обнаружены **алмазы**, что служит прямым указанием на образование этих кристаллических пород на глубине более 150 км, в области устойчивости алмаза.

- По минеральному и химическому составам перидотиты можно разделить на три класса: 1) примитивные, 2) деплетированные, или истощенные и 3) обогащенные.
- **Примитивные** перидотиты представлены лерцолитами; в современной мантии они отсутствуют, это скорее модельное представление. Такие лерцолиты близки по составу к **пиролиту** - модельной смеси базальтоидных выплавов (~25%) и тугоплавкого (реститового) ультрамафитового остатка (~75%), рассчитанному австралийскими петрологами А. Рингвудом и Д. Грином.
- **Деплетированные** перидотиты - обычно гарцбургиты - обеднены клинопироксеном и соответственно Al, Ca, Na и другими легкоплавкими компонентами вследствие частичного плавления мантийного материала. Именно они преобладают среди мантийных перидотитов океанов.
- **Обогащенные** перидотиты, наоборот, содержат больше легкоплавких компонентов, чем примитивные мантийные породы, что обусловлено преобразованием вещества верхней мантии под воздействием глубинных водных и углекислых флюидов или магматических расплавов, богатых летучими компонентами. Этот процесс приводит к появлению в мантийных породах водосодержащих минералов – амфиболов и слюд, а также карбонатов и разнообразных акцессорных минералов.

