

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
НЕФТИ И ГАЗА ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА**

КАФЕДРА ГЕОЛОГИИ

УЧЕБНАЯ ДИСЦИПЛИНА

«ГЕОДИНАМИКА»



МОСКВА 2014г.

ГЕОДИНАМИКА

Литература

- В.П. Гаврилов
ГЕОДИНАМИКА : учебник для вузов – М.,:
МАКС Пресс, 2007г.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.
Современные проблемы геотектоники и
геодинамики. - М.: Научный мир, 2004

СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

- 1. СТРОЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗЕМНЫХ НЕДР**
- 2. СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ЗЕМЛИ**
- 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЗЕМЛИ**
- 4. РЕОЛОГИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И МАНТИИ**
- 5. ГЕОДИНАМИКА ЯДРА**
- 6. ГЕОДИНАМИКА МАНТИИ**
- 7. ГЕОДИНАМИКА ЛИТОСФЕРЫ**
- 8. ДВУХЯРУСНАЯ ТЕКТОНИКА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ**
- 9. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГИДРОСФЕРЫ И АТМОСФЕРЫ**
- 10. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЛИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**
- 11. ТЕКТОНИКА ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ И ФОРМИРОВАНИЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

- ✓ Предметом изучения **геотектоники** является, состав и структура земных геосфер, т.е. некие материальные объекты, которые можно проанализировать, изучить их состав и строение, изобразить на геологических и тектонических картах.
- ✓ **Геодинамика** изучает процессы, геологические явления и причины, приводящие к появлению и эволюции земных геосфер (ядра, мантии, коры), глобальные закономерности геологического развития планеты. Другими словами предметом изучения геодинамики является *глобальная эволюция Земли*.

По нашему мнению, под

«ГЕОДИНАМИКОЙ» следует понимать фундаментальные физико-геологические процессы, протекающие в недрах Земли, приводящие к тектономагматической активности её литосферной оболочки и формированию месторождений полезных ископаемых.

В структуре геодинамики, предлагается выделять следующие разделы:

- физические основы геодинамики (физические свойства и реология земных недр, энергетика Земли, состав и строение первичной Земли);
- геодинамика ядра;
- геодинамика мантии;
- геодинамика литосферы;
- геодинамические закономерности эволюции литосферы;
- практические аспекты геодинамики.

СТРОЕНИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗЕМНЫХ НЕДР

□ Методы изучения геологических объектов

1. ПРЯМЫЕ

Позволяют непосредственно (прямо) изучать вещество пород, полезных ископаемых.

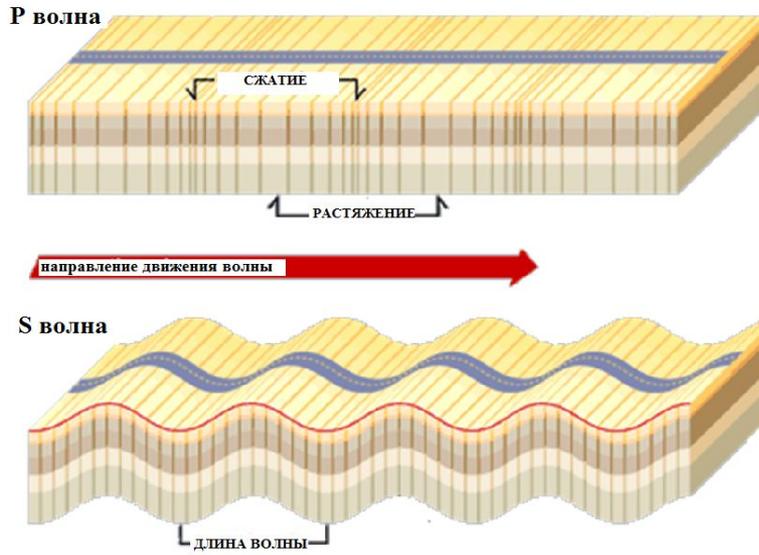
Изучение – горных выработок, естественных обнажений, шурфы, карьеры, буровые скважины.

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) — самая глубокая буровая скважина в мире. Находится в Мурманской области, в 10 километрах к западу от города Заполярного, на территории Балтийского щита. Её глубина составляет 12 262 метра.

2. КОСВЕННЫЕ (геофизические)

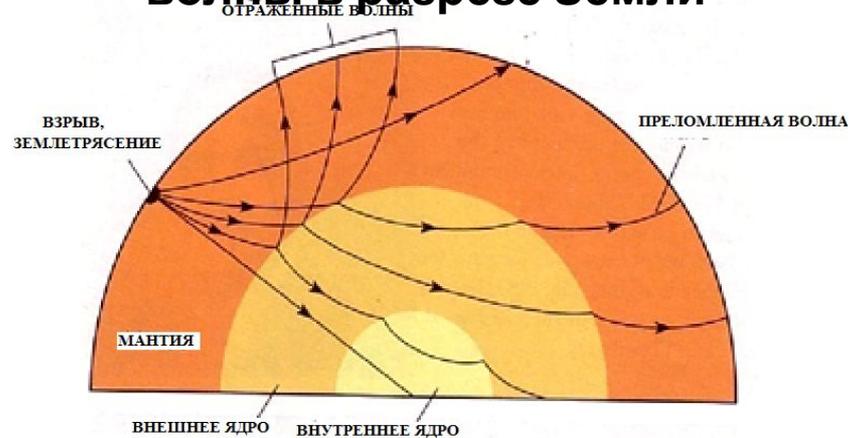
- Метод позволяет изучить различные физические свойства глубинных недр Земли – скорость распространения в них упругих волн, электропроводность, магнитную восприимчивость и т.п.
- *По характеру изучаемых физических свойств различают:*
 1. *Электрметрия*
 2. *Магнитометрия*
 3. *Сейсморазведка*
 4. *Гравиметрия*

Методы исследования недр (сейсмические волны)



Виды сейсмических волн

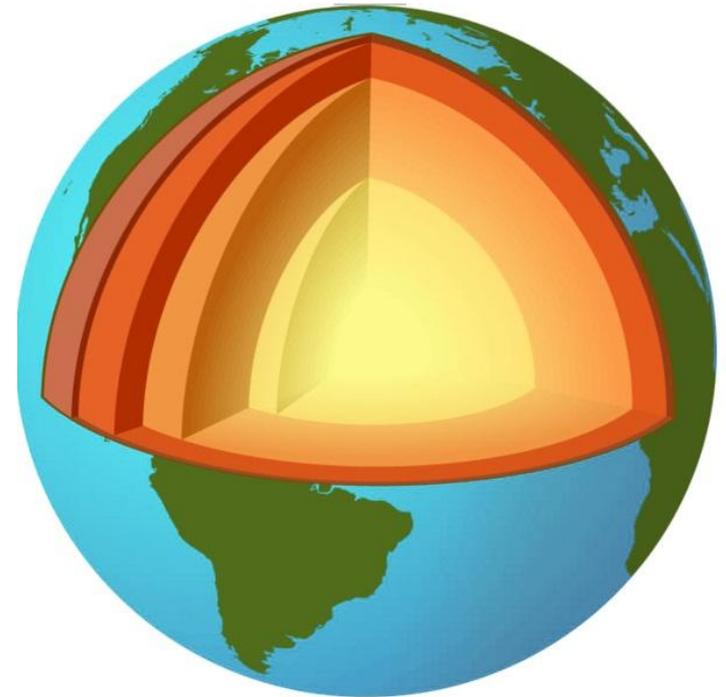
Отраженные и преломленные сейсмические волны в разрезе Земли



Построение моделей

- В основном наши знания о земных недрах основываются на косвенных методах исследования, что предопределяет известную условность и неоднозначность наших представлений. Поэтому в геологии часто используют метод составления моделей внутреннего строения Земли, т.е. наглядных картин строения изучаемого объекта.

Модели отражают не столько истину, сколько уровень наших знаний. Поэтому они не постоянны, а меняются со временем в зависимости от получения новых фактов.



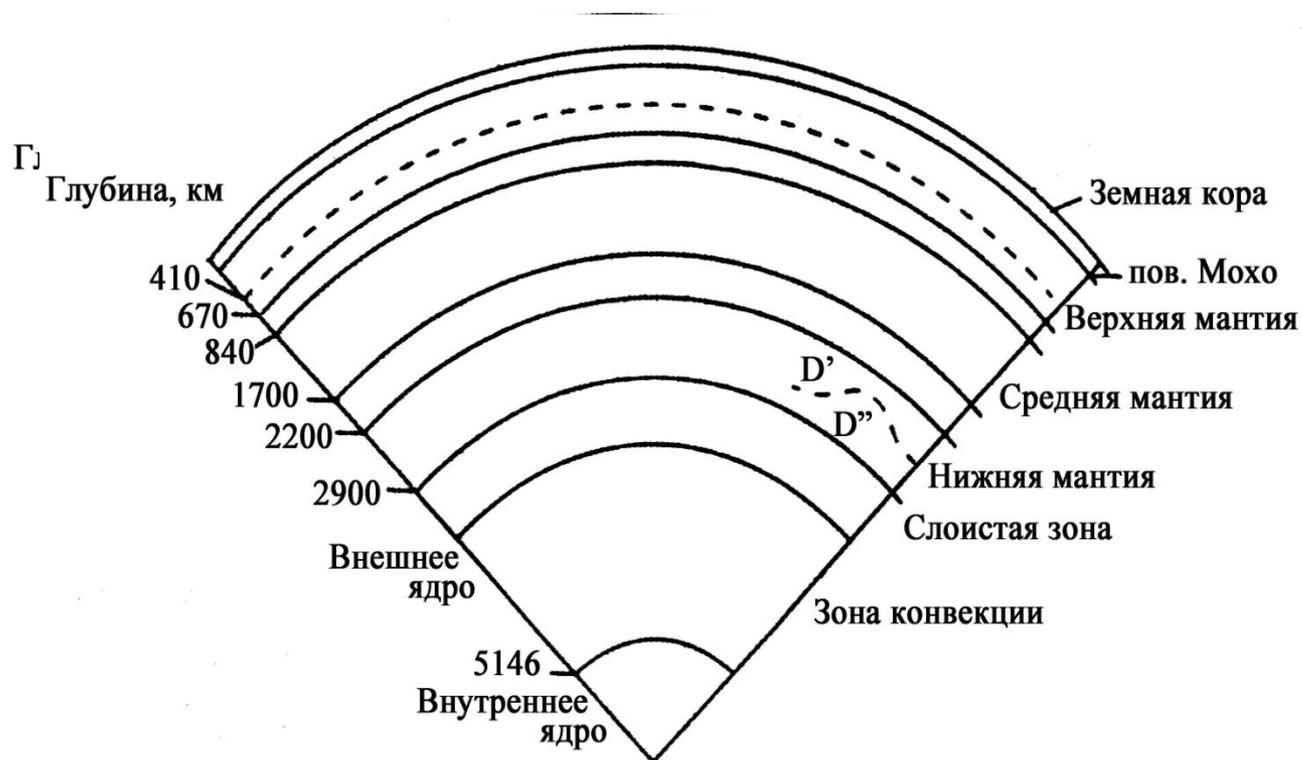
современные модели Земли

- построены глобальные сейсмотомографические карты для различных уровней земного шара, отражающие сейсмическую неоднородность недр.
- ✓ японскими учёными составлены карты для 14 уровней
- ✓ американскими – для 12 уровней.
- ✓ Ю.М. Пушаровским предлагается новая модель строения мантии, в которой выделено шесть геосфер.

