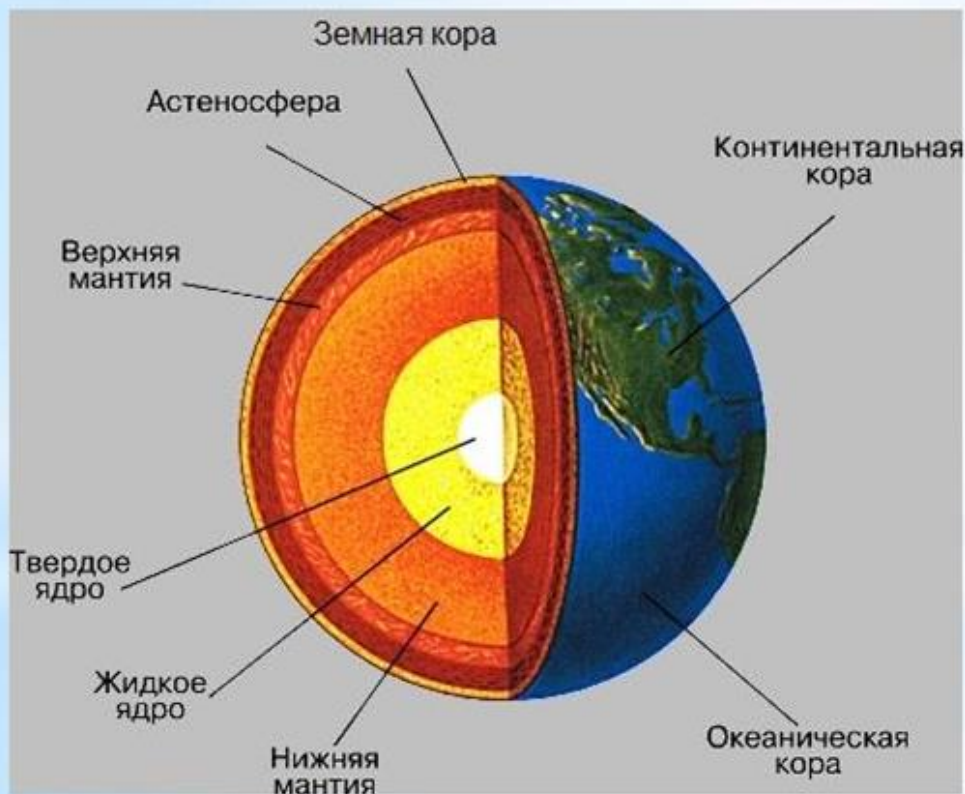


Тема 7. Строение и дифференциация мантии Земли.

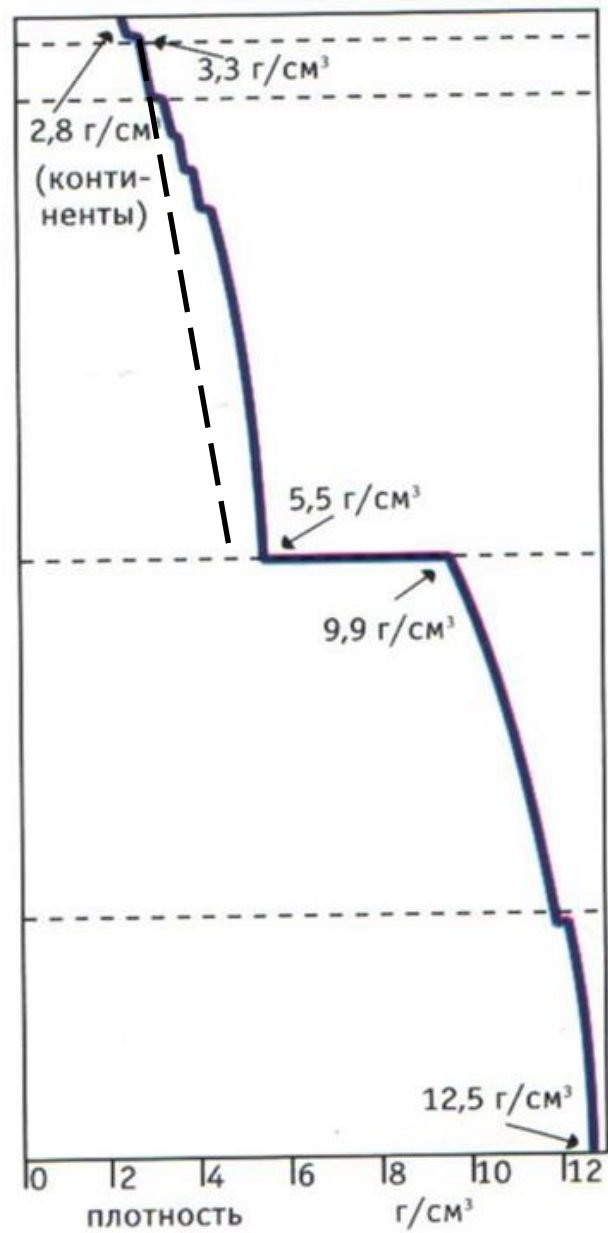
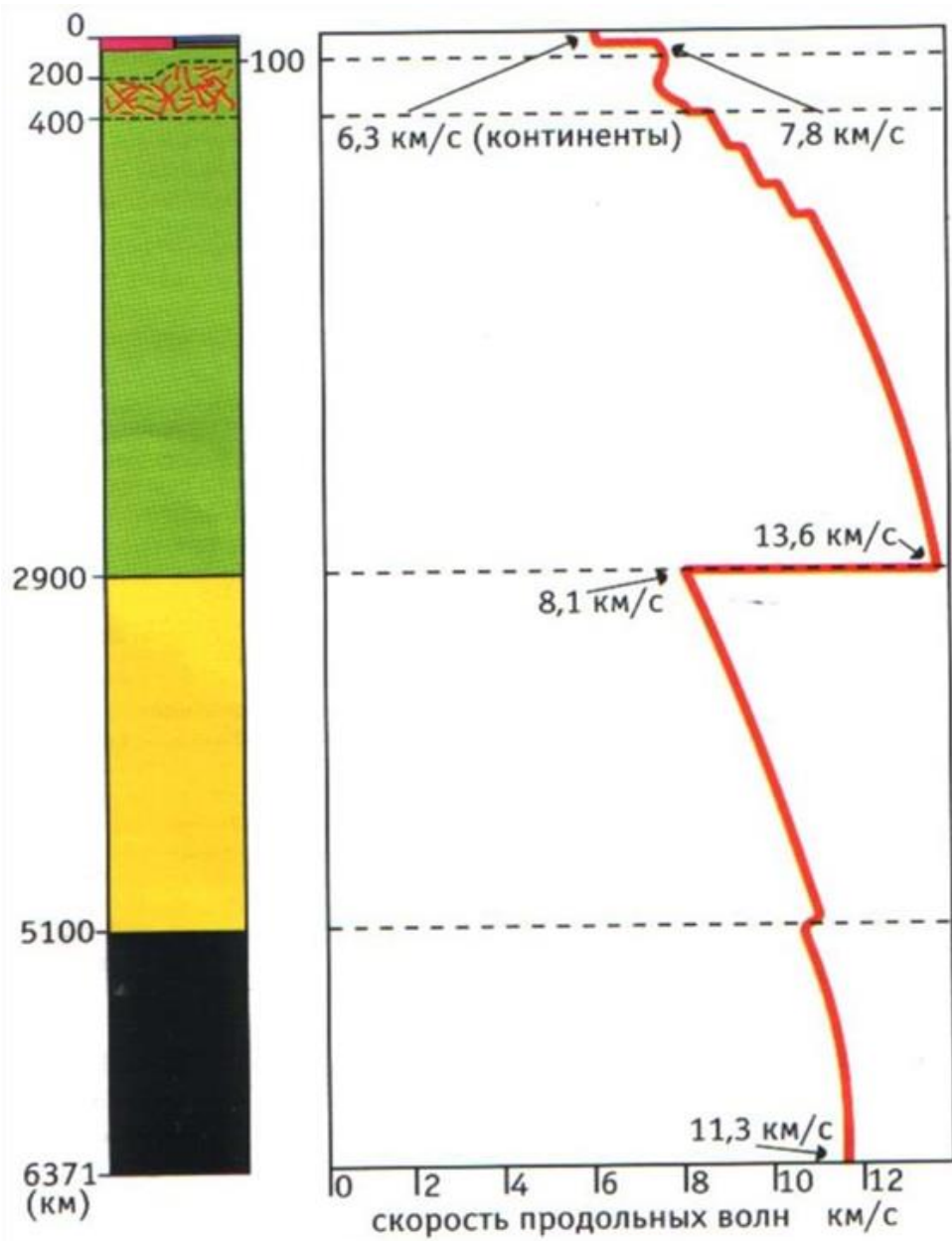
* В строении Земли выделяют три основных слоя: земную кору, мантию и ядро.

