

Геофизика



2026 Лекция №1

Носов Михаил Александрович

отделение геофизики, физический факультет МГУ

<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>

Разделы курса:

- *Физика (твёрдой) Земли*
- *Физика гидросферы*
- *Физика атмосферы*

<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>

Отделение геофизики (ОГФ) физического факультета МГУ

кафедра физики Земли

<http://geo.phys.msu.ru>

кафедра физики моря и вод суши

<http://ocean.phys.msu.ru>

кафедра физики атмосферы

<http://atmosphere.phys.msu.ru>

Кафедры ОГФ – первые заведующие кафедрами:

физики моря – академик АН СССР Василий Владимирович Шулейкин (1943);

физики руслового потока – член-корр. АН СССР Михаил Андреевич Великанов (1945);

сейсмологии и физики земной коры – профессор Вячеслав Францевич Бончковский (1945);

физики атмосферы – профессор Анатолий Фёдорович Дюбюк (1946).



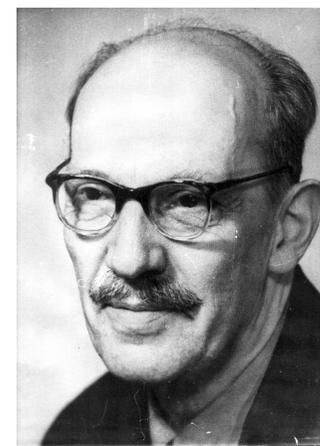
В.В.Шулейкин



М.А.Великанов



В.Ф.Бончковский



А.Ф.Дюбюк

ГЕОФИЗИКА (от гр. ge Земля) – комплекс наук, исследующих физическими методами происхождение, эволюцию Земли, а также процессы, протекающие в ее оболочках (литосфере, гидросфере, атмосфере) и околоземном космическом пространстве

Фундаментальные проблемы геофизики:

- Образование системы Земля-Луна**
- Происхождение ядра, мантии и коры**
- Формирование атмосферы и гидросферы и происхождение жизни на Земле**
- Взаимодействие геосфер**
- Влияние космоса на геосферы**
- Эволюция климата и его устойчивость**
- Магнитное поле Земли**
- Природные катастрофы**

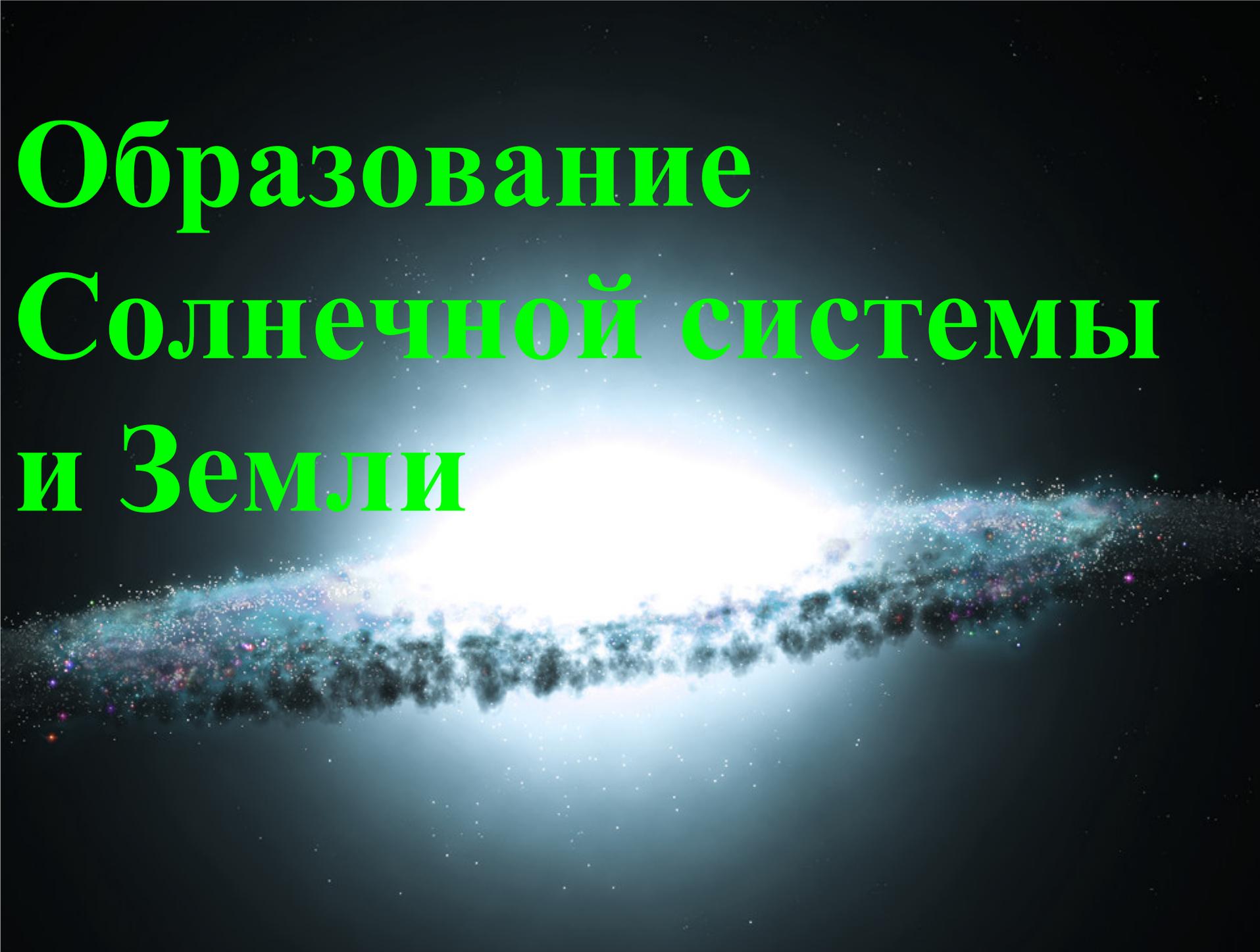
Математические проблемы, имеющие прямое отношение к геофизике:

- ❑ Построение математических моделей сплошных сред с фазовыми переходами, сложной реологией, неизвестными (или эмпирическими) уравнениями состояния и т.д.
- ❑ Глобальная разрешимость трехмерных уравнений гидродинамики
- ❑ Устойчивость решений, хаотические режимы, странные аттракторы, турбулентность
- ❑ Фрактальная геометрия изучаемых объектов

Некоторые эколого-геофизические проблемы

- Глобальное потепление**
- Вулканическая/ядерная зима**
- Озоновые дыры**
- Загрязнение природной среды:**
 - **электромагнитное**
 - **тепловое**
 - **шумовое**
 - **волновое**
 - **световое**
 - **утечка нефтепродуктов в водоемы**
 - **утечка радиоактивных веществ**
 - **пластик в океане и мусорные острова**

Образование Солнечной системы и Земли



Ранние гипотезы происхождения Земли

1732 г. Гипотеза Сведенборга - планеты образовались в результате развития в солнечном веществе «вихря материи», который расширился под действием центробежных сил и образовал кольцо, разбившиеся в дальнейшем на отдельные массы.



Эммануил Сведенборг (1688 - 1772)

шведский естествоиспытатель, мистик, теософ

1749 г. В 1-м томе «Естественная история» Бюффон предложил одну из первых космогонических гипотез: планеты и их спутники образовались из расплавленного вещества, выбитого из Солнца большой кометой.

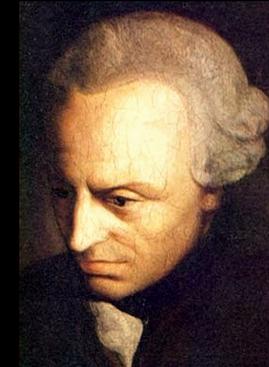


Жорж-Луи Леклерк де Бюффон (1707-1788)

французский натуралист, естествоиспытатель, математик и биолог

Ранние гипотезы происхождения Земли

1755 г. Описал небулярную гипотезу в книге «Всеобщая естественная история и теория неба, или исследование о составе и механическом происхождении всего мироздания, построенное на основе принципов Ньютона» (оставалась неизвестной до 1791 г.).



Иммануил Кант
(1724-1804)

1796 г. В работе «Изложение системы мира» рассмотрел вероятный сценарий образования планетной системы, под действием силы всемирного тяготения, из горячей разреженной туманности, вращавшейся вместе с формирующимся в ее центре Солнцем.