Модель Ю.М. Пушаровского

- **выделено шесть геосфер:**
 - ✓ верхняя часть верхней мантии – до глубины 410 км,
 - ✓ нижняя часть верхней мантии – до рубежа 670 км;
 - ✓ зона раздела I между верхней и средней мантией (670÷840 км);
 - ✓ средняя мантия (840÷1700 км);
 - ✓ зона раздела II, отделяющая среднюю мантию от нижней (1700÷2200 км),
 - ✓ нижняя мантия (1700÷2900 км).
 - ✓ В основании нижней мантии выделяется слой D'', но в отличие от ранее принятых границ этого слоя 2700÷2900 км

Современная модель внутреннего строения Земли



Глубинные геосферы Земли (J.R.Lister, B.A.Buffett, 1998; Ю.М.Пуцаровский, 2001).

□ ЛЕКЦИЯ 2

Земная кора

□ Первые представления о существовании земной коры были высказаны английским физиком

У. Гильбертом в 1600 г.

❖ Им было предложено делить недра Земли на две неравные части: кору или скорлупу и твёрдое ядро.

Этапы развития представлений о строении земной коры

- В Хорватии в 1909 г., сейсмолог А.Мохоровичич, выделил чётко прослеживающуюся сейсмическую границу на глубине порядка 50 км, которую он определил как подошву земной коры (поверхность Мохоровичича, Мохо, или М).
- В 1925 г. В.Конрад зафиксировал ещё одну поверхность раздела внутри коры, которая также получила его имя - поверхность Конрада, или поверхность К.
 - Появилась первая двуслойная модель строения земной коры: верхний слой коры мощностью порядка 12 км называть гранитным слоем, а нижний мощностью 25 км - базальтовым.
- В 1954 г. Г.А.Гамбургцевым был разработан метод глубокого сейсмического зондирования (ГСЗ), позволивший изучить недра Земли до глубины в 100 км.
 - научно обосновано представление о существовании двух принципиально различных типов коры: *континентальной и океанической*

ЗЕМНАЯ КОРА верхняя оболочка Земли, отделённая от нижерасположённой мантии поверхностью Мохоровичича (Мохо).

□ В зависимости от особенностей строения выделяют три типа земной коры: **континентальный**, **океанический** и **промежуточный**.

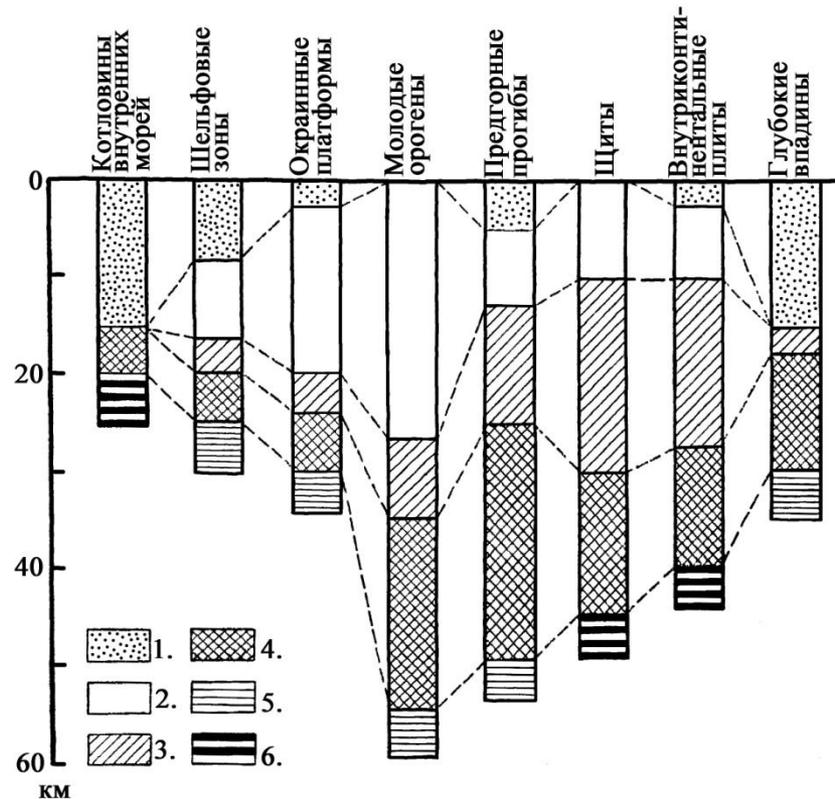
Континентальная кора

отличается наличием в своём составе:

- I. Осадочный слой
 - II. Мощный гранитогнейсовый (гранитометаморфического) слой, плотность слагающих его пород - $2,58 \div 2,64 \text{ г/см}^3$, а скорость сейсмических волн - $5,5 \div 6,3 \text{ км/с}$.
 - III. Подстилающий гранулитобазитовым (гранулитобазитовым) слой с плотностью пород $2,8 \div 3,1 \text{ г/см}^3$ и пластовой скоростью до $7,4 \text{ км/с}$.
- ✓ *Гранитогнейсовый и гранулитобазитовый слой образуют консолидированную кору.*

□ 80^{ые} годы прошлого столетия характеризуются созданием трехслойной модели консолидированной коры

- **Верхний** слой, мощностью $8 \div 15$ км, отмечается нарастанием скорости сейсмических волн с глубиной (соответствует **гранитно-метаморфическому** слою) граница K_1
- Второй (**средний**) слой до глубин $20 \div 25$ км характеризуется некоторым снижением скорости упругих волн (сложен породами типа **базальтов**) граница K_2
- Третий (**нижний**) слой, прослеживающийся до подошвы коры, высокоскоростной ($6,8 \div 7,7$ км/с) (представлен **ультраосновными породами**)



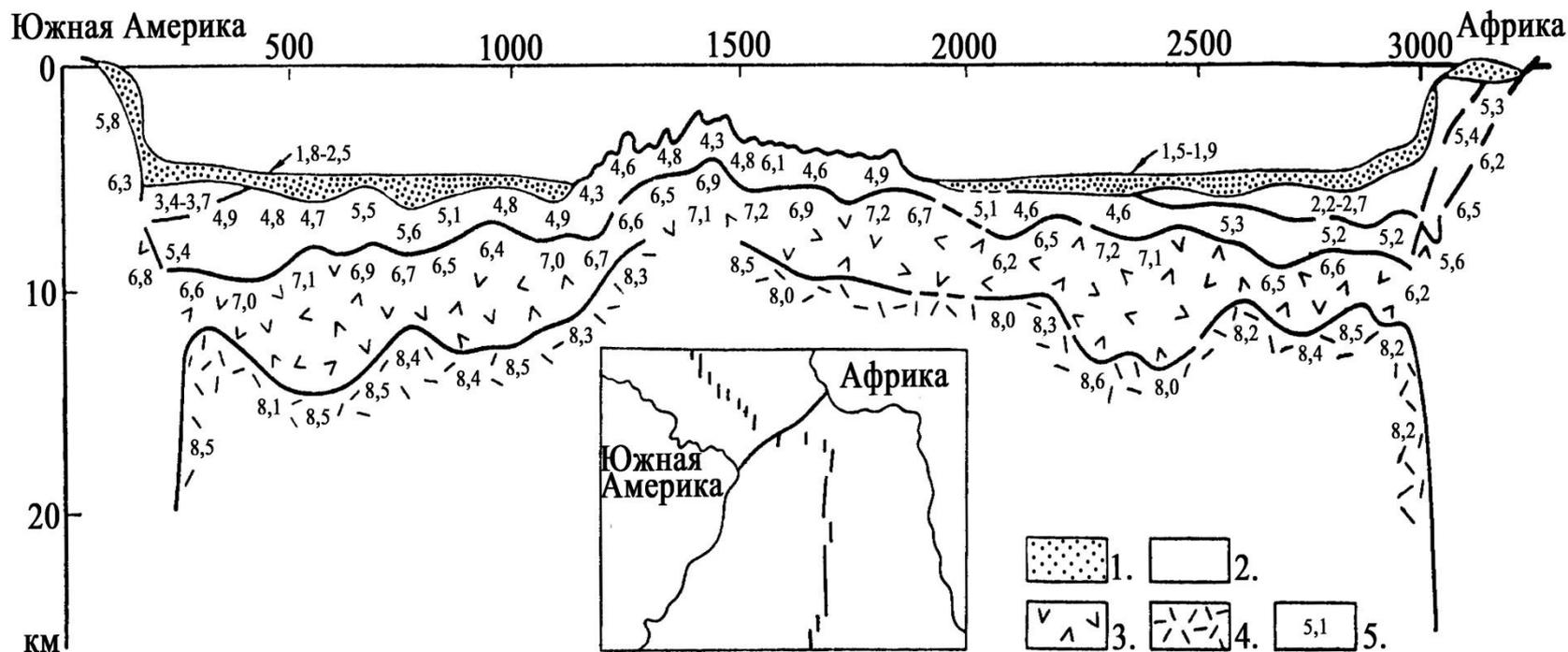
Скоростные колонки для основных структурных элементов материков (по Н.И.Павленковой).

1 - осадочный слой; 2-4 - слой консолидированной коры (2 - верхний, 3 - средний, 4 - нижний); 5 и 6 - мантия.

Строение и состав океанической коры

- Океаническая кора состоит из трёх слоев:
- ✓ *Первый (осадочный) слой* с поверхности покрывает дно морей и океанов
- ✓ *Второй (базальтовый) слой* сложен чередованием базальтовых лавовых потоков, брекчий, вулканических пеплов и долеритовых даек
- ✓ *Третий (габбро-серпентинитовый) слой* представляет фундамент океанической коры

Сейсмический разрез через экваториальную Атлантику (по Р.Лейдену, Р.Шеридану, М.Эвингу).