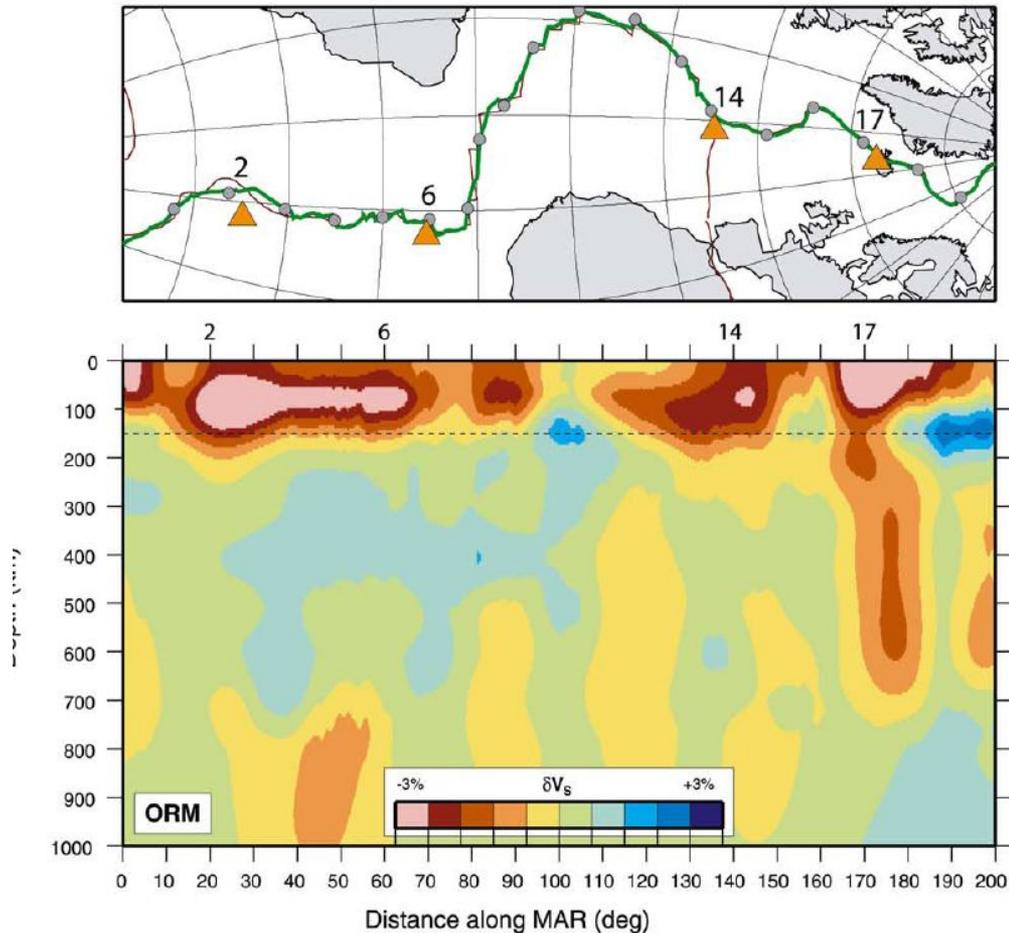


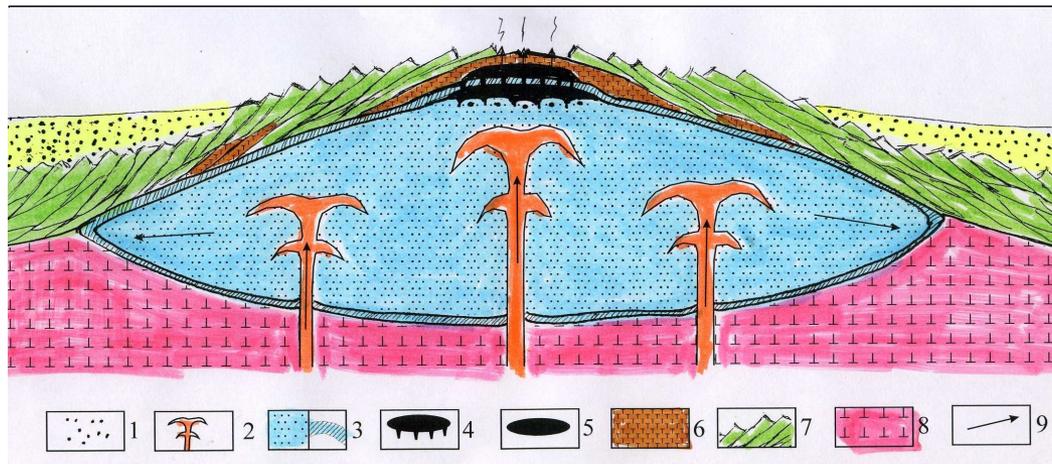
• Астеносфера и литосфера

- Кора и мантия Земли образованы материалом, в котором распространяются поперечные упругие волны. Следовательно, эти оболочки находятся в твердом состоянии. На фоне увеличения скоростей упругих волн с глубиной в верхней мантии были обнаружены области с пониженными скоростями, которые обычно связывают с появлением малого объема ($\leq 1\%$) межзернового силикатного расплава. Эти ослабленные зоны получили название **астеносферы**, которая широко представлена под океанами и только локально – под континентами. Над астеносферой залегает более жесткий слой земной коры и верхов мантии, который называют **литосферой**.
- Хотя современные геофизические данные указывают на условность понятий “астеносфера” и “литосфера” как глобальных сферических слоев, эти термины продолжают использоваться в геологической литературе. Глубинные области пониженных скоростей несомненно являются важными элементами строения верхней мантии, и хорошо проявлены под рифтовыми областями и океанами.
- Вот так выглядит ситуация по данным сейсмической томографии. Как видите, корни континентальных блоков уходят на глубины 200-300 км.

Что представляет собой астеносфера под срединно-океаническими хребтами?

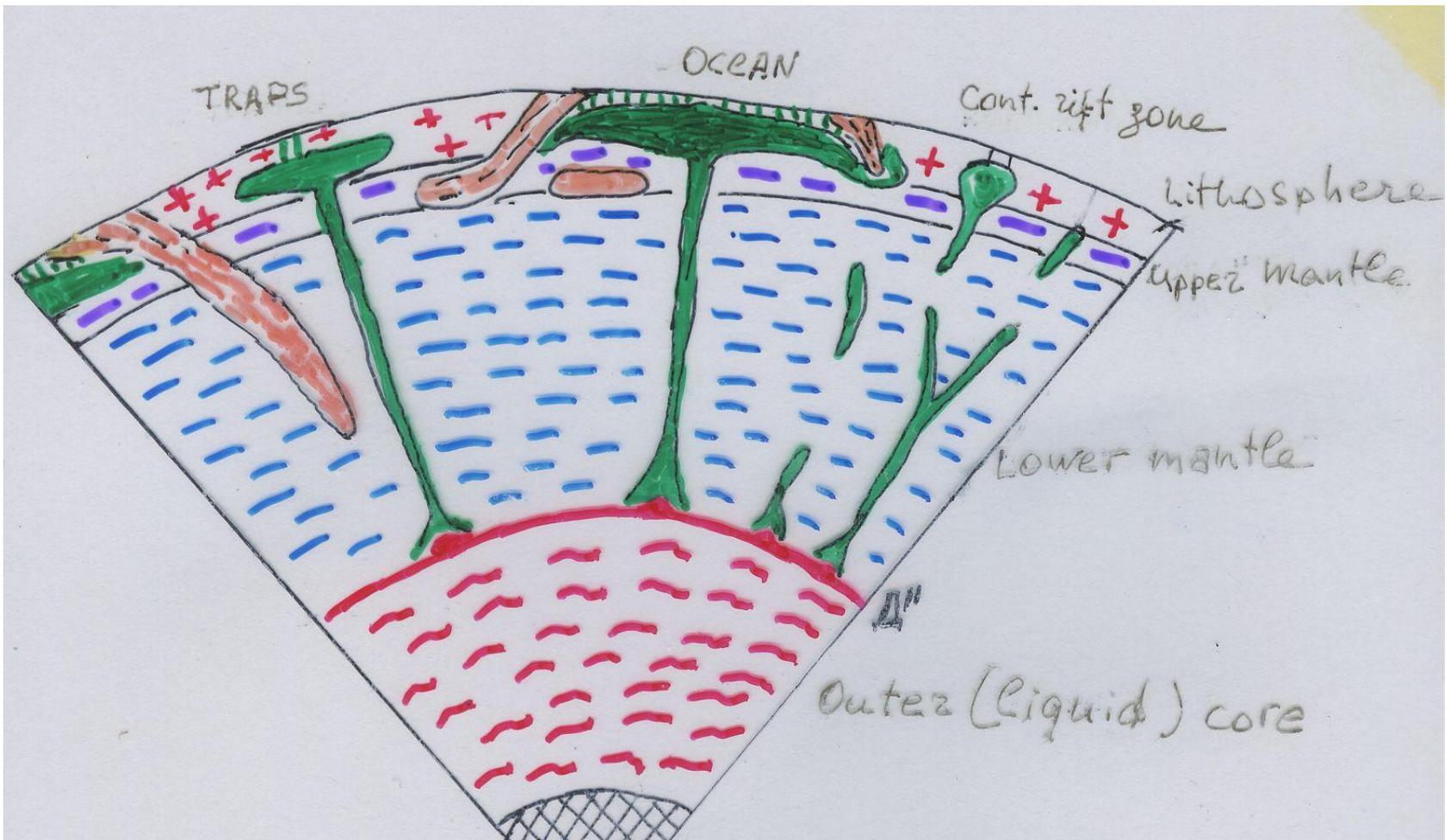
Согласно геофизическим данным, астеносфера под Срединно-Атлантическим хребтом представлена линзообразным телом около 200-300 км мощностью и состоит из отдельных сегментов (Anderson et al., 1992; Ritsema, Allen, 2003). Существование холодной мантии под ней подтверждается и нашими находками древнего циркона в габброидах и базальтах. Как видно, линза периодически «подпитывается» материалом свежих мантийных плюмов.