* Земная кора в масштабе Земли это тонкая пленка её средняя мощность около 35 км.



Источники информации о составе оболочек Земли

Метод	Ядро	Мантия		Кора	
		нижняя	верхняя	нижняя	верхняя
Прямые наблюдения					+
Сейсмические данные	+	+	+	+	+
Космохимические аналогии	+	+	+	-	-
Эксперименты	+	+	+	+	+
Анализ вещества	-	включения в глубинных алмазах	мантийные ксенолиты	?	прямое опробование



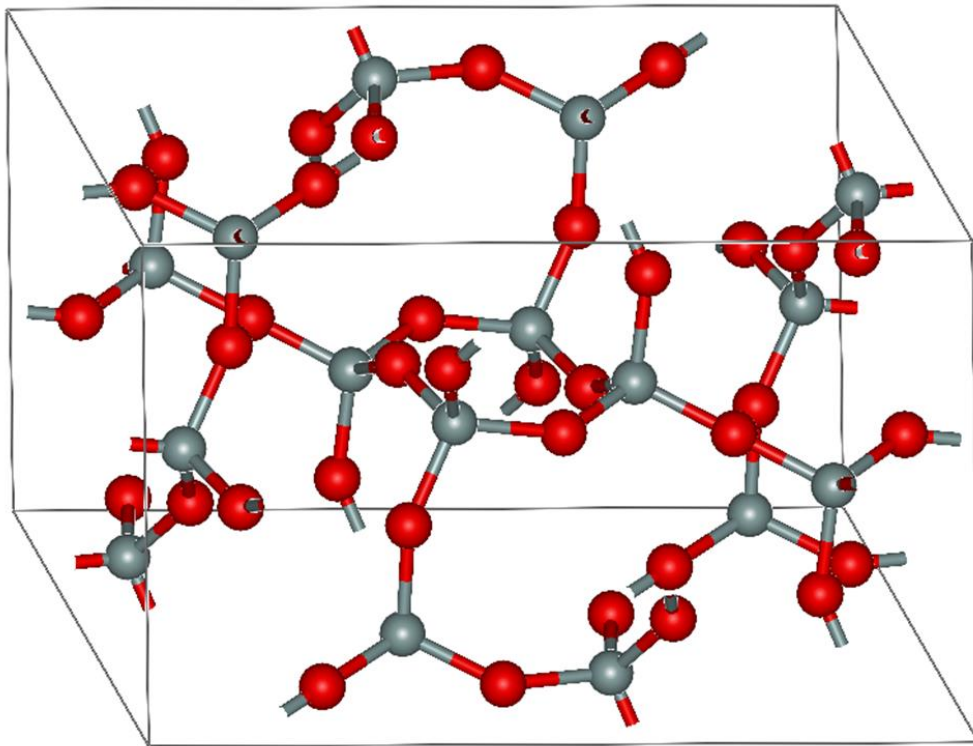
Сейсмический и плотностной профили Земли

Явление **полиморфизма** – основа современного понимания фазового состояния вещества мантии.

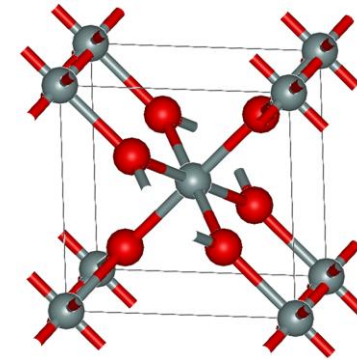
Синтез при высоких Т-Р-параметрах высокоплотной фазы SiO_2 (Стишов, Попова, 1961) с октаэдрической координацией кремния (найденной вскоре в природе - минерал ***стишовит***, 1962 г.), послужил детонатором поиска высокобарных минералов – аналогов силикатов и алюмосиликатов с более компактной кристаллической структурой.

Схема полиморфных превращений в системах Mg-Si-O- ... является основой понимания минерально-химического состава и строения мантии.

Элементарные ячейки кристаллических структур кварца и стишовита

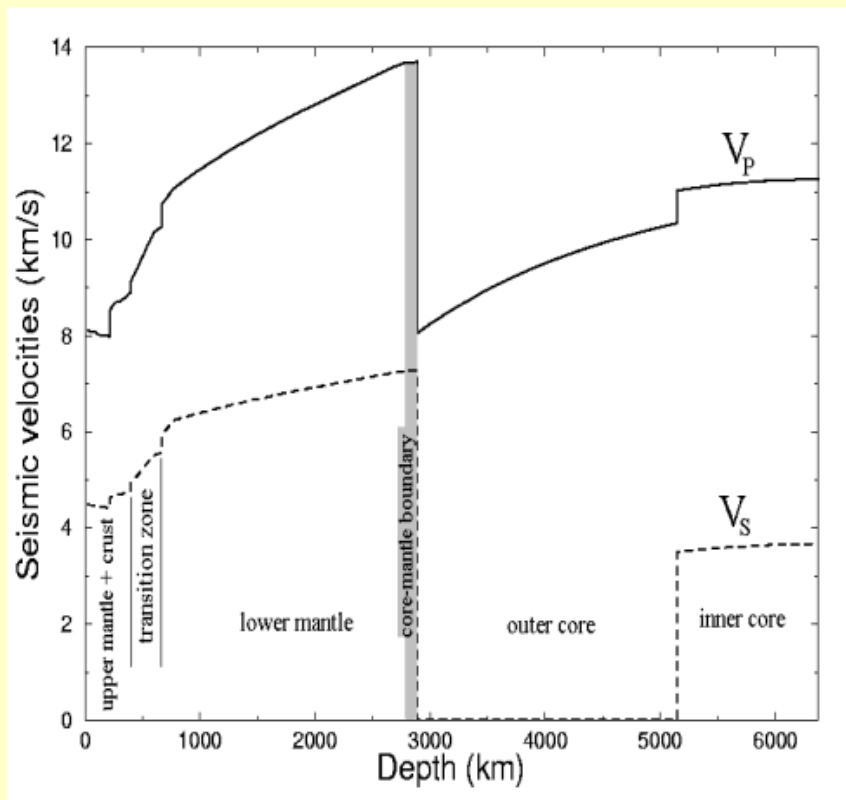


Кварц имеет рыхлую структуру из кремне-кислородных тетраэдров и, соответственно, невысокую плотность $2,65 \text{ г/см}^3$.