1 – 3 - слои океанической коры (1 - осадочный, 2 – базальтовый, 3 – габбро-серпентинитовый); 4 – мантия; 5 – скорости сейсмических волн, км/с

✓ Океаническая кора в пределах срединно-океанических хребтов:

практически отсутствует первый слой

не имеет чёткого распространения третий слой

Промежуточная кора

(различают два подтипа: *субконтинентальный* и *субокеанический*)

- *Субконтинентальная кора:*

характерна для некоторых островных дуг. В её строении присутствуют осадочный, «гранитный» и «базальтовый» слои

- *Субокеаническая кора:*

присуща окраинным и некоторым внутриконтинентальным морям. Характеризуется увеличенной мощностью осадочного слоя (до 20 км)

Химический состав земной коры

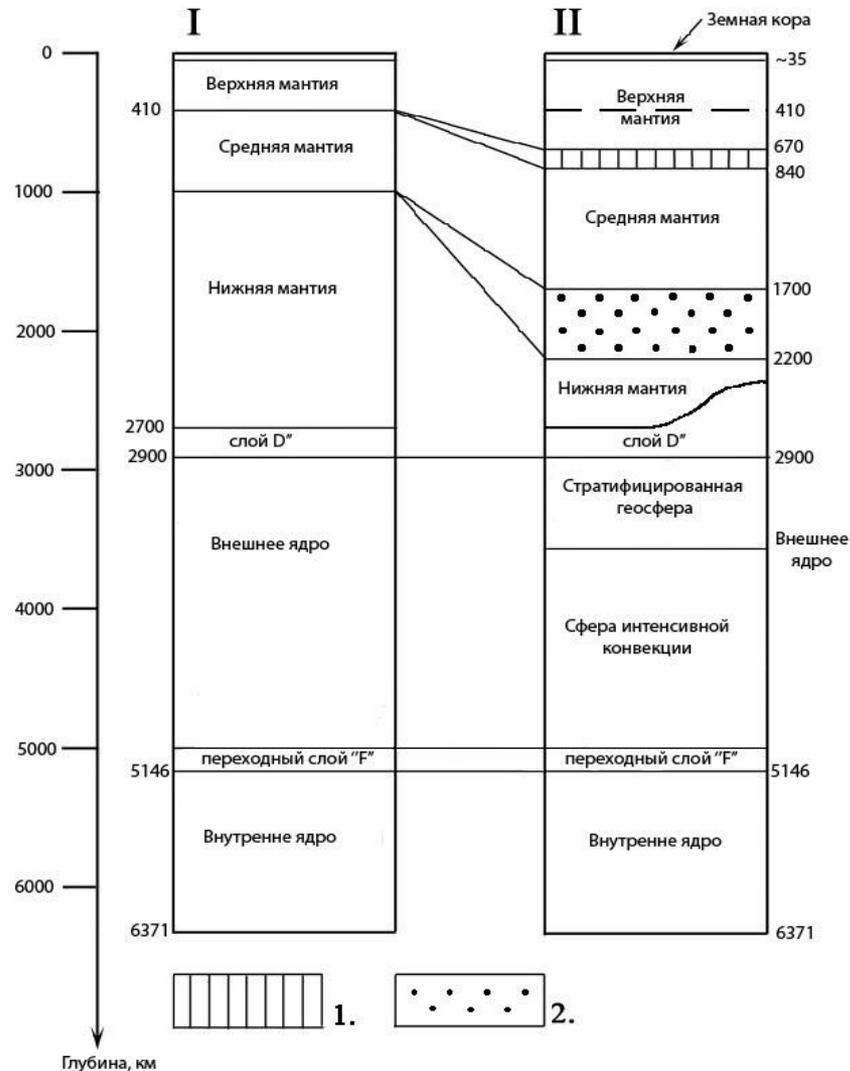
- ❖ определяется в первую очередь кислородом (49,13%), кремнием (26%) и алюминием (7,45%). Значительную роль играют также железо (4,2%), кальций (3,25%), натрий (2,40%), калий (2,35%) и магний (2,35%). Самый распространённый элемент - кислород - находится в коре в виде окислов: SiO_2 (58%), Al_2O_3 (15%), FeO и Fe_2O_3 (8%), CaO (6%), MgO (4%), N_2O (4%), K_2O (2 ÷ 2,5%) и т.д. Кора характеризуется относительно высоким содержанием долгоживущих радиоактивных изотопов урана, тория и калия. Максимальная их концентрация отмечается в кислых породах ($3,5 \cdot 10^{-4}$ % в гранитах), минимальная - в ультраосновных ($3 \cdot 10^{-7}$ % в дунитах). В минералогическом отношении земная кора состоит из легкоплавких силикатов с преобладанием алюмосиликатов.

Мантия

- Мантия заключена между поверхностями Мохоровичича и Вихерта – Гуттенберга. На её долю приходится 83% объема Земли и почти 67% массы.
- По сейсмологические данным выделяют в её пределах:
 - ✓ верхнюю мантию (слой В),
 - ✓ среднюю мантию (слой С)
 - ✓ нижнюю мантию (слои D' и D").

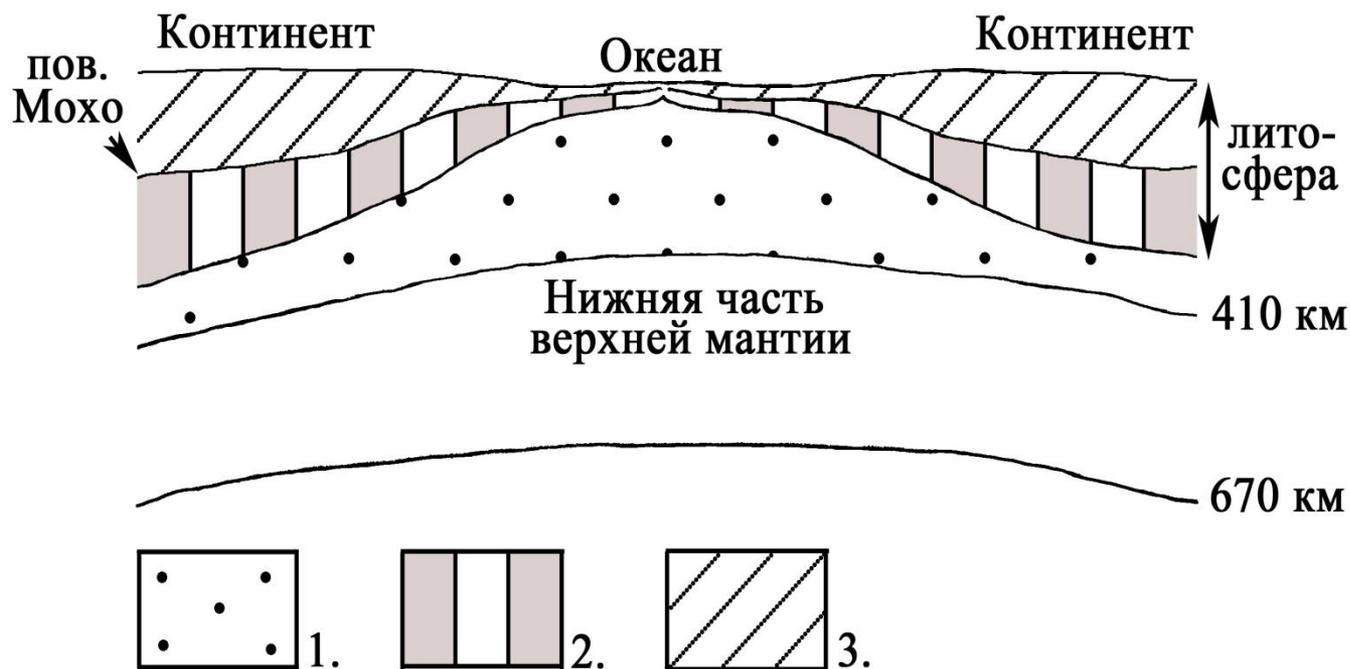
- I. Верхняя мантия отделена от средней границей раздела на глубине около 410 км.
- II. Средняя мантия (слой Голицына) отделяется от нижней на глубине 950 ÷ 1000 км.
- III. Нижняя мантия (слои D' и D'') прослеживается до глубины 2900 км.

Сопоставление моделей внутреннего строения Земли традиционной (I) и новой по Ю.М.Пущаровскому (II)



1 – зона раздела I; 2 – зона раздела II.

Принципиальная схема строения верхней мантии Земли. (по Ю.М. Пуцаровскому)



1 - астеносфера; 2 - субстрат (перидотитовый слой); 3 - земная кора.

Петрологические модели верхней мантии

- *Пиролитовая* модель
- ✓ пиролит - это условная пироксеново-оливиновая порода, состоящая из трёх частей перидотита и одной части гавайских базальтов
- *Лерцолитовая* модель
- ✓ состоит из смеси пяти частей перидотита-гарсбургита и одной части толеитового базальта океанических рифтовых долин

- *Пиклогитовая* модель
- ✓ доминирование пироксен-гранатовой ассоциации и имеет более чётко выраженный химический контраст с остальной мантией
- *Эклогитовая* модель
- ✓ допускает присутствие в верхней мантии эклогитовых линз и блоков

Зоны раздела мантии

- Зона раздела I (670 ÷ 840 км) характеризуется сложными полиморфными переходами минералов
 - ✓ трансформация оливина в перовскит $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ и магнезиовюстит $(\text{Mg,Fe})\text{O}$
- Средняя мантия (870 ÷ 1700 км)
 - ✓ состав существенно менее изучен по сравнению с верхней мантией.

- **Зона раздела II (1700 ÷ 2200 км)**
- ✓ Увеличение давления, зафиксировано появление у вюстита политипии, связанное с образованием структурных фрагментов типа никелина (NiAs). Здесь же отмечена перестройка кремнезёма в стишовит с ромбической структурой типа рутила (TiO_2)
- Нижняя мантия (2200 ÷ 2900 км) характеризуется дальнейшим увеличением плотности пород и плавным нарастанием скорости сейсмических волн

Вывод

- По сравнению с верхней мантией нижняя характеризуется относительной обогащённостью железом, т.е. она в значительной степени сохранила свой примитивный (изначальный) состав, тогда как верхняя мантия уже истощена (деплетизирована)

Ядро

- Ядро занимает центральную часть Земли (2900-6371 км), составляя около 17% от ее объема и 33% массы.
- В составе ядра выделяют:
 - ✓ внешнее ядро
 - ✓ переходную оболочку
 - ✓ внутреннее ядро

□ Внешнее ядро (слой E) заключено в пределах от 2900 до 5000 км. Его объём 15,16%, масса - 29,8 %

❖ переходная оболочка (слой F)

□ Внутреннее ядро (слой G, или субъядро)
радиус - 1250 км, объём - около 0,7%, а масса - около 1,8% от массы всей Земли

Химический и минералогический состава ядра

- ядро - железо-никелевое или силикатное (т.е. тождественно составу мантии)
- По мнению О.Г.Сорохтина, наиболее вероятной добавкой к железу во внешнем ядре служит кислород, а основным соединением, определяющим состав ядра, является оксид одновалентного железа (Fe_2O)
- ✓ «ядерное» вещество FeFeO (Fe_2O)
- ✓ Внутреннее ядро состоит из сплава железа с никелем в пропорции $\text{Fe}_{0,9}\text{Ni}_{0,1}$

Физические свойства земных недр

- К физическим свойствам земных недр относят:

- Плотность
- Давление
- Температуру
- Вязкость
- Добротность

Плотность

- Плотность является возрастающей функцией глубины, что определяется сжатием земного вещества под влиянием давления вышележащих слоёв

Изменение плотности в Земле с глубиной

- уравнение Адамса-Вильямсона:

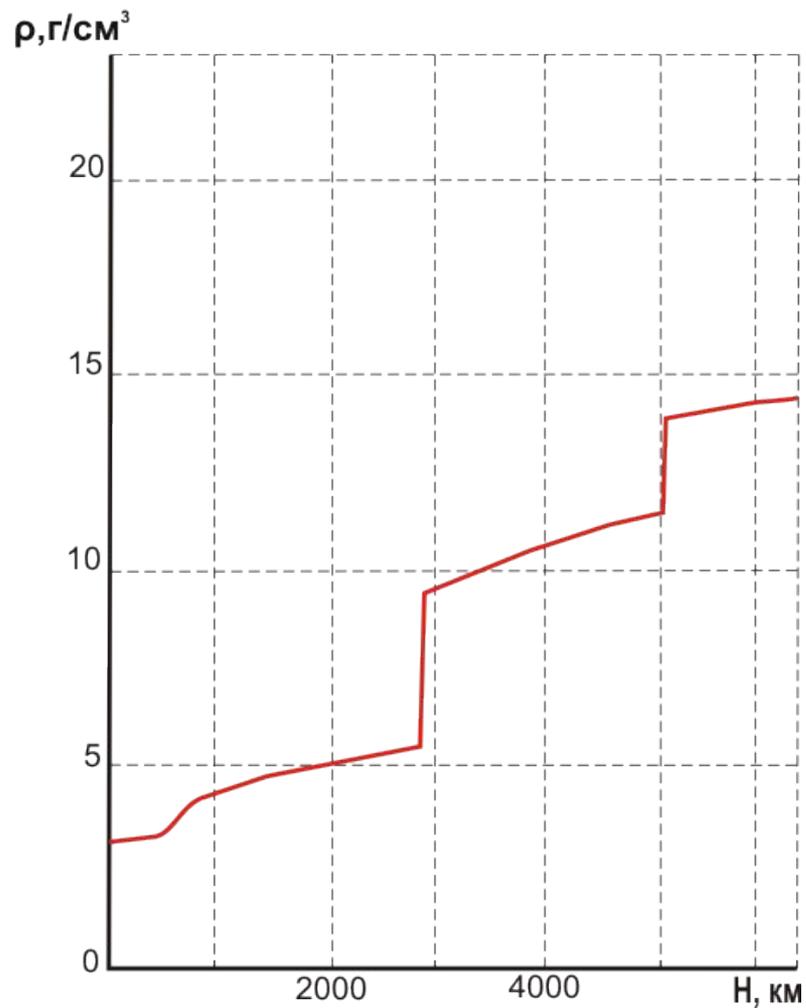
$$\Delta\rho = \frac{\rho g}{\Phi} \Delta l,$$

$\Delta\rho$ – приращение плотности за счёт приращения давления на глубине Δl

g – ускорение силы тяжести;

Φ – сейсмический параметр $\left(\Phi = V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2 \right)$

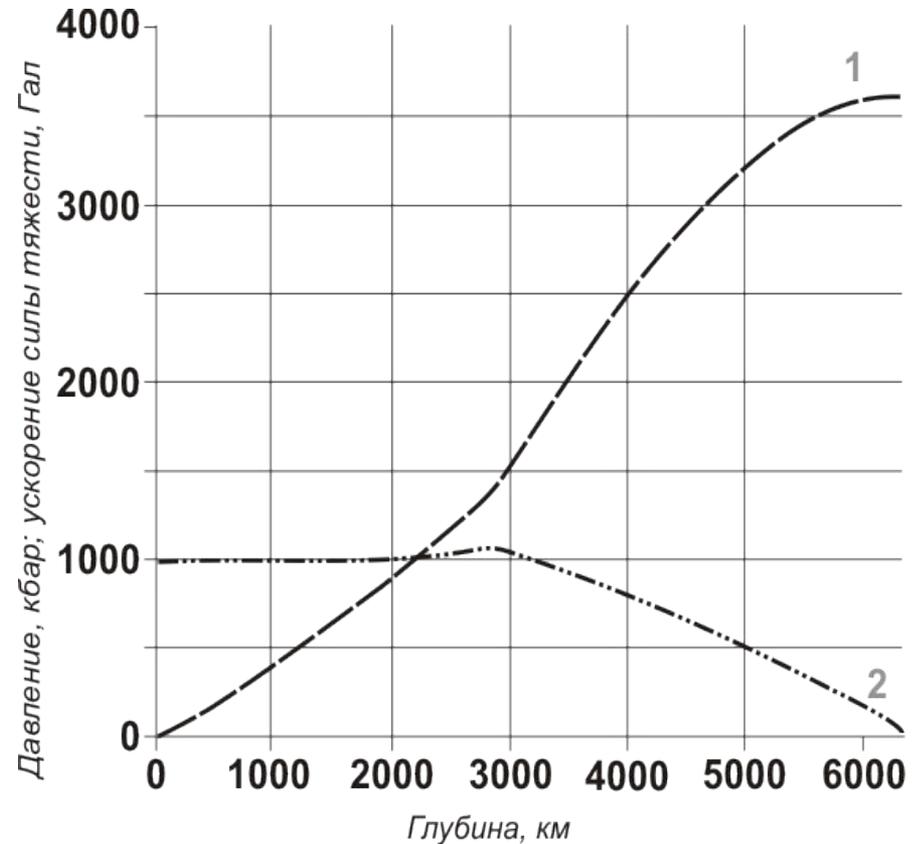
Распределение плотности в недрах Земли (модель Наймарка-Сорохтина)



Давление

- Давление с глубиной возрастанием
- ✓ Наиболее заметный градиент давления граница мантия-ядро (2900 км)
- ❖ на поверхности ядра давление составляет 1,34 Мбар
- ❖ в центре Земли – 3,7 Мбар
- $1 \text{ Мбар} = 10^6 \text{ бар} = 10^{11} \text{ Па}$
($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 10^5 \text{ Н/м}^2$)

Распределение давления (1)
ускорения силы тяжести (2)



Температура

- распределение температуры в недрах (dT/dr) описывается известным термодинамическим соотношением (по В.А.Магницкому):

$$dT / dr = -g\alpha \frac{T}{C_p}$$

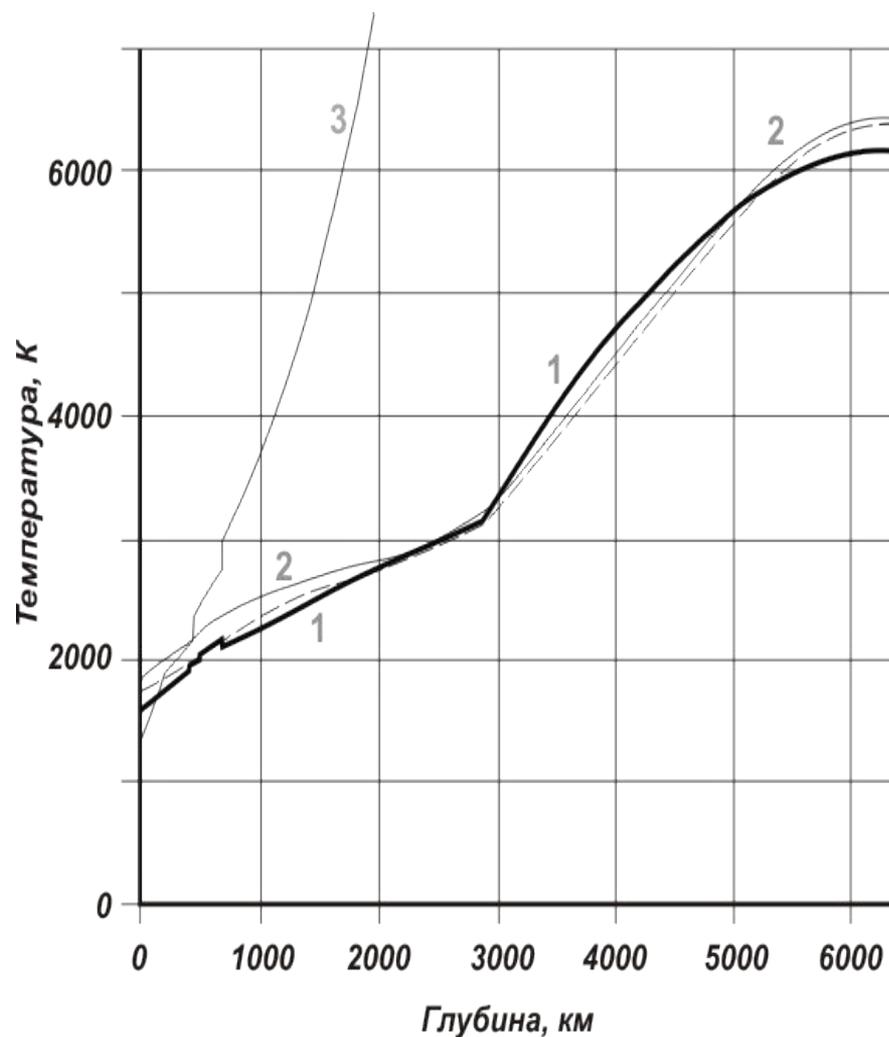
g – ускорение силы тяжести;

α - коэффициент объёмного расширения,

C_p – теплоёмкость при $P=\text{const}$.

- граница мантия – ядро температура достигает $2800 \div 3100^{\circ}\text{K}$
 - в центре Земли -4000°K (по некоторым оценкам до 6140°K)
- ✓ на поверхности ядра температура на 70°K ниже температуры плавления железа и на 30°K выше температуры плавления эвтектического сплава Fe FeO, но во много раз ниже температуры плавления силикатов

Распределение температур в современной Земле (О.Г.Сорохтин, С. А.Ушаков, 2002)

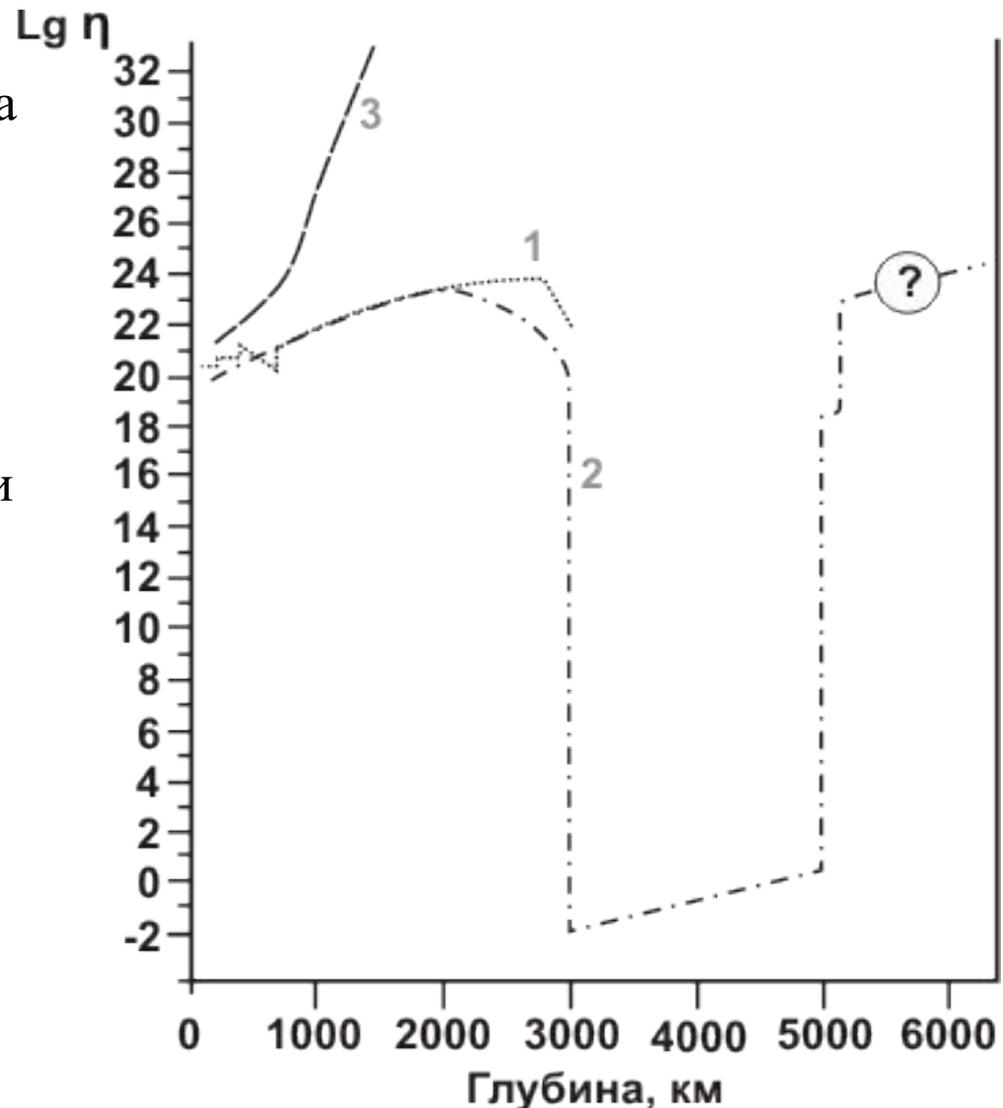


Вязкость

- Вязкость земных недр, является важнейшим физическим параметром, определяющим геодинамику Земли
- ✓ Средняя вязкость мантии оценивается в $3 \cdot 10^{22}$ П
- ✓ Вязкость вещества внешнего ядре Земли, не должна превышать 0,4 П

Распределение вязкости в Земле

- 1 – по модели Ранелли-Фишера при адиабатическом распределении температуры в мантии; 2 – принятое распределение вязкости в Земле; 3 – по модели Ранелли-Фишера при адиабатическом распределении температуры в мантии; 2 – принятое распределение вязкости в Земле; 3 – распределение вязкости в молодой Земле (до начала её дифференциации) (О.Г. Сорохтин, С.А. Ушаков, 2002).