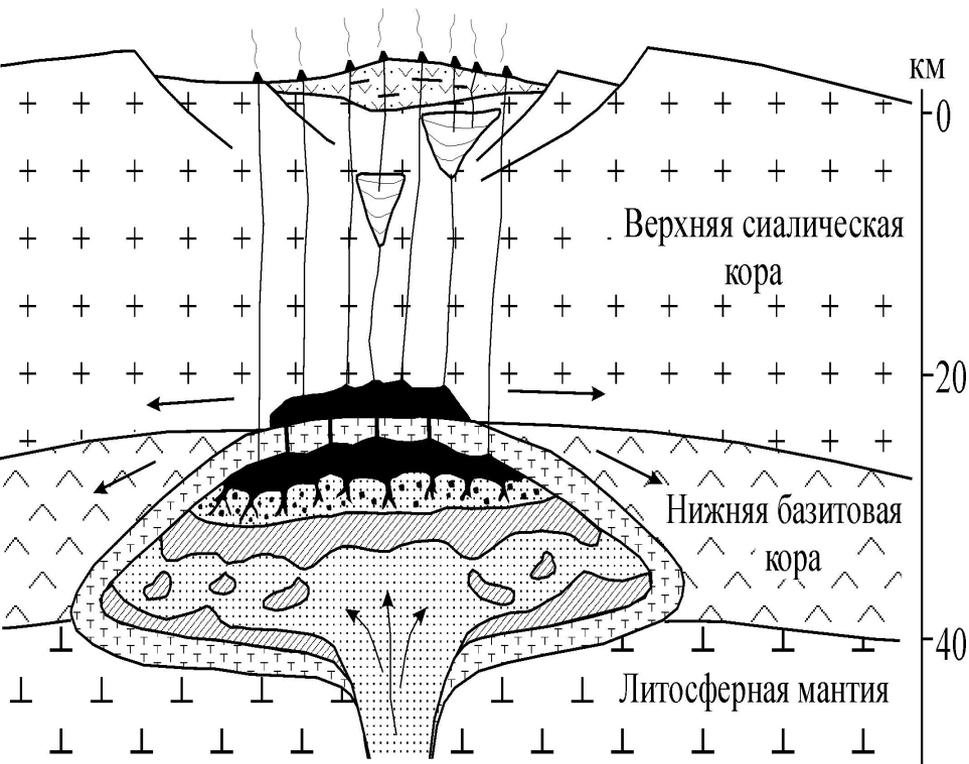




- Граница М под срединно-океаническими хребтами, как я уже говорил, теряет свою определенность - здесь также наблюдаются мощные линзы разуплотненной аномальной мантии - астеносферы - толщиной до 300 км. Такая линза, как это установлено для Срединно-Атлантического хребта, может существовать на протяжении по крайней мере 140 млн. лет и непрерывно генерирует базальтовые расплавы примерно одного и того же состава. Для этого она должна также непрерывно подпитываться свежим материалом мантийных плюмов, что предохраняет ее от затвердевания за столь длительный промежуток времени и помогает сохранить в общих чертах состав плавящегося вещества.

Мантийные плюмы, т.е. потоки разуплотненного разогретого вещества зарождаются на границе жидкого железного ядра и силикатной мантии. Вследствие очень низкой эффективности кондуктивной теплопроводности, они практически не теряют тепло по дороге вверх, т.е. их подъем происходит в адиабатических условиях без существенного обмена теплом с окружающей средой. Благодаря тому, что температура солидуса (начала плавления) значительно снижается при уменьшении давления, разогретое вещество плюма, попадая во внешние оболочки Земли, начинает плавиться с образованием мантийных магм.





- Мантийные плюмы поднимаются до уровня своей плавучести, где их головные части растекаются в литосфере в форме шляпки гриба, образуя линзы разогретого вещества. Растекание сопровождается растяжением земной коры с образованием рифтовых областей.
- В ряде случаев это приводит к разрыву континентальной земной коры и образованию на этом месте коры океанического типа, как это, например, сейчас имеет место в Красноморском рифте, где происходит образование нового океана - структуры Красного моря.
- Разрастание срединно-океанических хребтов (спрединг) приводит к дрейфу континентальных блоков, о чем я уже говорил.