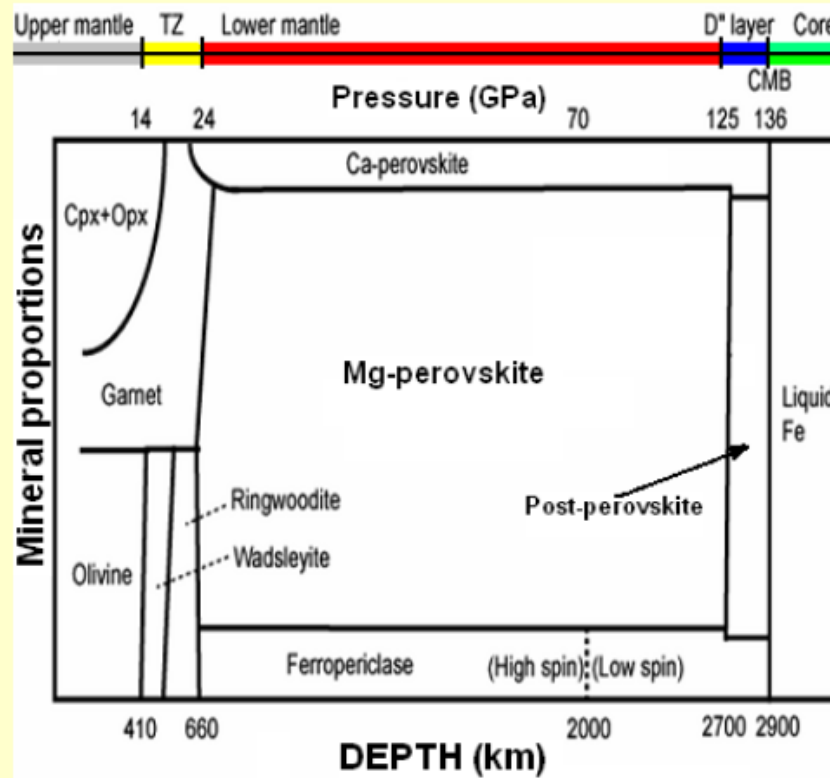


Стишовит имеет компактную структуру из плотно уложенных октаэдров, за счет чего его плотность $4,35 \text{ г/см}^3$.

Минералогическая модель земной мантии



Сейсмический профиль Земли



Минералогия земных недр

Фазовые превращения силикатов в мантии Земли в сопоставлении с геофизическими данными (Оганов, 2018)

Сейсмические разрывы на глубинах 900 км, 1200 км, 1700 км, 2300 км - загадка

Природа границ в строении мантии Земли

Оболочка, зона	Глубина, км	Фазовая ассоциация	Природа нижней границы
Нижняя кора	до 40	Оливин - пироксен - плагиоклаз	Химическая
Верхняя мантия	до 410	Оливин - пироксен - гранат (мейджорит)	Полиморфизм
Переходная зона	до 670	Вадслеит - пироксен - гранат (мейджорит) Рингвудит - гранат (мейджорит)	Полиморфизм
Нижняя мантия	до 2900	Ферропериклаз - бриджманит - Са-перовскит	Химическая
Внешнее ядро		Никелистое железо (расплав)	

Оливин – $(Mg,Fe)_2SiO_4$ (ромб.)

Пироксен – $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$

Плагиоклаз – $(Ca,Na)(Al,Si)AlSi_2O_8$

Гранат (мейджорит) – $Mg_3(Mg,Si)(SiO_4)_3$

Вадслеит - $(Mg,Fe)_2SiO_4$ (ромб.)

Рингвудит – $(Mg,Fe)_2SiO_4$ (куб., стр-ра шпинели)

Ферропериклаз/магнезиовюстит – $(Mg,Fe)O$

Бриджманит (Mg-перовскит) – $MgSiO_3$ (куб., стр-ра перовскита)

Са-перовскит – $CaSiO_3$



Традиционная модель строения Земли (а) и новая модель с выделением средней мантии (б)
(Пущаровский Д.Ю., 2016)

Дифференциация верхней мантии
и образование Земной коры.

Основополагающая идея процессов
дифференциация мантии – принцип
частичного плавления.

Пиролитовая модель верхней мантии (Рингвуд, Грин, 1962): «пиролит» = 3 ч. дунита + 1 ч. базальта

Достоинства:

1. Экспериментально воспроизводит образование двух типов базальтовых расплавов – толеитового при $P < 5$ кбар (аналог MORB) и оливинового при больших P (аналог OIB).
2. Имеет плотность, соответствующую наблюдаемой в верхней мантии.
3. Близок по составу к обыкновенным хондритам.

Недостатки:

1. Не имеет природного эквивалента в глубинных ксенолитах.
2. Содержит недостаточно летучих компонентов и микроэлементов.

Лерцолитовая модель (Дмитриев, 1969) лерцолит – ультраосновная порода (Ol + Орх + Срх + Нbl).

Достоинства:

1. Имеет природный эквивалент в глубинных ксенолитах OIB.
2. Содержит летучие и редкие микроэлементы (в роговой обманке).

Степень частичного плавления может быть определена по компонентам, существенно переходящим в расплав (например, по калию).

Проблема: как объяснить образование высоко-К базальтов OIB с расчетной степенью плавления $<1\%$ - отделение малого количества расплава от матрицы.

Выход: перейти к рассмотрению динамического процесса – движению очага плавления в мантии вверх.
Фундаментальная аналогия с процессом «зонной плавки» (zone refining) (А.П.Виноградов)

Причина плавления мантийного вещества – декомпрессия при движении вверх

⇒ конвекция вещества мантии

⇒ связь с тектоникой литосферных плит.



Латеральная неоднородность верхней мантии, связанная с ее дифференциацией:

Примитивная мантия
(никогда не плавилась)

Деплетированная мантия
(след от очага плавления)

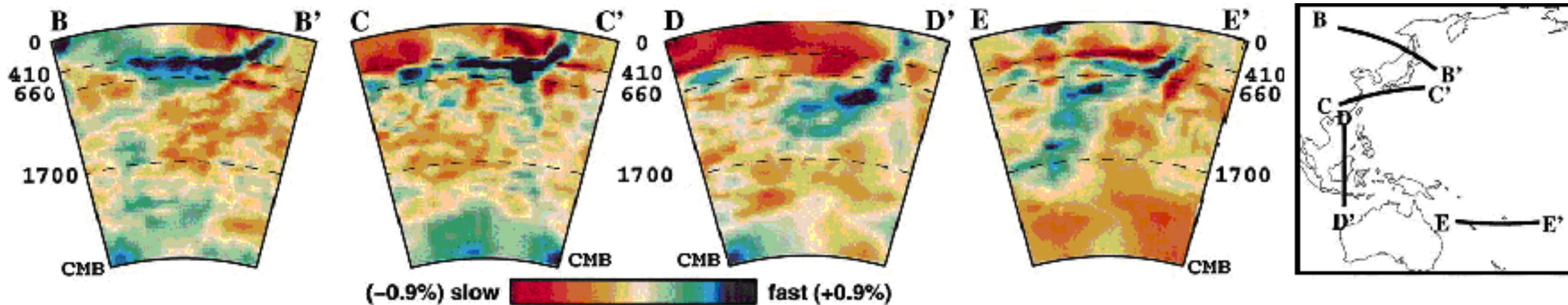
Обогащенная мантия
(замерший очаг плавления)

Деплетированная мантия (от англ. Depleted mantle, буквально – истощенная) – часть верхней мантии, обедненная электроположительными элементами с большими и/или высокозарядными ионами (U, Th, K, Rb, Cs, Sr, Ba, Be и др.) – **некогерентными элементами**, а также - легкой половиной РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm). Деплетированная мантия характеризуется пониженными значениями изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, и повышенными – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Из вещества деплетированной мантии сейчас выплавляются нормальные толеитовые базальты (N-MORB).

Некогерентные элементы – при магматическом процессе (плавление/кристаллизация) плохо входят в структуру породообразующих минералов (оливин, пироксены). Поэтому они накапливаются в расплаве и при дифференциации мантии лучше уходят земную кору.

Земная кора обогащается **легкоплавкими** элементами (но не легкими – примеры – U, Th, Pb).

Латеральная неоднородность мантии, связанная с субдукцией:



Результаты сейсмической томографии. Субдуцированные плиты в верхней и нижней мантии прослеживаются зонами повышенных скоростей. (Субдуцированная плита более холодная и более плотная, чем окружающая мантия.)

Предполагается, что древняя субдукция проявляется в изотопных аномалиях вещества мантии (например, в южной части Индийского океана).

Поведение летучих компонентов при дифференциации мантии («дегазация мантии»).

Летучие компоненты вещества мантии при плавлении практически полностью переходят в расплав. В составе магматических расплавов они переходят из мантии в земную кору.