Добротность

- Добротность – это своеобразная мера идеальности упругой среды
- ✓ Добротность (Q_M) характеризует реологические свойства мантии по отношению к сейсмическим колебаниям

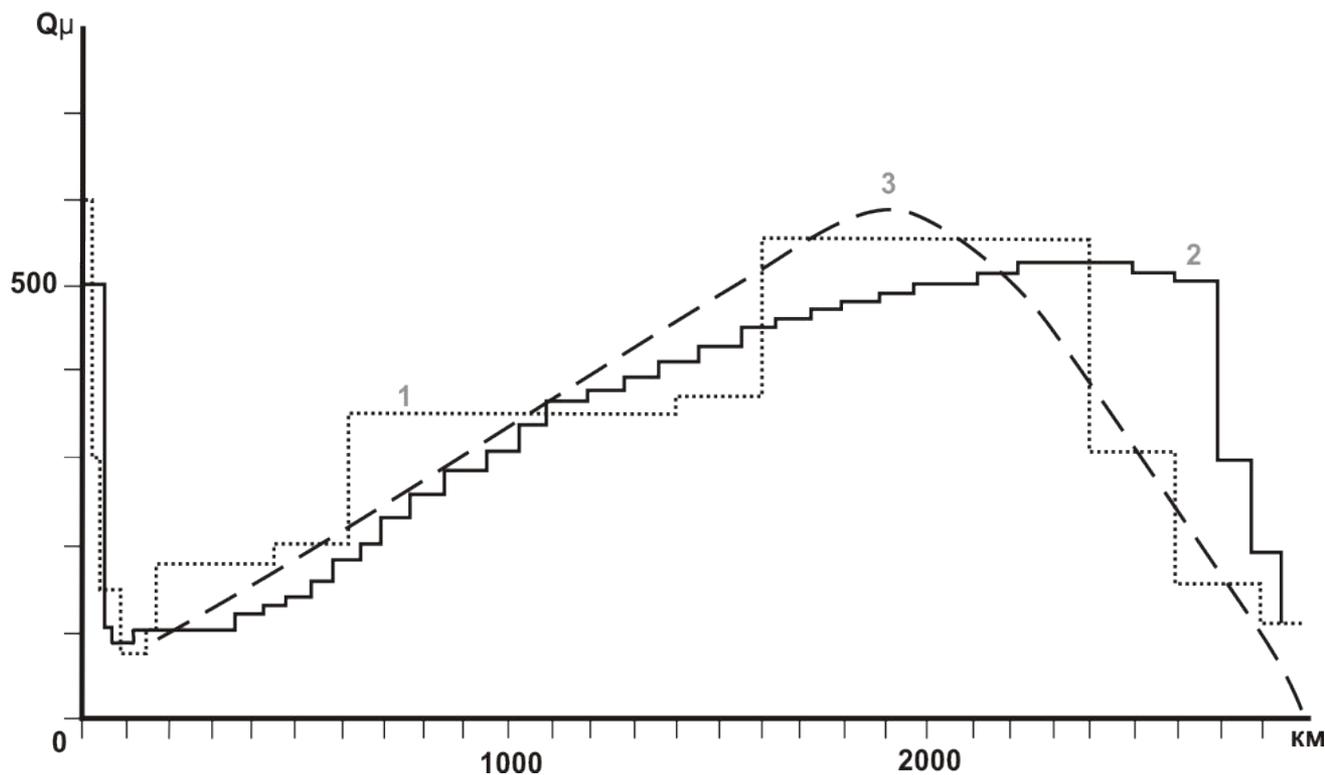
$$\frac{1}{Q_M}$$

эту величину часто называют :

диссипативной функцией

Распределение фактора добротности Q_μ в мантии Земли

максимальная добротность мантии фиксируется на
глубине 1800÷2500 км



□ СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ЗЕМЛИ

При оценке состава и строения первичной (молодой) Земли обычно исходят из современных космогонических представлений о её происхождении из протопланетного газопылевого облака путём холодной аккреции.

Современные представления о происхождении Земли и Солнечной системы

- Считается, что "колыбелью" будущего Солнца и планет Солнечной системы явилось исходное газопылевое протопланетное облако, которое образовалось из межзвёздного газа и скопления железо-силикатной пыли нашей Галактики.

Мнения:

1. Первое предусматривает эволюционный путь развития событий: постепенное сжатие материи под влиянием гравитационных сил и её последующее преобразование в молодые звезды типа Солнца с протопланетным диском вокруг.
(обнаружены молодые звёзды типа Т-Таури с ещё не успевшим рассеяться сгущением газа и пыли)

2. Второй, катастрофический, сценарий эволюции протопланетного облака.

(Доказательством ранних катастроф является нахождение в метеоритах следов распада некоторых из короткоживущих изотопов таких элементов, как Pu, Al)

Происхождение вещества протопланетных облаков объясняется взрывами крупных звёзд, масса которых многократно превышала массу Солнца

- *Первичное протопланетное облако* – прародитель будущей Солнечной системы было, вероятно, довольно однообразным по составу и слабо дифференцированным.
- Образование газопылевых облаков обычно происходит за счёт сгущения преимущественно атомов водорода. (Установлено, что плотность газа в Галактике в межзвёздном пространстве составляет примерно 0,1 атома водорода в 1 см³, тогда как в подобных газопылевых облаках плотность достигает 1000 атомов водорода на 1 см³.)

- **Самопроизвольное гравитационное сжатие облака**

Самопроизвольное гравитационное сжатие облака – *коллапс* приводит к образованию сгущения, включающего до 99% всей массы первичного облака.

Одновременно возрастает его внутренняя температура.

Тепловое движение атомов становится всё быстрее, и при столкновении друг с другом они обнаруживают тенденцию к слиянию. Возникают термоядерные реакции, общим результатом которых является превращение водорода в гелий и выделение огромного количества энергии.

В результате термоядерного взрыва и возникло Протосолнце.

- Протопланетное облако с течением времени постепенно теряло энергию в результате столкновения "пылинок" (метеоритных частиц), происходило его уплощение, движение вещества упорядочивалось, становилось более правильным, близким к круговому. Постепенно вокруг молодого Солнца в результате конденсации пылевидного вещества образовался широкий кольцеобразный диск, который в дальнейшем распался на холодные рои твёрдых частиц и газа. Из внутренних частей газопылевого диска возникли планеты типа Земля, состоящие в основном из тугоплавких элементов.

- Чем дальше от Солнца планета, тем она менее плотная. Так средняя плотность Меркурия – 5,54 г/см³; Венеры – 5,24; Земли вместе с Луной – 5,49; Марса – 3,94; Юпитера – 1,33; Сатурна – 0,67; Урана – 1,3; Нептуна – 1,67 г/см³. Этим же объясняют сравнительно малый удельный вес атмосферы и гидросферы на Земле – всего $2,4 \cdot 10^{-4}\%$ от массы планеты.

Дальнейшая эволюция будущих планет

- Дальнейшая эволюция будущих планет происходила, по мнению советского академика А.П.Виноградова, путём собирания, - аккреции космического вещества различного размера от пылевидных частиц до огромных космических тел, получивших название *планетозималей*.
- Расчёты В.С.Сафронова показывают, что рост Протоземли и её превращение в планету продолжался не менее 100 млн. лет и проходил вначале в ускоренном режиме аккреции (быстрая аккреция), а затем, по мере исчерпания запасов твёрдого вещества в околоземном рое, замедлился. Процесс аккреции продолжается и поныне. Исследования отечественных учёных А.В.Иванова и К.П.Флоренского показали, что сейчас ежегодно на Землю выпадает $2 \div 5 \cdot 10^6$ т космического вещества в виде чёрных магнитных шариков и мелкодисперсного материала.

Аккреция протопланет проходит по двум основным сценариям

- *Гомогенная аккреция*

предусматривает образование планет из однородного, недифференцированного вещества, поэтому и планеты в момент своего «рождения» представляют недифференцированные тела.

- *Гетерогенная аккреция* допускает вначале образование ядра Земли в результате слипания железистых частиц и метеоритов, затем формирование вокруг него мантии за счёт падения каменных метеоритов, а далее и земной коры, которая по составу близка к углистым хондритам.

- Конечным результатом преобразования протопланетного облака явилось оформление **Солнечной системы с Солнцем** в её центре и протопланетами, в том числе и Протоземлей. Аккреционные процессы приводили не только к уплотнению Протоземли, но и к её первичному нагреву, что также способствовало уплотнению вещества.

ВЫВОД

- "Рождение" Земли, как планеты Солнечной системы, произошло порядка **4,6 млрд.** лет назад. В соответствии с принятой нами моделью гомогенной аккреции, вначале она представляла собой относительно холодное, практически не дифференцированное космическое тело.

Состав первичной Земли

- Определяется на основе следующих данных:
 1. теоретический расчёт *среднего состава* Земли по главным породообразующим *оксидам* и элементам, состав *метеоритов* и состав древних земных пород, образование которых происходило до того, как вещество Земли прошло значительную дифференциацию.

- Одним из первых, кто теоретически путём подсчётов среднего содержания элементов определил исходное вещество Земли был отечественный учёный-геохимик, академик А.Е. Ферсман. Он считал, что в составе вещества нашей планеты содержится 37÷40% железа, 27÷28% кислорода, 14,5% кремния, 8÷11% магния и около 3% никеля. Остальные элементы играют незначительную роль в составе земного материала.

Состав современной мантии и первичного вещества Земли

(О.Г.Сорохтин, С.А.Ушаков, 1991).