• Нижняя мантия Земли

- **Нижняя мантия** образована силикатными ультраосновными породами, состоящими из минералов высокого давления. Сейсмические границы в этой области обусловлены фазовыми переходами, связанными с изменением структуры кристаллической решетки минералов и увеличением их плотности как функции давления. Например, нижняя граница верхней мантии на глубине 400 км обусловлена появлением β -модификации оливина, плотность которой на 8% выше, чем у обычного оливина. На глубине 500-530 км β -оливин переходит в γ -оливин, имеющий структуру шпинели; при этом плотность минерала возрастает на 2%.
- В интервале 300-460 км устойчивы твердые растворы пироксена и граната, получившие название **мейджорита**. Четко выраженная сейсмическая граница на глубине 660 км, вероятно, связана с появлением еще более плотных фаз, представленных магнезиовюститом: $(\text{Mg,Fe})\text{O}$, феррипериклазом и оливином и пироксенами со структурой перовскита. Еще глубже, на границе с ядром развита еще более плотная фаза – пост-перовскит. Существование таких минеральных фаз установлено в экспериментах при сверхвысоком давлении.

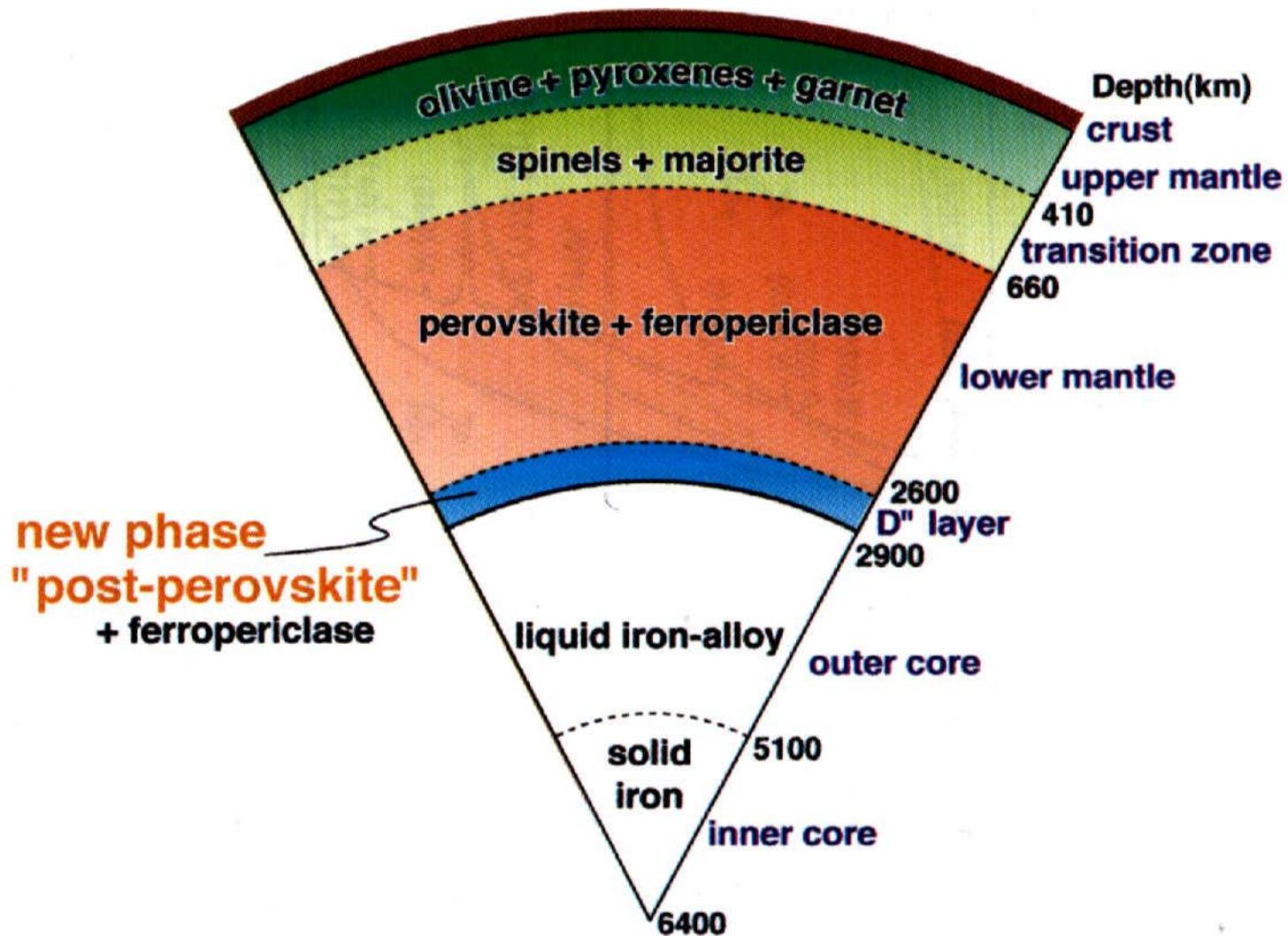
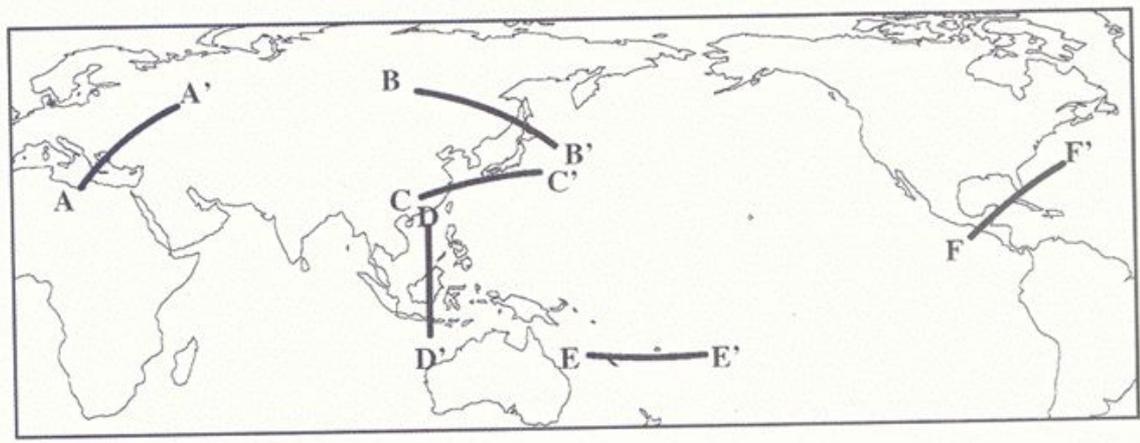
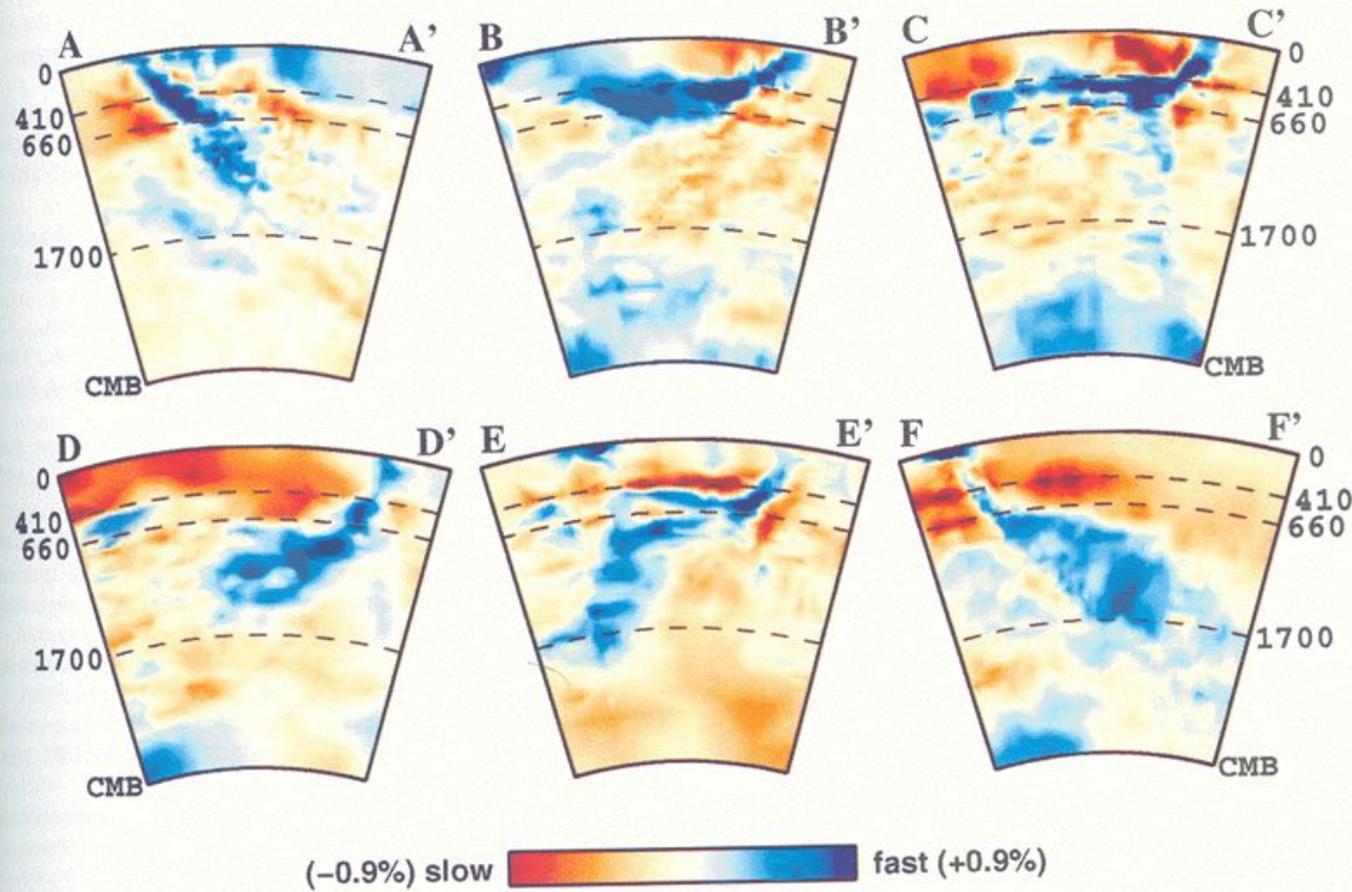