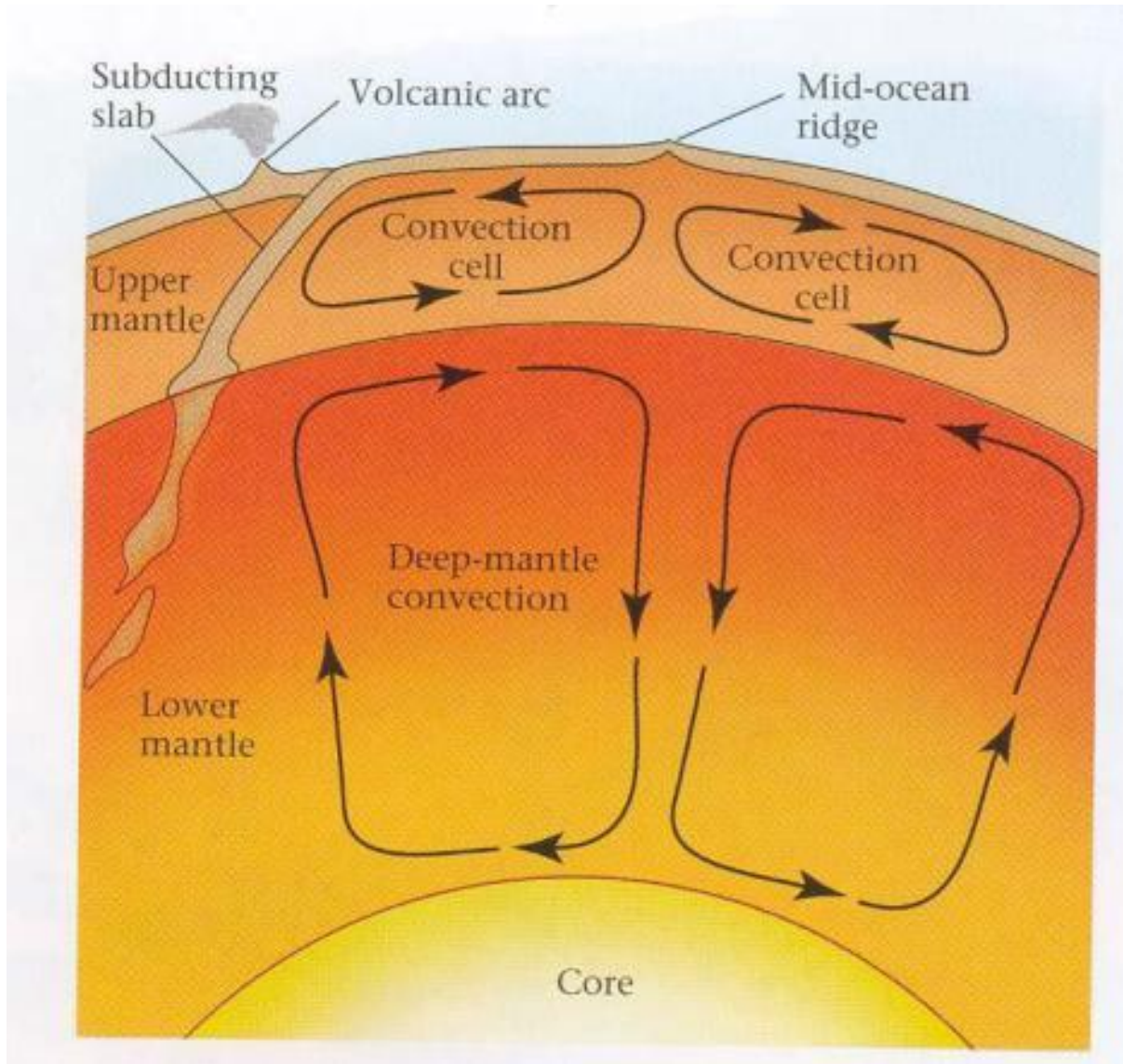
При затвердевании расплавов летучие компоненты отделяются в виде легкой флюидной фазы и питают внешние подвижные оболочки Земли – **гидросферу** и **атмосферу**.

К настоящему времени верхняя мантия потеряла большую часть запаса летучих (по оценкам – до 95 %).

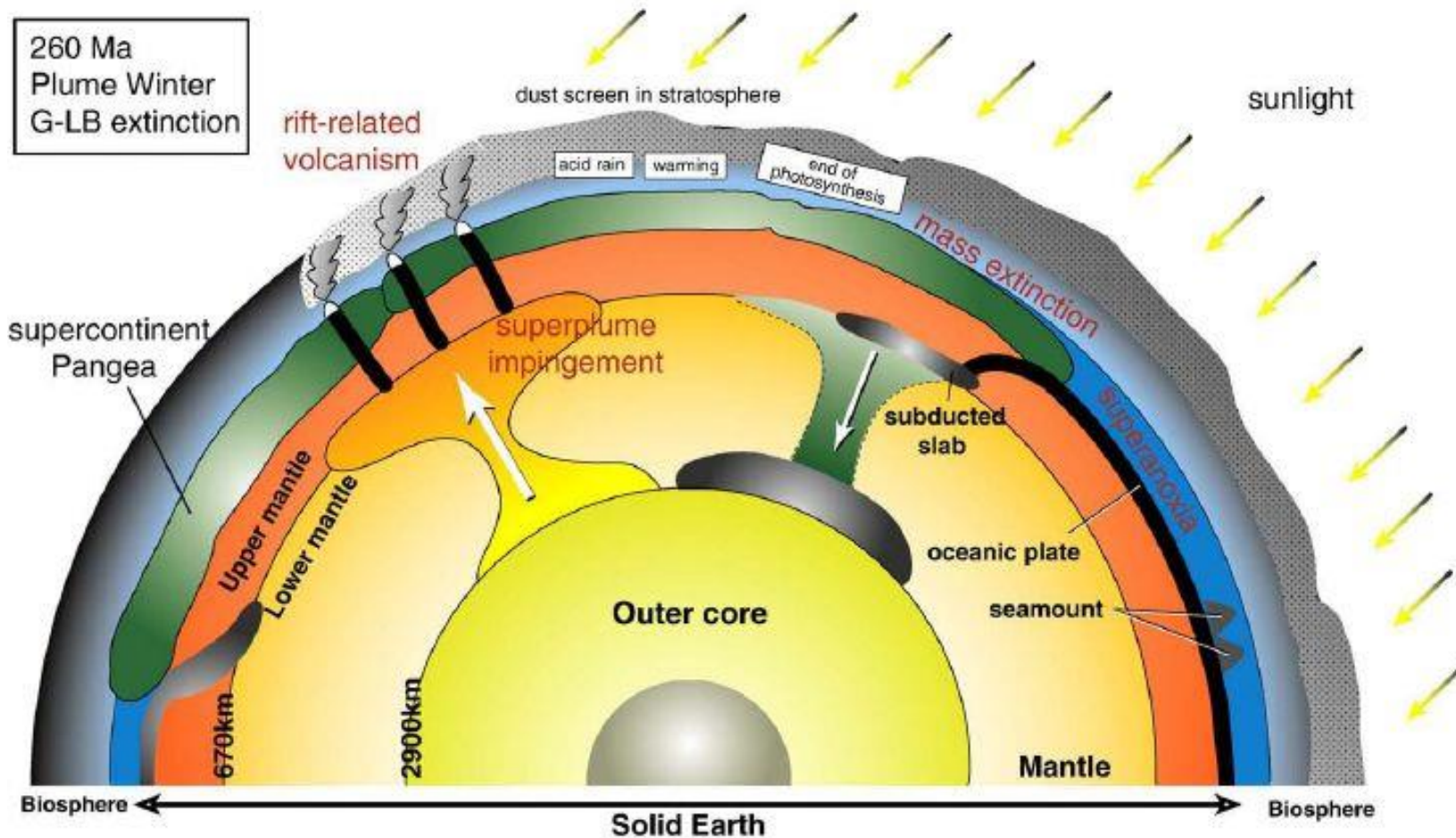
По результатам исследований хадейских «детритных» цирконов, Земля имела гидросферу уже по крайней мере 4,2 млрд. лет назад.

Нерешенные проблемы
дифференциация мантии.