Оксиды	Состав современной мантии		Расчетный состав первичного вещества Земли по лерцолитовой модели	Средний состав углистых хондритов
	Пиролитовая модель (Ringwood, 1966)	Лерцолитовая модель (Дмитриев, 1973)		
SiO ₂	45,16	45,7	31,11	33,0
TiO ₂	0,71	0,2	0,14	0,11
Al ₂ O ₃	3,54	3,7	2,56	2,53
Fe ₂ O ₃	0,46	8,2	-	-
FeO	8,04		23,81	22,0
MnO	0,14	0,1	0,07	0,24
MgO	37,49	38,4	26,14	23,0
CaO	3,08	2,3	1,57	2,32
Na ₂ O	0,57	0,3	0,16	0,72
K ₂ O	0,13	0,1	0,02	-
Cr ₂ O ₃	0,43	0,4	0,27	0,49
P ₂ O ₅	-	-	-	0,38
NiO	0,20	0,1	0,07	-
FeS	-	-	0,55	13,6
Fe	-	-	13,21	-
Ni	-	-	0,20	-
<i>Сумма</i>	99,95	99,5	99,88	98,39

Строение первичной Земли

- две точки зрения :
 1. молодая Земля была довольно быстро расслоена на ядро, мантию и кору
 2. доказывает первоначальную гомогенность земного вещества, а его дифференциация происходила на протяжении всей геологической истории планеты и этот процесс продолжается до сих пор

В соответствии с представлениями О.Г.Сорохина и С.А. Ушакова (1991, 2002), строение первичной Земли выводится исходя из её первоначальной химической однородности, а также из лабораторных данных по ударному сжатию силикатов, железа и его оксидов.

Глубина, км	Современная Земля		Первичная Земля	
	ρ , г/см ³	Т.К.	ρ , г/см ³	Т.К.
0	3,30	288	3,91	255
200	3,47	1670	4,18	1320
400	3,64	1800	4,44	1500
400	3,80	1890	4,66	1610
650	4,04	2020	4,96	1610
650	4,20	2110	5,06	-
900	4,44	2220	5,25	1600
900	4,52	2270	5,32	-
1000	4,60	2300	5,40	1580
1400	4,83	2440	5,69	1490
1800	5,05	2550	5,93	1390
2200	5,26	2650	6,15	1290
2600	5,46	2750	6,35	1190
2900	5,60	2820	6,48	1120
2900	9,48	-	-	-
3000	9,67	2900	6,52	1110
3500	10,27	3180	6,70	990
4000	10,76	3410	6,84	900
4500	11,12	3590	6,97	860
5000	11,42	3720	7,07	820
5120	11,48	3740	7,09	815
5120	13,86	-	-	-
5500	14,11	3810	7,13	800
6000	14,30	3870	7,17	790
6371	14,38	3880	7,18	780

**Распределение плотности в современной и первичной Земле
(Сорохин, Ушаков, 1991г.)**

□ Поверхностные слои нашей планеты практически в течение всего периода её формирования состояли из мелкопористого реголита, постоянно возникавшего за счёт оседания тонкодисперсной пыли и испарявшегося при ударных взрывах вещества, падавших на Землю планетозималей.

представления В.С.Сафронова

- Процесс формирования Земли за счёт механизма аккреции происходил на протяжении не менее 100 млн. лет и поэтому её недра вначале повсеместно оставались холоднее температуры плавления земного вещества. Максимальная температура первичной Земли до ~ 1600 К достигалась на глубинах в пределах 1000 км, а к центру она вновь снижалась до ~ 800 К

суждения по поводу нагрева первичной Земли

- ✓ Допускается, что уже в самой начальной стадии развития наша планета за счёт аккреционных процессов могла быть раскалена вплоть до образования «магматического океана» на поверхности.

По материалам учёных Стэнфордского
Университета (США)
(2004г.)

- ✓ Находка древних кораллов возрастом 3,4 млрд. лет. Установлено, что древние водные бассейны существовали уже в интервале $3,8 \div 4,2 \cdot 10^9$ лет. Наличие акваторий на поверхности Земли в тот период её жизни не соотносится с представлениями о раннем частичном плавлении вещества нашей планеты. Поэтому «холодная» модель молодой Земли представляется более правдоподобной.

ВЫВОДЫ:

- первичная Земля не имела ни гидросферы, ни настоящей атмосферы. В те периоды молодая Земля могла обладать лишь разряженной атмосферой из благородных газов, может быть только со следами азота, а суммарное давление такой примитивной атмосферы не превышало $(1,5 \div 2) \cdot 10^{-5}$ атм. или $(0,011 \div 0,015)$ мм ртутного столба (О. Г.Сорохтин, С.А.Ушаков, 1991).
- ландшафт молодой Земли напоминал суровую и холодную пустыню с чёрным небом и слабо греющим Солнцем. Напротив, Луна, которая в то время была гораздо ближе к Земле, ещё не успела остыть и излучала свою тепловую энергию в красной и инфракрасной частях спектра, заметно обогревая земную поверхность.

Энергетический баланс Земли

Тектоническая активность Земли напрямую зависит от её внутренней энергии.

Современная Земля - температура недр с глубиной растёт

- ✓ в верхней мантии составляет до $1300\div 1350^{\circ}\text{C}$
 - ✓ на поверхности ядра находится в пределах 3000°C
 - ✓ в центре ядра может достигать более 4000°C .
- Через земную поверхность теряется до $10,3 \cdot 10^{12}$ кал/с тепла. По расчётам В.Н.Жаркова за всю геологическую историю Земля потеряла порядка $1,1\div 4 \cdot 10^{30}$ кал, остыв при этом примерно на 800°C .

Основные источники энергии нашей планеты

- ✓ энергия аккреции
- ✓ энергия гравитационной дифференциации
- ✓ энергия радиоактивного распада
- ✓ энергия приливного трения
 - солнечная энергия определяет течение экзогенных явлений

Энергия аккреции

- **Аккреция** «приращение, увеличение» — процесс падения вещества на космическое тело из окружающего пространства.

Следовательно, и основная часть этой энергии проявлялась на догеологической стадии эволюции до момента возникновения Земли, как планеты.

- Энергию аккреции можно отождествить с некой работой, которую необходимо затратить для того, чтобы удалить всё вещество Земли на бесконечность, т.е. с потенциальной энергией планеты (U). её можно определить либо по распределению плотности с глубиной первичного земного вещества $\rho(r)$, либо по распределению давления $P(r)$:

$$U = -4\pi Gm \int_0^R m(r)\rho(r)rdr \quad - \text{ по распределению плотности,}$$

$$U = -12\pi \int_0^R P(r)r^2 dr \quad - \text{ по распределению давления.}$$

$m(r)$ - масса земных недр, заключённых в сфере радиусом r ;

$\rho(r)$ - плотность земного вещества на уровне r ;

$P(r)$ - давление на уровне r ;

G - гравитационная постоянная;

R - радиус современной Земли.

- Энергия аккреции (E_a) равна потенциальной энергии первичной Земли ($U_{4,6}$) взятой с обратными знаками:

$$E_a = -U_{4,6}$$

По расчётам О.Г.Сорохтина, численно

$$E_a = 23,24 \cdot 10^{38} \text{ эрг.}$$

$$1 \text{ эрг.} = 10^{-7} \text{ Дж}$$

- По оценке О.Г.Сорохтина теплопотери Земли в процессе её образования составили порядка $19,29 \cdot 10^{38}$ эрг. В то время средний тепловой поток через поверхность Земли примерно в 1500 раз превышал современный. Поэтому первичный нагрев Земли был не столь велик. Кроме того, значительная часть энергии аккреции выделялась в догеологическое время, когда ещё Земля в полной мере не оформилась в планету

Энергия гравитационной дифференциации

- Энергия гравитационной дифференциации (E_g) является главным источником эндогенной энергии на планетной (геологической) стадии развития Земли.

$$E_g = U_1 - U_2$$

разность потенциальных энергий
первичной (однородной) Земли
(U_1) и современной
(расслоенной) Земли (U_2)

Современное понимание процесса гравитационной дифференциации

- I. Традиционный уровень – это граница мантия-ядро. Рост ядра должен сопровождаться «выталкиванием» лёгких примесей (кислород, сера, кремний и др.) во внешнее ядро.
- II. Другим уровнем дифференциации может быть граница нижней и средней мантии, поскольку первая существенно более обогащена железом, т.е. между мантийными геосферами существует различие в химическом составе.
- III. Ещё один возможный уровень гравитационной дифференциации – это раздел астеносферы и литосферы.

Энергия радиоактивного распада

- За геологическую историю Земли в её недрах выделялось минимум в 4÷5 раз больше энергии, чем радиогенного тепла. Кроме того, выяснилось, что основные наиболее энергоёмкие и долгоживущие изотопы, полураспад которых соизмерим с возрастом Земли (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K), относятся к литофильным элементам.

- В настоящее время основная доля радиоактивных элементов сконцентрирована именно в земной коре, преимущественно в её "гранитном" слое (примерно 83,5% урана, 90,6% тория и 48,6% калия). На это указывает низкое выделение гелия (продукта радиоактивного распада) в океанах: всего 5% от того количества, которое должно было бы наблюдаться, если бы тепловой поток порождался радиоактивным распадом.

- Для выявления роли радиогенной энергии в термике Земли следует учитывать лишь ту энергию, которая выделяется в мантии.
- Исходя из закона распада радиоактивных элементов:

$$N_0 = N_t \cdot e^{\lambda t}$$

N_0 - первоначальное число атомов радиоактивных элементов,

N_t - число атомов по истечении времени t ,

λ – постоянная радиоактивного распада.

По оценке О.Г.Сорохтина и С.А. Ушакова

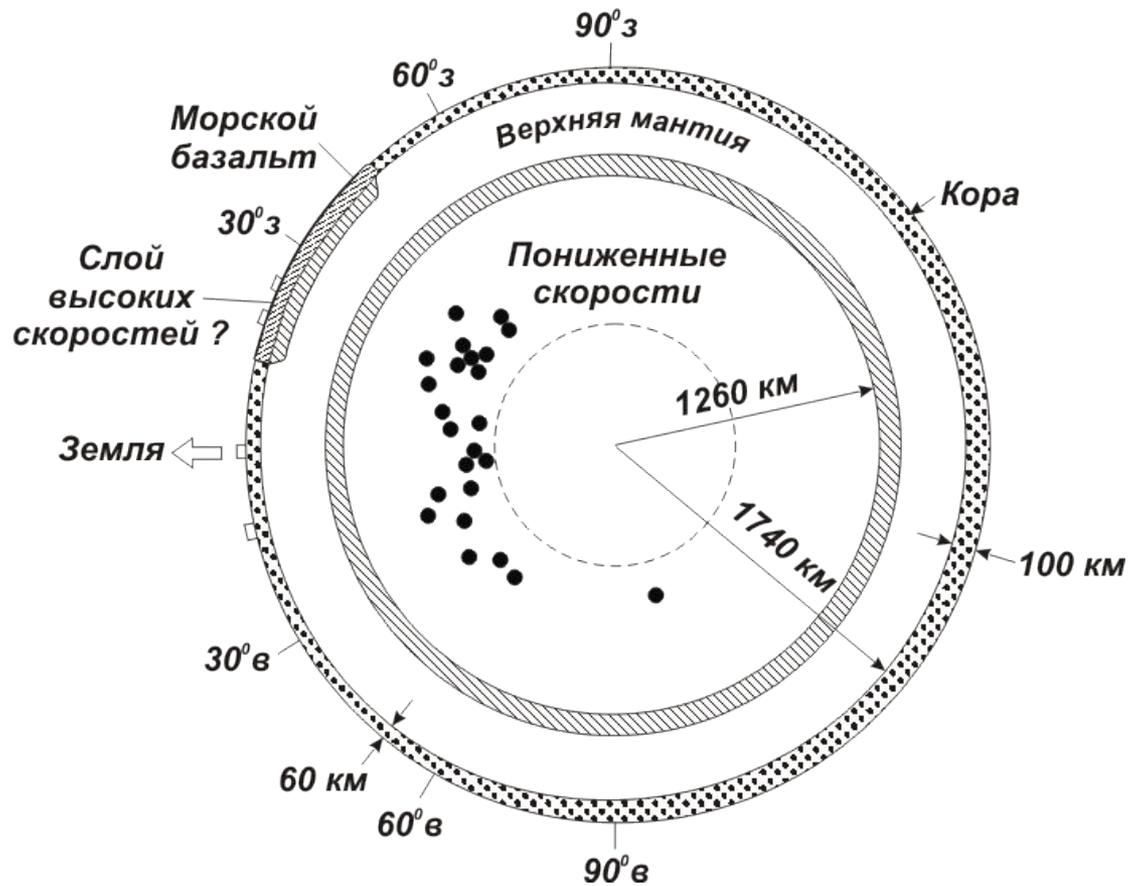
- В настоящее время в мантии выделяется не более $0,337 \cdot 10^{20}$ эрг/с радиогенной энергии, что составляет менее 4,7% от начального уровня и 8% от суммарных теплопотерь современной Земли.
- Считается, что в первые $1,5 \cdot 10^9$ лет скорость выделения радиогенной энергии была в 5÷6 раз больше, чем в настоящее время.