FIGURE 1

Simplified cross-section of the Earth. The main constituent minerals in the mantle change from olivine + pyroxenes + garnet (or Al-rich spinel) in the upper mantle, to spinels + majorite in the transition zone, to perovskite + ferropericlase in the lower mantle, and to post-perovskite + ferropericlase in the D" layer. The boundaries between the layers are characterized by seismic-wave discontinuities.

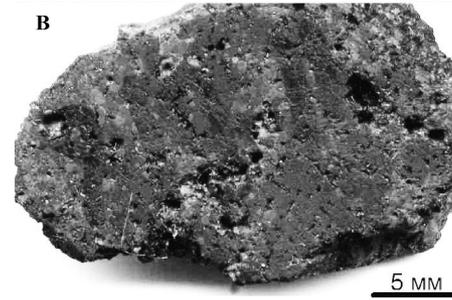


Как я говорил на вводной лекции, в нижней мантии скапливается вещество литосферных плит, вовлеченное в процессы субдукции.

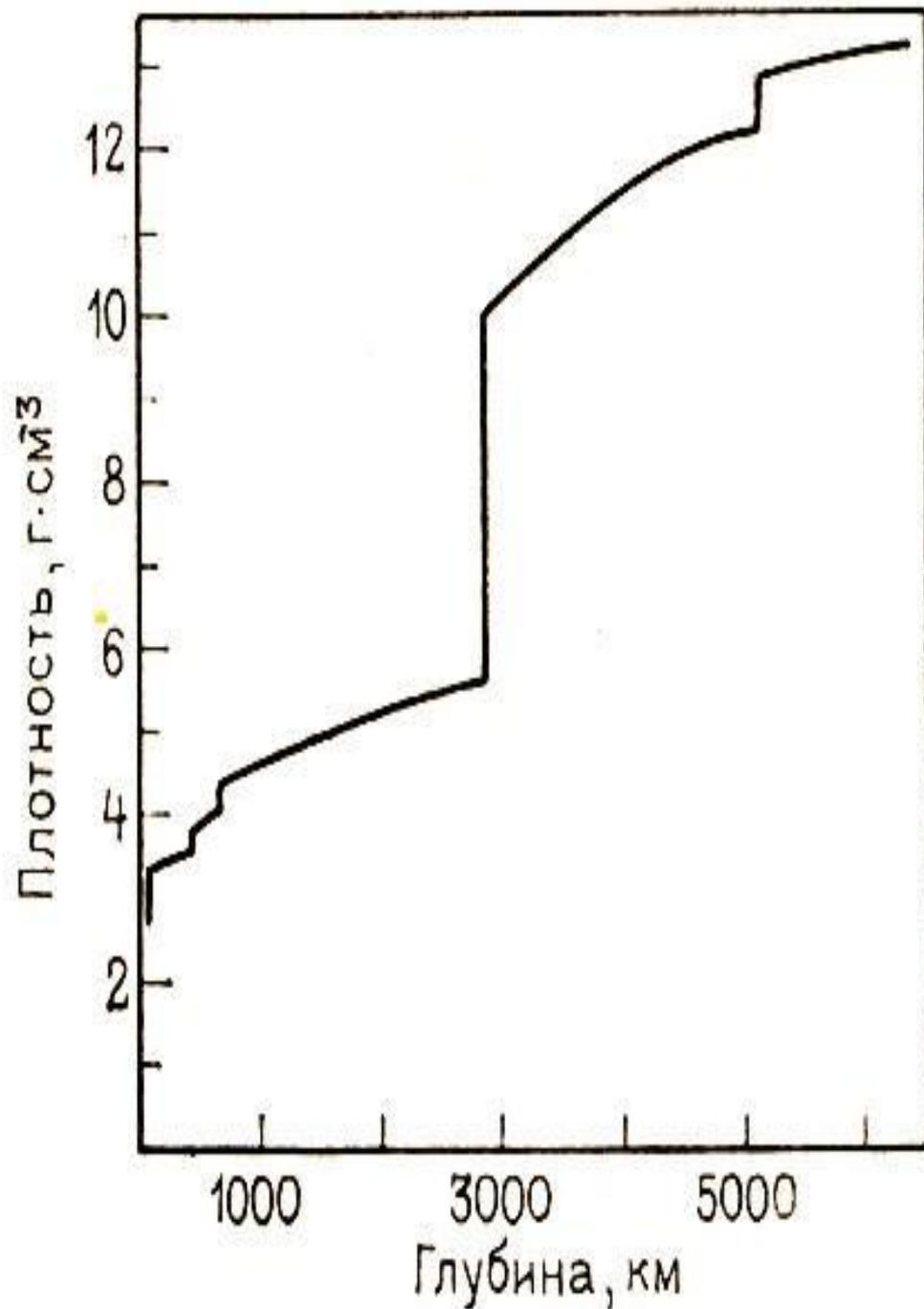
Так что нижняя мантия весьма неоднородна, что видно из данных сейсмической томографии (Karason, van der Hilst, 2000).

Голубым показан холодный субдуцируемый материал, погружающийся в разогретую мантию.

Peridotite xenolith with remnant of amphibole vein



- Таким образом, мантия Земли на самом деле состоит из двух разных типов вещества – мантийных плюмов, зарождающихся на границе жидкого железного ядра и мантии, и древней литосферной мантии, и представляет собой живую динамическую систему. О составе литосферной мантии мы можем судить по составу ксенолитов в кимберлитах, а о составе мантийных плюмов – по ксенолитам в базальтах, захваченным расплавом, когда он проходил через верхнюю охлажденную часть головы мантийного плюма.
- Как видите, плюмы состоят из двух типов вещества – зеленых перидотитов и жил так называемой черной серии, состоящей в основном из водосодержащих минералов -, титанистой роговой обманки и Fe-Mg слюд типа биотита и флогопита, а также Ti-пироксена и других минералов. В породах этой серии часто обнаруживаются газовые пустотки, а сами они нередко оплавлены. Это свидетельствует о том, что они произошли за счет высокоплотного флюида или флюидизированного расплава. И если перидотиты являются веществом мантии, то черная серия образовалась за счет флюидов, выделившихся из жидкого ядра и содержащихся в веществе поднимающихся мантийных плюмов в качестве межзернового материала. Именно благодаря этим флюидам вещество плюмов приобретает повышенную плавучесть, позволяющую им достичь основания гранитного слоя земной коры.