Соотношение конвекции верхней мантии и плотностных границ в нижней мантии

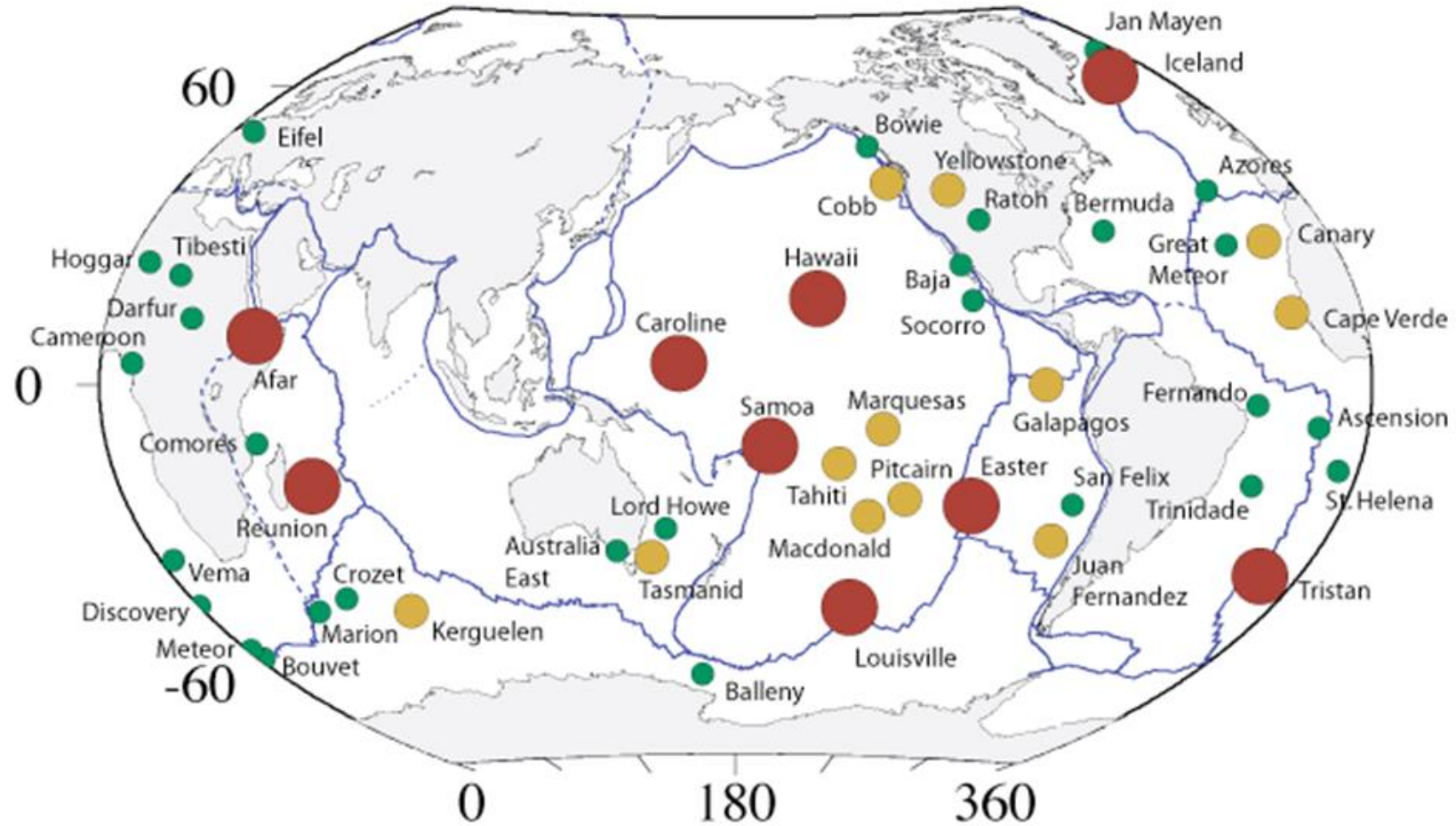


Из-за разности плотностей верхней и нижней мантии конвекция может прерываться на границе оболочек и переходить в двухслойную. Тогда возникает проблема переноса вещества между верхней и нижней мантией.

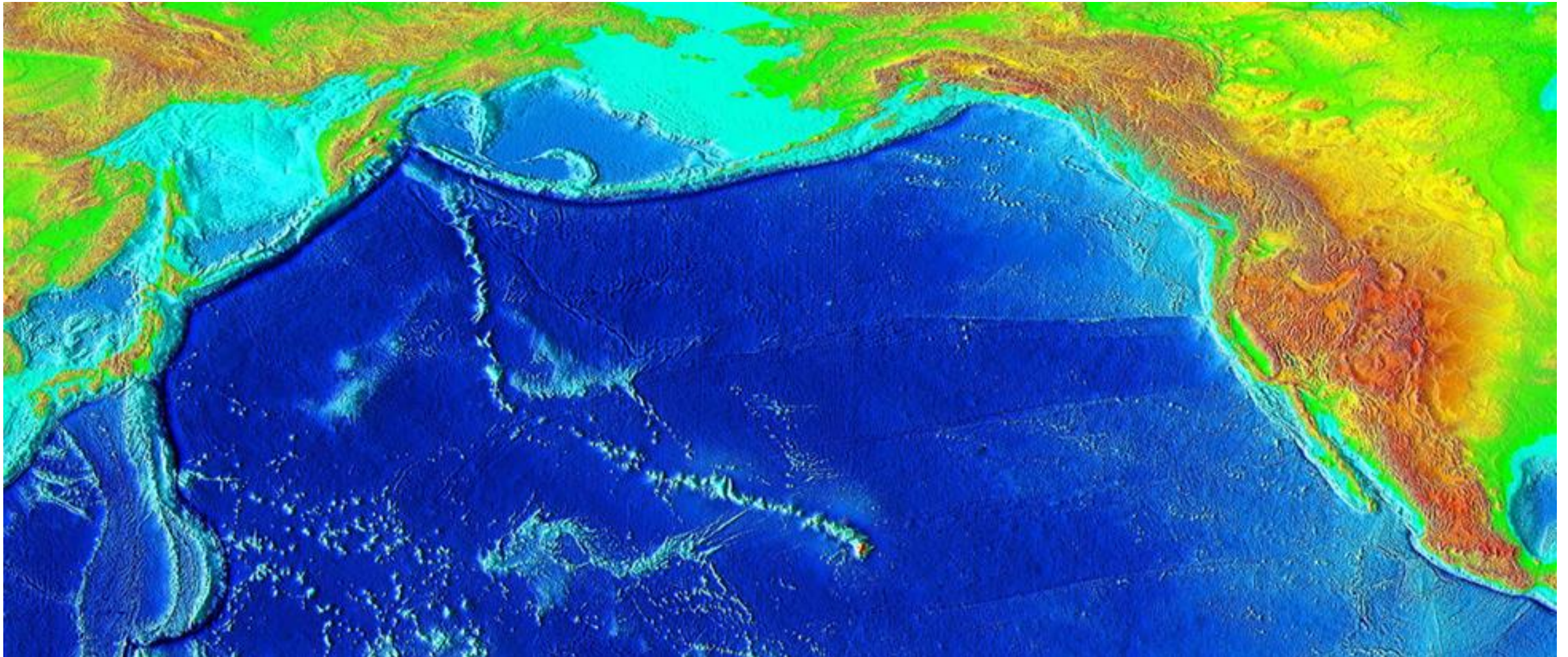


Учет скачка плотностей на границе верхней и нижней мантии резко усложняет геодинамические модели.

Проблема горячих точек



Карта распределения «горячих точек». Коричневым цветом показаны установленные «горячие точки», зеленым и желтым – предположительные и замершие



След Гавайской горячей точки на карте рельефа дна Тихого океана.