Энергия приливного трения

- Взаимодействие Земли и Луны приводит к возникновению приливных деформаций, проявляющихся в твёрдой Земле в виде приливных вздутий (горбов), а в гидросфере - в виде приливов и отливов.
- В соответствии с исследованиями Г.И. Макдональда, С.К.Рускола, Х.Герстенкорна и других, Луна в далёком геологическом прошлом была гораздо ближе к Земле и, следовательно, могла оказывать на неё неизмеримо большее влияние.

Строение и состав Луны

- Луна покрыта анортозитовой корой толщиной от 60 до 100 км
- верхняя мантия мощностью порядка 400 км. (состав - пироксен-оливин)
- средняя мантия Луны, интервал глубины 450÷1100 км
- нижняя мантия глубина 1100 км (лунная астеносфера) вещество недр находится в состоянии близком к температуре плавления (~1500 ÷ 1600°C), её рассматривают как лунную литосферу, мощность 1100 км.



Схематическое изображение экваториального сечения лунных недр (по В.Н. Жаркову, 1983).

Кора затенена точками. Переходная зона из верхней в среднюю мантию заштрихована. Зона повышенного затухания находится внутри окружности, изображенной прерывистой линией. Показаны только очаги глубокофокусных лунотрясений (черные кружки), квадратиками обозначены места установки сейсмометров.

- Ядро у Луны практически отсутствует
учёные из Техаса предполагают, что в центре Луны всё же присутствует небольшое ядро, размером в 170÷360 км.

□ *Химический состав Луны*

- Земля и Луна образовались в одной зоне первичного протопланетного газопылевого облака
- Лунные породы сильно обеднены сидерофильными элементами (Fe, Cu, Ni, Co,), лишены следов воды и лёгких летучих соединений углерода и серы.
- Луна содержит лишь 13÷14% тяжёлой фракции (главным образом Fe и FeO)

- малое содержание в лунных породах первичного свинца (^{204}Pb), образован за счёт распада урана и тория - это ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb и др.
- В период времени от $4,6 \cdot 10^9$ до $3,2 \cdot 10^9$ лет породы Луны подвергались воздействию сильного магнитного поля, т.е. сразу же после своего образования и до момента $3,2 \cdot 10^9$ лет (последний этап активного вулканизма на Луне) планета обладала ощутимым магнитным полем

Выводов, которые положены в основу гипотезы Протолуны:

- ✓ Луна образовалась из единого с Землей исходного газопылевого облака, что обусловило более или менее одинаковый изначальный химический состав этих планет.
- ✓ В отличие от Земли, Луна практически сразу же после своего образования испытала сильный нагрев, приведший к полному её расплавлению и к гравитационной дифференциации (т.е. разделению на кору, силикатную мантию и железное ядро) уже на ранней стадии эволюции.

- ✓ На начальной стадии своего развития ($4,6 \cdot 10^9 \div 3,2 \cdot 10^9$ лет) Луна представляла собой горячее, полностью дифференцированное космическое тело, с явным дипольным магнитным полем.
- ✓ В дальнейшем Луна каким-то образом утратила железное ядро, сохранив в своём строении практически лишь мантийную часть изначальной Луны, т.е. Протолуны. Последнюю планету можно рассматривать как материнскую по отношению к современному естественному спутнику Земли.

Современное представление о происхождении Луны

(четыре основные точки зрения)

- ❖ Луна возникла одновременно с Землей из одного и того же материнского газопылевого облака.
- ❖ Луна образовалась далеко от Земли, совершенно в другом районе первичной небулы.
- ❖ Луна оторвалась от Земли на ранней стадии её истории, когда Земля была расплавленной и быстро вращалась.
- ❖ Луна откололась от Земли за счёт косого удара (импакта) крупного метеорита размером примерно с Марс. Идея была выдвинута американскими учёными У.Хартманом и Д. Дэвисом в 1975 г.

Гипотеза Протолуны

- ❑ Гипотеза Протолуны исходит из того, что современная Луна является остатком некой более крупной планеты – Протолуны
- ❑ Допускается, что Протолуна, как и Протоземля, образовалась примерно в **одном районе материнского газопылевого облака.**
- ❑ Перейдя на околоземную орбиту, Луна подверглась **воздействию мощных приливных деформаций.**

- ❑ Считается, что период времени от момента захвата Протолуны до её перехода на круговую (геоцентрическую) орбиту был незначителен — около 10 тыс. лет.
- ❑ Протоземля также ощутила мощное приливное воздействие за счёт обретённого спутника. Это выразилось в дополнительном **нагреве земных недр** и в увеличении угловой скорости её вращения.

□ Эволюция системы Протоземля – Протолуна шла в сторону приближения спутника к центральной планете

- расстояния до центральной планеты, известного как предел Роша (L_R), приливные силы, действующие на спутник, становятся больше сил его самогравитации.
- Предел Роша – это наименьшее расстояние между спутником и центральной планетой, ближе которого спутник начинает разрушаться гравитационным полем планеты.

Предел Роша (L_R)

$$L_R \approx 2.44 \cdot \left(\frac{\overline{\rho_0}}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{3}} R_0$$

Предел Роша зависит от средних значений

плотности центральной планеты (ρ_0) и спутника (ρ_s) и задаётся выражением Х. Альвена и Г.

Арениуса R_0 – радиус центральной планеты.

- Погружение Протолуны в зону Роша происходило довольно быстро. По оценке О.Г.Сорохтина, скорость этого процесса составляла $0,4 \div 0,16$ см/с или $34 \div 50$ км в год. Это означает, что за каждый оборот вокруг Протоземли Протолуна на $24 \div 35$ м входила в сферу Роша.

- гравитационные силы Протоземли, преодолев самогравитацию своего спутника, вырвали железное ядро Протолуны, которое в виде мелких осколков и брызг устремилось к центральной планете, образовав на какое-то время кольца вращавшихся метеоритных тел, наподобие колец Сатурна
- За счёт выпадения осколков железного ядра Протолуны, Протоземля несколько увеличила свою массу и угловую скорость вращения, превратившись в современную планету Земля.

Энергетический баланс Земли

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- величина теплогенерации в земных недрах на геологической стадии развития составляет $2,22 \cdot 10^{38}$ эрг тепловой энергии.
- энергетический баланс Земли (ΣE) можно записать в виде:

$$\Sigma E = E_g + E_t + E_R - Q - E_{ТМП}$$

Q – суммарный тепловой поток через земную поверхность (теплопотери Земли),

$E_{ТМП}$ – энергия тектономагматических процессов.

- Суммарные теплопотери Земли в течение её геологической истории за счёт теплового излучения О.Г. Сорохтин оценивает как $(1 \div 1,3) \cdot 10^{38}$ эрг.
- Энергия тектономагматических процессов, развивавшихся на поверхности Земли, складывается из выплавления континентальной коры, деформации литосферных плит в зонах субдукции и излияния базальтовых лав в рифтовых зонах Мирового океана (т.е. формирования океанической коры). По оценке О.Г.Сорохтина, за всю геологическую историю Земли на тектономагматические процессы было затрачено $0,04 \cdot 10^{38}$ эрг.
- ❖ Примерно через $1,5 \div 2 \cdot 10^9$ лет процесс расслоения земных недр завершится и теплопотери Земли значительно превысят уровень генерации земного тепла. Земля постепенно остынет, наступит «тепловая смерть» планеты, а с нею практически прекратятся и тектономагматические процессы.

Реология

□ Реология (рео - с лат. теку) - наука о текучести вещества

- Ньютоновская жидкость - это такое вещество, в котором необратимые деформации начинаются при сколь угодно слабых напряжениях.

(распространяться только продольные волны со скоростью)

$$V_p = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

- ***временя релаксации (t_p)***

для ньютоновской жидкости равно отношению вязкости (η) к модулю сдвига (μ)

$$t_p = \frac{\eta}{\mu}$$

- ***максвелловское реологическое тело***

среда, которая в относительно короткие периоды времени ведёт себя как твёрдое тело, а в относительно длительные - как жидкость

- ***Вязкоупругая среда***

среда, которая в течение относительно коротких интервалов времени проявляет упругие свойства, а в относительно длинных – вязкие

- ***Твердотелой ползучестью***

Способность кристаллических тел при определённых условиях к пластическому течению

- По мере роста температуры происходит увеличение амплитуды (X) и скорости (V) колебания атома около своего узельного положения, которые связаны между собой зависимостью

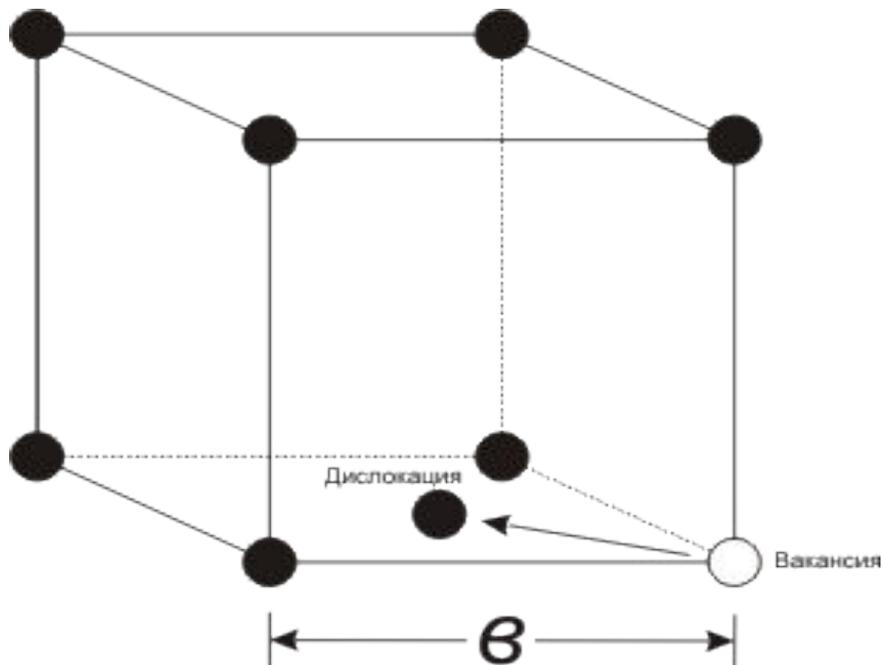
$$V = \frac{2\pi}{\tau} X$$

τ - период колебания атома (эйнштейновский период), $\tau = 2\pi (m/k)^{1/2}$

m - масса атома

k - мера межатомных восстанавливающих сил

Условный кристалл с вакансией и дислокацией.



a – период решетки, стрелкой показано направление движения атома.