• ЯДРО ЗЕМЛИ

Граница между *мантией и внешним ядром* Земли, расположенная на глубине **2900 км**, отмечается резким скачком плотности и скорости продольных упругих волн. Поперечные волны во внешнем ядре не распространяются, что указывает на жидкое состояние вещества.

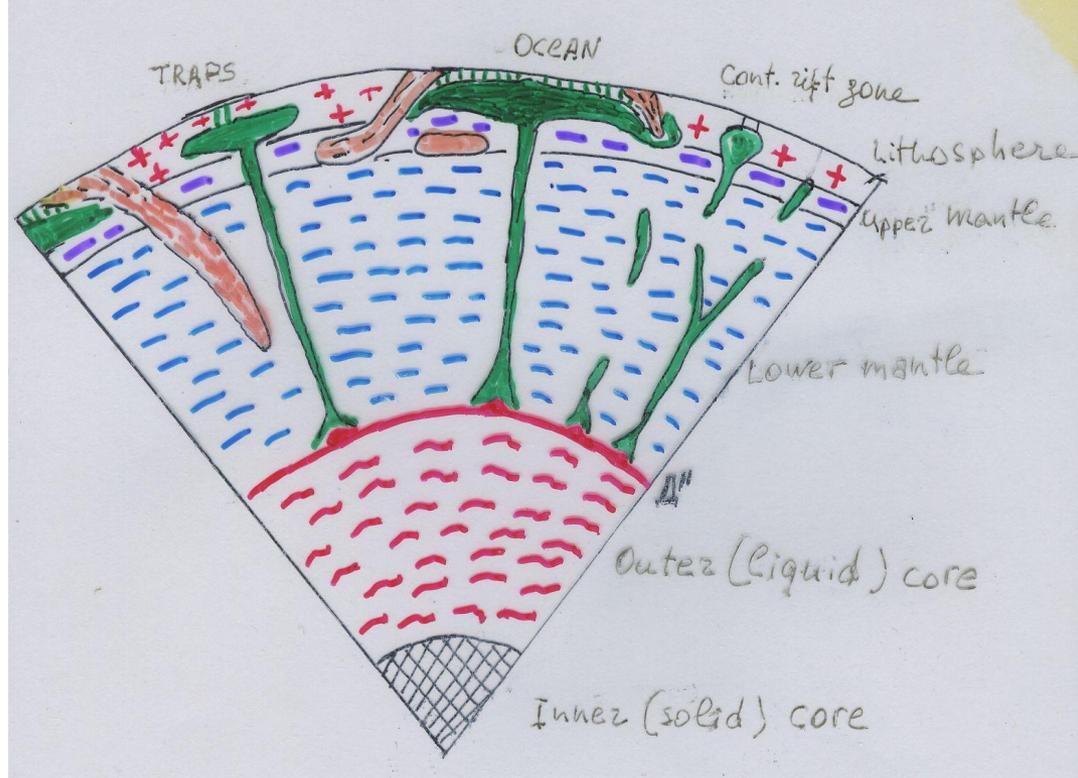
Согласно современным моделям, внешнее ядро Земли состоит из расплавленного железа с примесью никеля и 5-15% более легких химических элементов — главным образом, S, а также O, Si, K, и возможно, Ti.

Считается, что именно жидкое железное ядро обеспечивает существование магнитного поля Земли благодаря возмущениям, возникающим на его границе с твердой мантией, т.е. в глубоких недрах Земли существует своеобразная «динамо-машина».

- В последние годы большое внимание стали уделять так называемому слою D'' мощностью 100-150 км, расположенному на границе между жидким ядром и мантией. По своим сейсмическим характеристикам он напоминает астеносферу и, вероятно, является зоной частичного плавления вещества нижней мантии. Предполагается, что именно здесь происходит зарождение мантийных плюмов за счет поступления из жидкого ядра флюидных компонентов. Они пропитывают вещество нижней мантии, разогревая и разуплотняя его и тем самым инициируя подъем мантийных плюмов, которые обеспечивают всю современную тектоно-магматическую активность Земли. Постоянный отток энергии и легкоплавких компонентов от ядра, приводит к его постепенному затвердеванию, т.е. к образованию **внутреннего твердого ядра**, граница которого сейчас располагается на глубине 5100 км. Оно состоит в основном из железо-никелевого сплава, возможно, с небольшой примесью алмаза, стишовита (высокоплотная разновидность SiO_2) и некоторых других высокоплотных фаз. Обращает на себя внимание, что хотя все планеты земной группы также состоят из железного ядра и силикатной мантии, но жидкое внешнее ядро есть только у Земли.