Автор: National Geophysical Data Center/USGS - <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html>

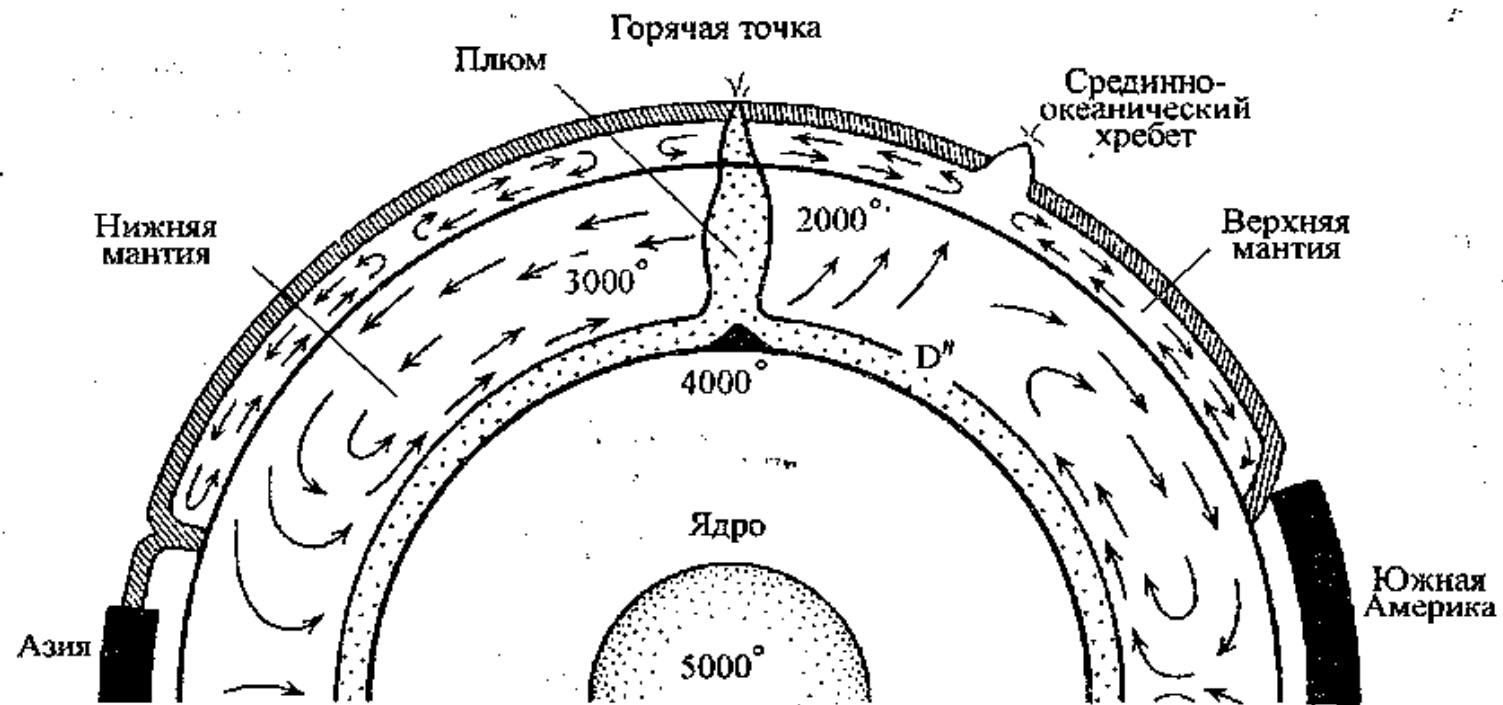
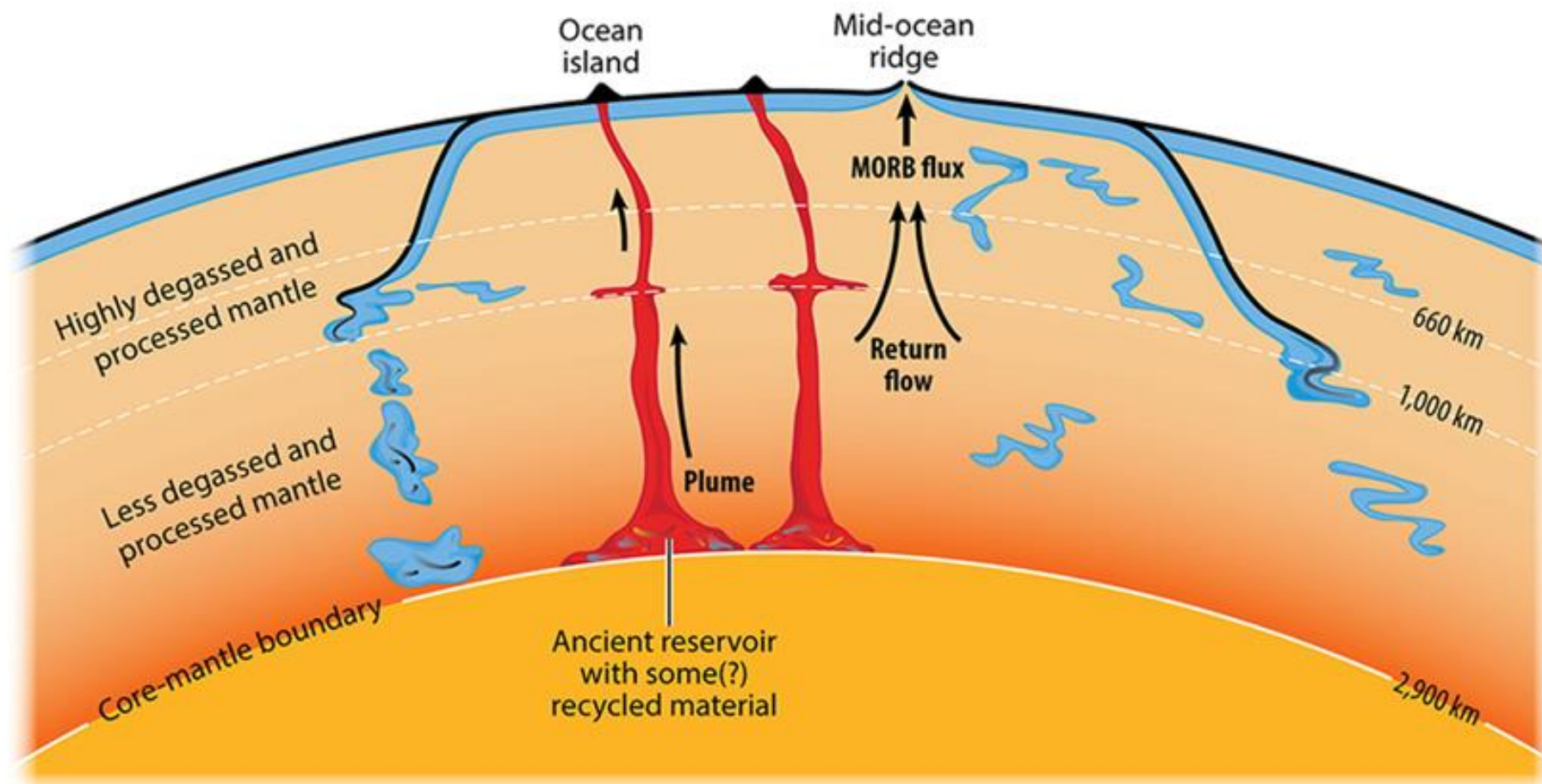


Рис. 14. Двухслойная конвекция в мантии, по Л. П. Зоненшайну и М. И. Кузьмину [1993].
Показана быстро поднимающаяся из слоя D'' мантийная струя, пересекающая конвективные потоки.