- По *Я.М.Френкелю* дефект кристалла
- ✓ пара невзаимодействующих частиц: дислокации (межузельный атом) и вакансии, которая ведёт себя как квазичастица.

- *В.Шоттки* ввёл понятие о дислокационных дефектах в кристаллах.
- ✓ В этом случае источником дефекта является напряжение (давление), а атом или ион, покинув свой узел, располагается не в межузельном пространстве, а на поверхности кристалла или трещины

- потенциальный барьер (H):

$$H = \frac{1}{2} K b^2$$

- b - период решётки,
- K - мера мощности восстанавливающих сил.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РЕОЛОГИИ:

- Земные недра в реологическом смысле можно трактовать как вязкоупругое тело, которое при определённых условиях ведёт себя как упругая среда, а при других условиях – как вязкая.
- В мантии Земли, несмотря на её высокую вязкость, возможно течение вещества в геологических масштабах времени. Процесс происходит на атомном уровне путём диффузии, скольжения и переползания дислокаций.
- Возможность вязкопластичных деформаций и течения вещества в мантии подтверждается наблюдениями за изостатическими компенсационными процессами и данными лабораторных исследований минералов мантии, в первую очередь оливина.

ГЕОДИНАМИКА ЯДРА

□ Формирование земного ядра

- ❖ Происхождение земного ядра имеет две основные точки зрения:
- ✓ ядро могло образоваться уже во время гетерогенной аккреции;
- ✓ ядро возникло позже «рождения» самой Земли в результате последующей дифференциации земного вещества.

Установлено:

1. первичная Земля ($4,6 \cdot 10^9$ лет назад) представляла собой гомогенное, практически недифференцированное тело, относительно холодное, т.е. температура в его недрах тогда не превышала температуры плавления первичного вещества Земли;
2. состав первичного земного материала отличался высоким содержанием железа ($\sim 13\%$) и оксида железа ($\sim 24\%$).

Это означает, что в первичной Земле не было "железного" ядра, как у современной.

Механизмы выделения земного ядра

□ Две точки зрения:

1. **раннее выделение ядра**, т.е. практически сразу же после образования Земли.
2. **позднее**, спустя сотни миллионов лет после возникновения планеты.

❖ Раннее выделение ядра:

выделение ядра могло начаться уже на протопланетной стадии Земли и завершится вскоре после её образования.

процесс «стекания» капель железосодержащих соединений и чистого железа (т.е. "ядерного" вещества) из мантии в центральные сферы нашей планеты (механизм перколяции)

- Седиментационное расслоение Земли могло происходить либо в её твёрдом состоянии, либо в жидком.

Время седиментационного расслоения (t_c) можно оценить как

$$t_c = \frac{H_m}{V_c}$$

H_m - толщина мантии,
 V_c - скорость седиментации.

- Скорость седиментации находится из уравнения **Стокса**:

$$V_c = \frac{2r^2 g \Delta\rho}{9\eta_m}$$

r - радиус плотностной неоднородности ("капли"),

g - ускорение силы тяжести,

$\Delta\rho$ - разность плотности "ядерного" вещества и средней плотности вещества молодой Земли;

η - вязкость первичного земного материала (для облегчения задачи примем его равной средней вязкости современной мантии, т.е. $\eta_m = 10^{23}$ П).

Заключение

- ❖ выделение ядра должно было бы происходить **без плавления силикатного вещества мантии** и спустя сравнительно большой отрезок времени (примерно 600 млн. лет) после возникновения Земли.
- ❖ исследователи А.С.Монина, О.Г.Сорохтина, С.А. Ушакова и др., считают, что выделение и формирование земного ядра **происходило постепенно без плавления силикатов**. Процесс начался не ранее $4 \cdot 10^9$ лет назад в результате повышения температуры земных недр до начала плавления железа и оксидов железа.

Начальный этап выделения земного ядра

- Повышение температуры недр нашей планеты произошло за счёт взаимодействия Протоземли и Протолуны.

Именно приливные деформации нагрели недра Земли до температуры плавления наиболее легкоплавких элементов первичного и гомогенного земного вещества.

- ✓ Разогрев Земли был неравномерным, в основном он происходил в экваториальном поясе Земли и захватывал глубины до 1000 км. Плавление легкоплавких компонентов.

Развитие процесса зонной дифференциации земного вещества

- ❖ на рубеже $4,0 \div 3,6 \cdot 10^9$ л (начало архея) в экваториальном поясе Земли в результате постепенного повышения температуры под действием приливных деформаций, стали возникать железистые расплавы на глубинах $200 \div 400$ км, которые сформировали первые железистые астеносферы нашей планеты. Их появление означало начало процесса гравитационной дифференциации Земли.

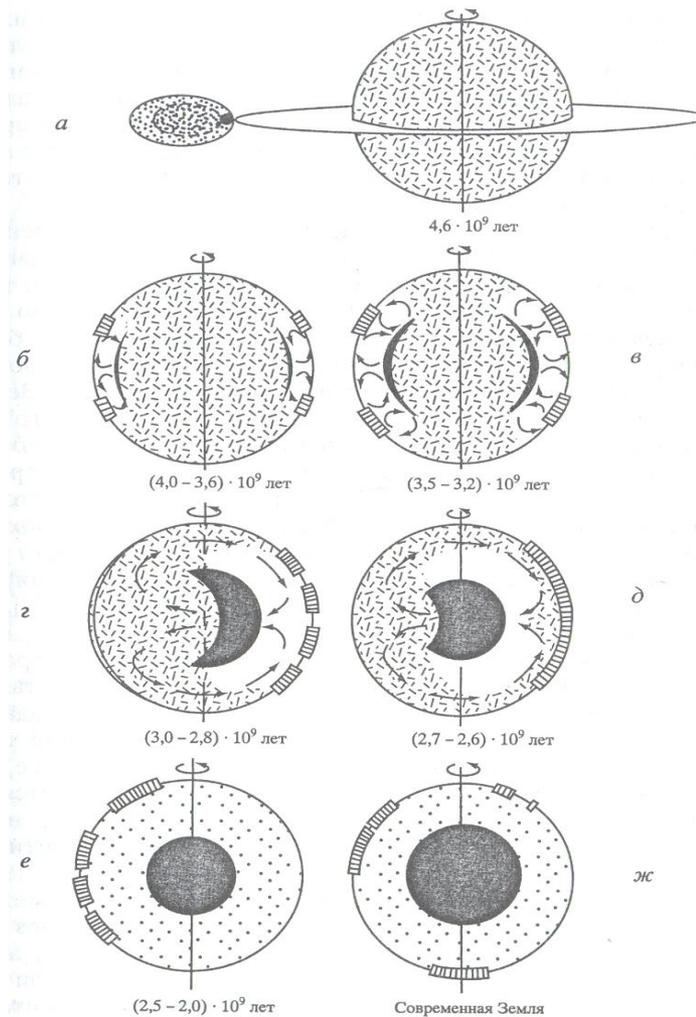
- ✓ Плавление оксидов железа и чистого железа и начавшаяся вслед за этим дифференциация вещества земных недр привели к дополнительному высвобождению гравитационной энергии, которая тратилась на прогрев земного вещества и на энергетическую поддержку самого процесса зонной дифференциации.
- ✓ Всё это приводило к тому, что мантия продолжала перегреваться и в ней могла возникнуть тепловая конвекция.

- к концу **архея** мощность и масса экваториального (кольцевого) астеносферного пояса достигла некоего критического значения, что привело к возникновению ситуации **гравитационной неустойчивости** в недрах Земли. Действительно, мощный слой тяжёлых железистых расплавов с плотностью более $8\div 10$ г/см³ в виде кольцевых экваториальных зон располагался над первозданным (недифференцированным) и сравнительно холодным земным веществом с плотностью в пределах $5\div 7$ г/см³

- прорыв тяжёлых расплавов в центр Земли и выжиманием недифференцированной сердцевины в экваториальную зону одного из полушарий планеты, что, по-видимому, и произошло в конце архейской эры ($2,7 \div 2,6 \cdot 10^9$ лет назад). Процесс, продолжавшийся порядка 10^8 лет, сопровождался выделением огромной энергии.
- Дополнительный разогрев земных недр стимулировал процесс выделения ядра, который протекал катастрофически быстро в геологическом масштабе времени.

- проявление в конце **архея** одной из мощнейших в геологической истории Земли кеноранской тектономагматической эпохи.
- ✓ Кеноранская (беломорская) эпоха ($\sim 2,6 \cdot 10^9$ лет) характеризовалась мощными энергоёмкими процессами выплавления континентальной коры, появлением первых устойчивых её участков — эпиархейских ядер.
- ✓ Возник первый в истории Земли суперконтинент, получивший название Моногеи или Пангеи-0
 - На этом завершается первый этап дифференциации земного вещества, т.е. разделение его на ядро и мантию

Последовательные этапы развития процесса зонной дифференциации земного вещества и формирования ядра Земли (О.Г.Сорохтин, 2006).



Эволюция ядра Земли

- ❖ механизмов выделения "ядерного" вещества из мантии

механизм бародиффузии

- распад твёрдых растворов под влиянием высоких давлений, диффузии железа и его оксидов из кристаллических решеток железосодержащих силикатов мантии в межгранулярные пространства.

А.С.Мониным и О.Г.Сорохтиным (1981 г.)

принцип Ле-Шателье

- внешнее воздействие, выводящее систему из термодинамического равновесия вызывает в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия.
- ✓ Распад твёрдых растворов будет происходить в результате снижения под влиянием давления растворимости компонентов в данной среде.

В.А.Киркинского (1975) показали, что смесимость компонентов с разной кристаллической структурой резко падает при повышении давления.

□ законом распада жидких растворов:

$$C_i^* = C_{oi} \exp\left(-\frac{P\Delta V_i}{KT}\right)$$

C_i^* - предельная концентрация i -го компонента в насыщенном растворе при давлении P и температуре T ;

C_{oi} - предельная концентрация этого же компонента при $P=0$;

– объемный эффект растворения: уменьшение мольного объема раствора V_Σ при выпадении из него i -го компонента $V_{\Sigma-i}$ с учётом мольного объёма самого компонента V_i ;

K – газовая постоянная.

❖ Наиболее активно механизм бародиффузии начинает работать при достижении неких критических значений P и T , что происходит на глубинах более 2000 км. Пик активности процесса приходится на слой D'' . Возможными донорами железа в низах мантии служат минералы группы оливина, которые распадаются по следующей схеме (О.Г.Сорохтин, 1971):



Эволюционный параметр

А.С.Монин (1977)

- X - понимается отношение массы земного ядра (m_c) к суммарной массе "ядерного" вещества в Земле:

$$X = \frac{m_c}{M \cdot C_0}$$

M - масса Земли,

C_0 - суммарная концентрация в Земле "ядерного" вещества (железа, его оксидов и других тяжёлых элементов, переходящих в ядро в процессе гравитационной дифференциации).

О.Г.Сорохтин принимает, что $C_0 = 0,375$