• **Как произошло ядро Земли?**

- Большинство исследователей сейчас полагает, что Земля формировалась за счет аккреции гипотетических химически-однородных планетезималей размером от пылевых частиц до нескольких километров, т.е. в результате **гомогенной аккреции**. Очень важным является присутствие FeS в первоначальном конденсате, из которого формировалась Земля, поскольку FeS и Fe образуют низкотемпературную (около 1000°C) эвтектическую плотную железо-сульфидную жидкость. Считается, что эта жидкость должна была быстро погружаться сквозь силикатную матрицу и аккумулироваться в центре Земли, образуя первичное ядро, которое в значительной мере сохранилось в жидком состоянии вплоть до настоящего времени.
- Однако сейчас появляются данные, что Земля произошла в результате **гетерогенной аккреции**, т.е. вначале сформировалось железное ядро, а затем силикатная оболочка, сложенная веществом каменных метеоритов - хондритов. Более того, выяснилось что на средних стадиях эволюции Земли, около 2 млрд. лет назад, в тектоно-магматические процессы стало вовлекаться качественно новое вещество, ранее в них не участвовавшее. Это вещество могло сохраниться только в ядре Земли, сформированном на ранних стадиях существования Солнечной системы. Оно было разогрето до плавления только 2.3-2.0 млрд. лет назад и именно тогда началась современная стадия развития Земли, которая продолжается и поныне. Но об эволюции Земли и земных планет мы поговорим в специальной лекции.



Таким образом, тектоно-магматические процессы на поверхности Земли являются следствием глубинных процессов, зарождающихся еще на границе с ядром. При этом основным движителем тектонических процессов являются мантийные плюмы. Из этого следует, что энергетическим сердцем Земли является жидкое ядро, и когда оно затвердеет, наша планета превратится в «мертвое» тело, что уже произошло с остальными планетами земной группы (Венерой, Марсом, Меркурием и Луной), где отсутствуют как магнитное поле, так и следы современной тектоно-магматической активности. К этому вопросу мы вернемся при обсуждении проблемы эволюции Земли.

• ВЫВОДЫ

- 1. Главным методом изучения внутреннего строения Земли является сейсмический метод, основанный на эффекте отражения сейсмических волн от границ масс пород с разной плотностью и, очевидно, составом. Согласно этим данным, Земля состоит из: (1) земной коры, подразделяемой на верхнюю и нижнюю, имеющих разный состав; (2) силикатной мантии, образованной преимущественно ультрамафитами; и (3) железо-никелевого ядра: внешнего – жидкого и твердого – внутреннего.
- 2. Граница раздела между корой и мантией определяется по резкому скачку сейсмических скоростей и называется границей Моховичича (Мохо, М). Земная кора под континентами и океанами различна как по вещественному составу, так и мощности: континентальная кора имеет мощность в среднем 40 км, а океаническая – около 7-10 км.

- 3. Континентальная кора подразделяется на верхнюю и нижнюю примерно равной мощности. Верхняя кора образована осадочным и гранитно-метаморфическим («гранитным») слоями. Нижняя кора («базальтовая») имеет гранулит-базитовый состав. Если образования верхней коры выходят на дневную поверхность, то о составе нижней коры можно судить по ксенолитам, вынесенным магматическими расплавами, или по редким тектоническим блокам в складчатых областях.
- 4. В составе океанической коры отсутствует «гранитный» слой. Верхняя кора океанов сложена осадками и базальтами, изливавшимися на дно океана (пиллоу-лавы), а также серией подводных каналов (дайковый комплекс). Нижняя кора здесь образована габброидами – интрузивными аналогами базальтов. Верхняя мантия представлена там реститами ультраосновного состава, оставшимися после выплавления из них базальтового материала. О строении океанической коры судят по результатам драгирования дна и по данным глубоководного бурения, а также по сохранившимся фрагментам древней океанической коры в складчатых поясах – офиолитовым ассоциациям.

- 5. Мантия Земли сложена породами ультраосновного состава, а также эклогитами – высокоплотными метаморфическими породами основного состава. О веществе мантии судят по глубинным ксенолитам в некоторых магматических породах (базальтах и кимберлитах), а о верхах верхней мантии океанов – по офиолитовым ассоциациям, в нижней части которых часто устанавливаются мантийные ультрабазиты.
- 6. По сейсмическим свойствам мантию часто подразделяют на пластичную астеносферу и жесткую литосферу. Однако многие исследователи считают, что астеносфера не является глобальным слоем, а участки ее развития представляют собой растекающиеся головные части мантийных суперплюмов, поднимающихся из глубин Земли.

- 7. Второй сильный скачок плотности наблюдается на границе мантии и железо-никелевого ядра, внешняя часть которого – жидкая, а внутренняя - твердая. Предполагается, что возникновение магнитного поля Земли связано с вихрями, возникающими на границе жидкого ядра и твердой мантии, а твердое ядро образуется в результате направленного снизу вверх затвердевания жидкого ядра.
- 8. Мантийные плюмы, по-видимому, зарождаются на границе жидкого железного ядра и силикатной мантии, в так называемом слое D” за счет накопления там флюид-ных компонентов, выделяющихся при направленном затвердевании ядра. Они пропитывают прилегающую мантию, благодаря чему происходит локальное разуплотнение ее вещества, приводящее к зарождению мантийного плюма. Он начинает всплывать через мантию вплоть до уровня своей плавучести, где растекается наподобие шляпки гриба, обеспечивая геодинамическую активность Земли.

- 9. По своему внутреннему строению Земля близка к другим планетам земной группы (Венере, Марсу, Меркурию и Луне), также имеющим железные ядра и силикатные мантии. Главным отличием нашей планеты от других земных планет является наличие жидкого ядра, представляющего собой «энергетическое сердце» современной Земли.
- 10. Судя по отсутствию магнитного поля и современной тектономагматической активности, жидкие ядра на других земных планетах уже затвердели, и сейчас они уже представляют собой «мертвые» тела.