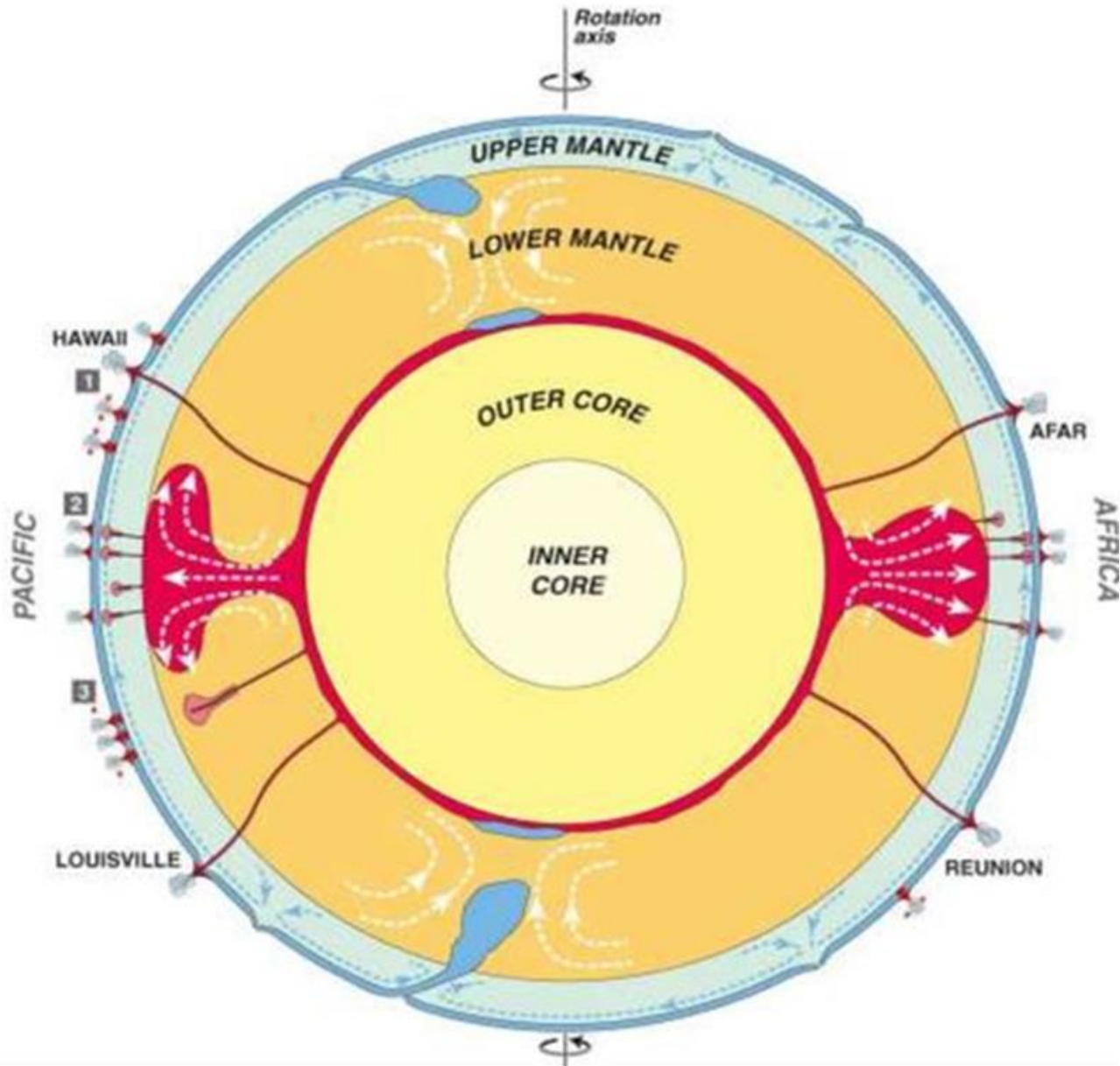
Соотношение «горячих точек» и конвекции верхней мантии.



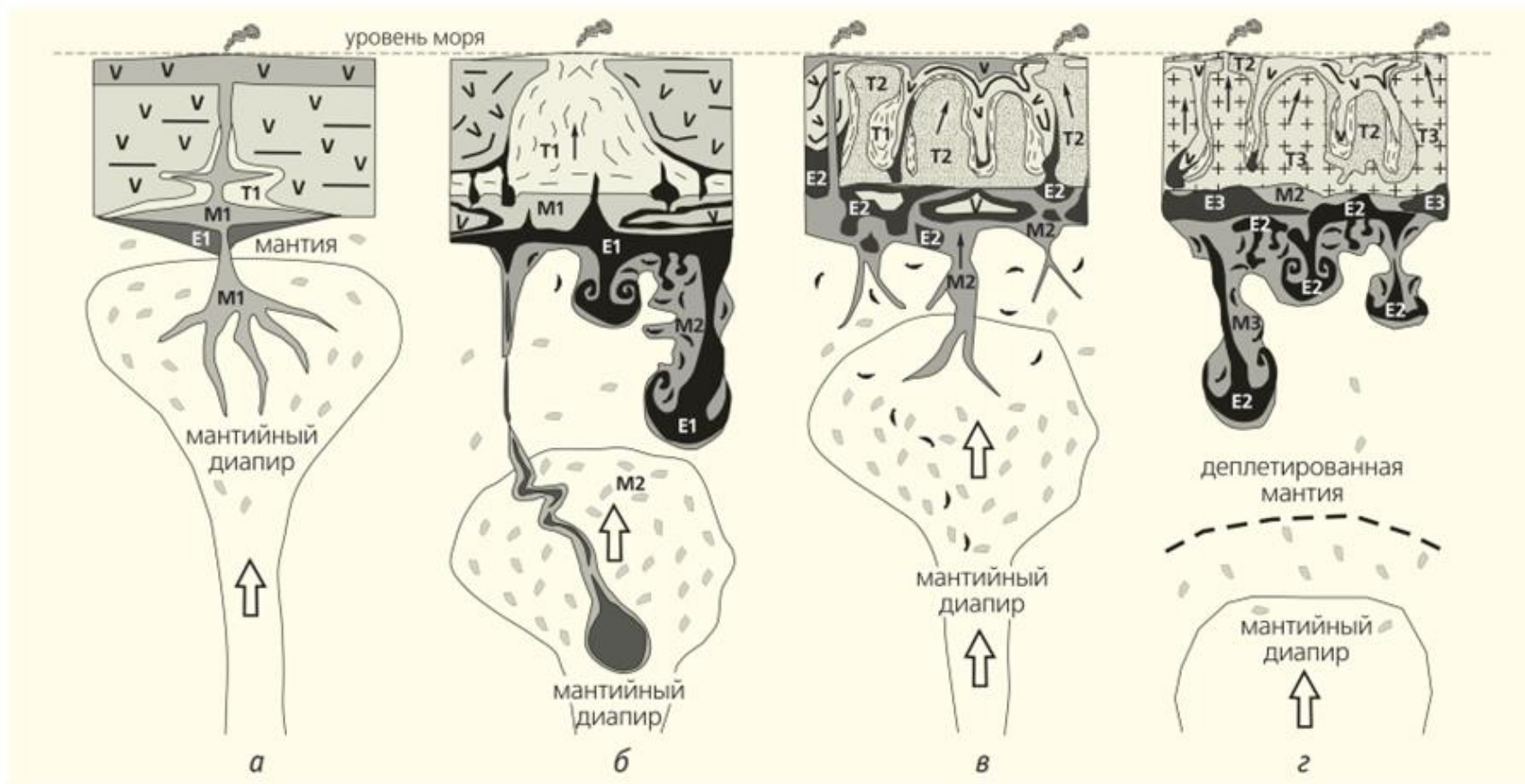
Mukhopadhyay S, Parai R. 2019.
Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 47:389-419

Соотношение «горячих точек» и конвекции верхней мантии.
 (По Mukhopadhyay, Parai, 2019)

Проблема мантийных диапиров



Возможное представление модели мантийных диапиров.



(Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. // Природа, 2017)

Рис.4. Модель формирования тоналитовых расплавов под влиянием мантийных плюмов в ранней истории Земли [18]: *a* — мантийный плюм — источник расплавов (M1), образующих мощную вулканическую кору; расплавы, задержавшиеся в ее основании, подплавляют ее и формируют тоналитовые расплавы (T1); *б* — более легкие расплавы T1 поднимаются в кору; рестины и кумуляты (E1) погружаются в мантию, где частично смешиваются со второй генерацией мантийных расплавов (M2); *в* — расплавы M2 воздействуют на основание коры и плавят участвующий в ее строении материал; формируется вторая генерация менее плотных тоналитовых расплавов (T2); *г* — с прекращением второго импульса магматизма низы коры остывают, частично отслаиваются и погружаются в мантию; этот процесс провоцирует мантийное плавление с образованием расплавов M3. Их воздействие на ранее сформированные тела M2 и реликты лав приводит к формированию третьей генерации тоналитов и гранодиоритов T3 и реститов генерации E3.

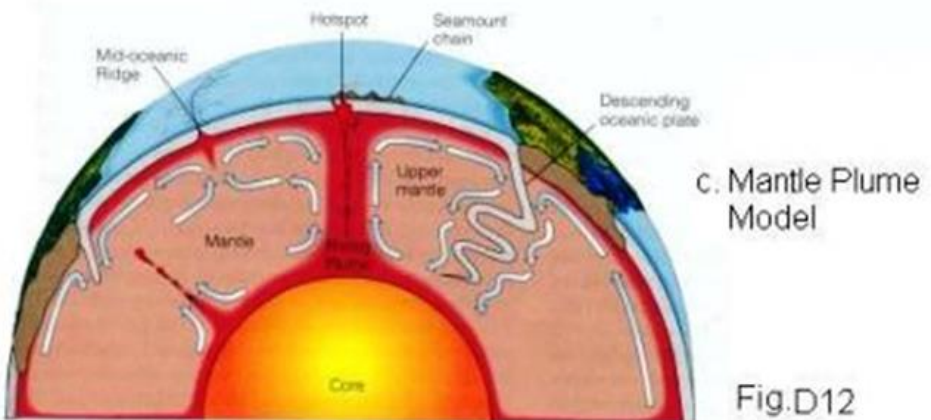
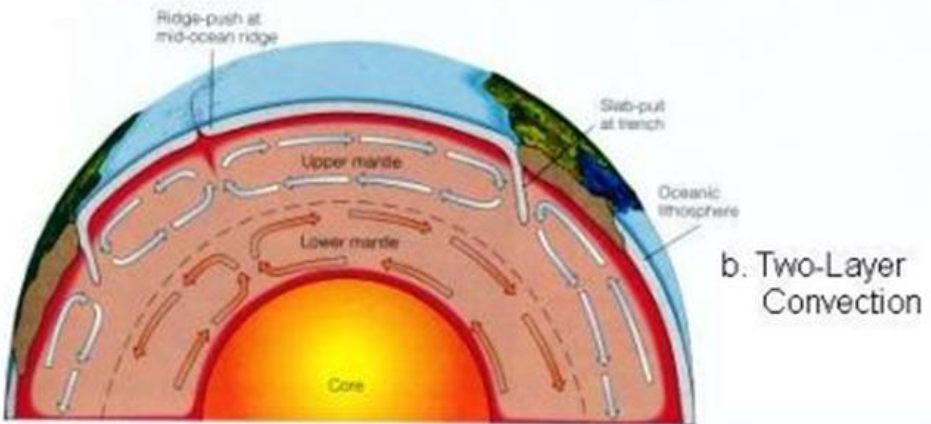
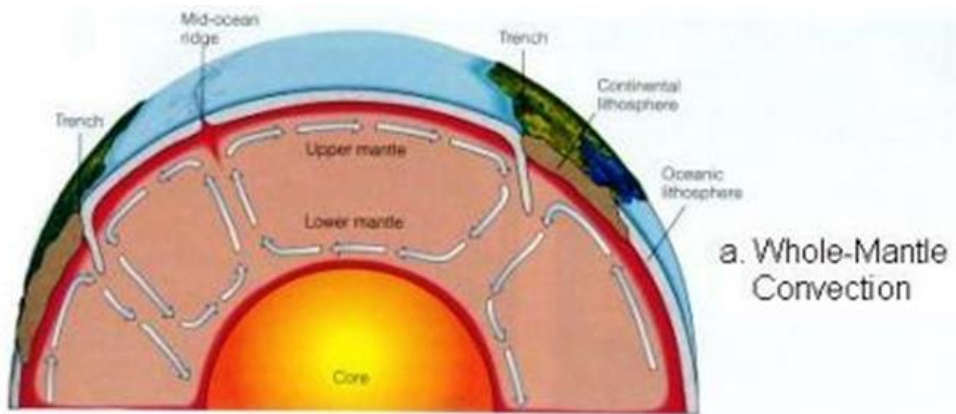
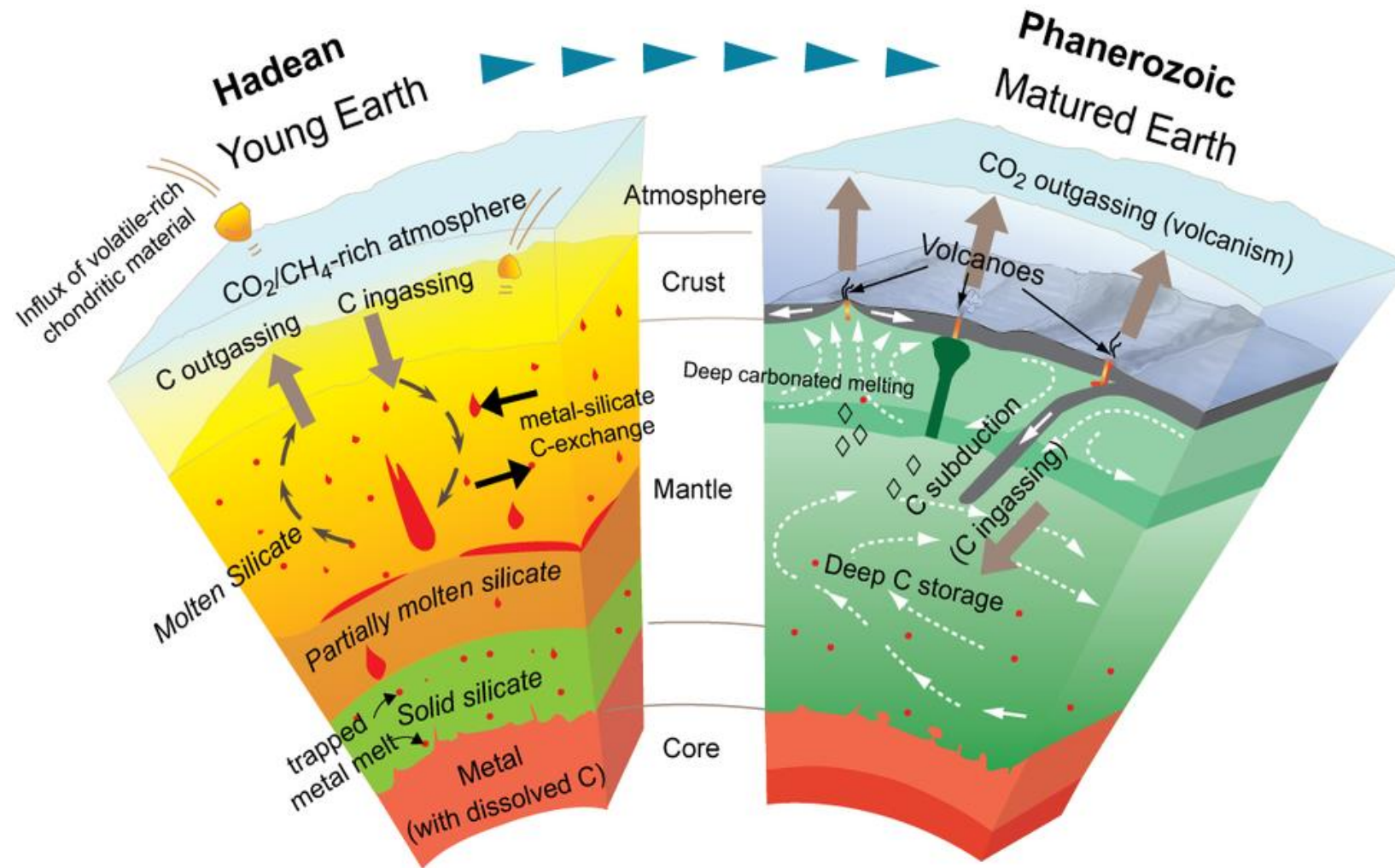


Fig.D12

В современной геодинамике сосуществуют разные модели мантийных процессов.

(New Study Further Confirms Battros 2012 Equation Related to Convection. July 7, 2016. <https://scienceofcycles.com>)

Проблема эволюции мантийных процессов в истории Земли



Предполагаемое соотношение стилей мантийных процессов в ранней и современной Земле.