Пьер Симон Лаплас
(1749-1827)

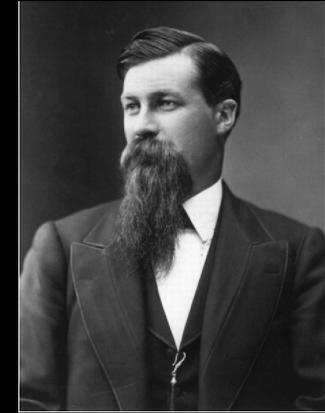
Ранние гипотезы происхождения Земли

1905 г. В результате близкого прохождения мимо Солнца другой звезды произошёл выброс солнечного вещества (протуберанцев), которое послужило «строительным материалом» для планет (планетезимали).

~1920 г. Приливная теория, в которой предполагалось, что планеты сформировались из вещества, исторгнутого Солнцем, в результате катастрофической близости другой звезды.



**Forest
Moulton
1872–1952)**



**Thomas
Chamberlin
1843–1928)**



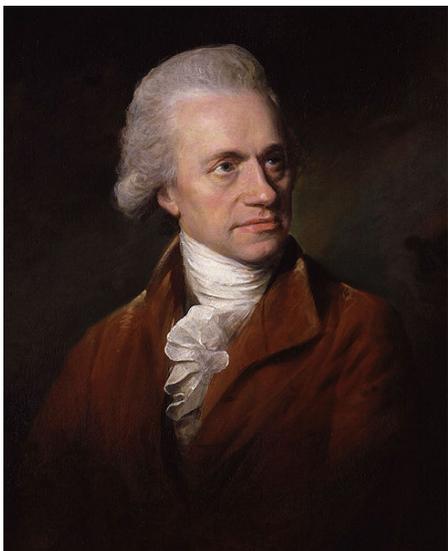
**James Jeans
(1877-1946)**



**Артур
Стэнли
Эддингтон
1882-1944
английский
астрофизик**

**...я – единственный
человек на Земле,
который знает, почему
они (звезды) светят...**

Eddington A. S. The Internal
Constitution of the Stars // The
Scientific Monthly Vol. 11,
No.4 (Oct., 1920), pp. 297-303



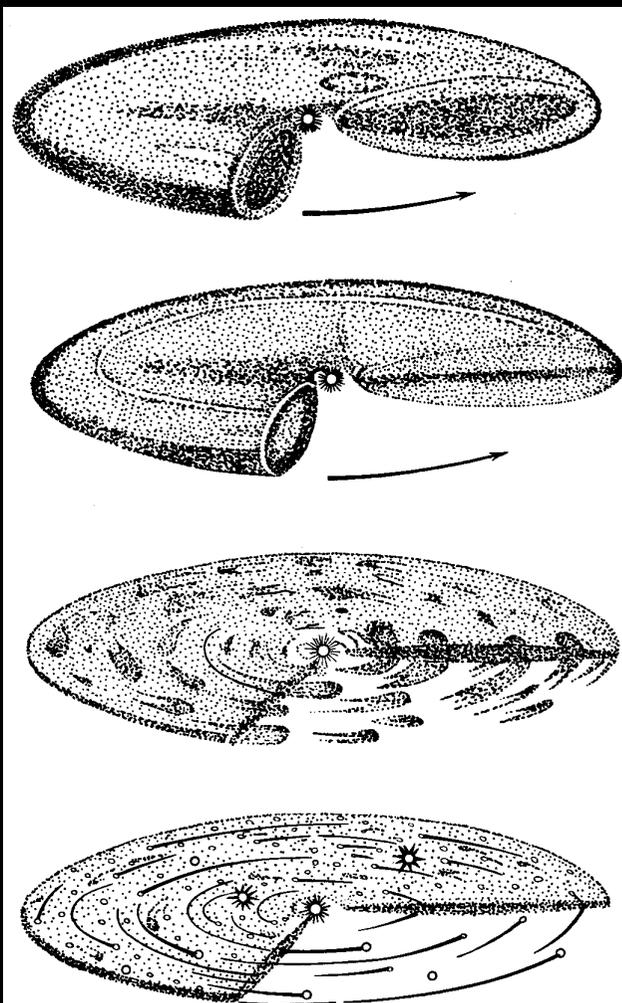
**Уильям Гершель
1738 — 1822
выдающийся
английский
астроном**

**«Здесь,
вероятно,
дыра в небе!»**

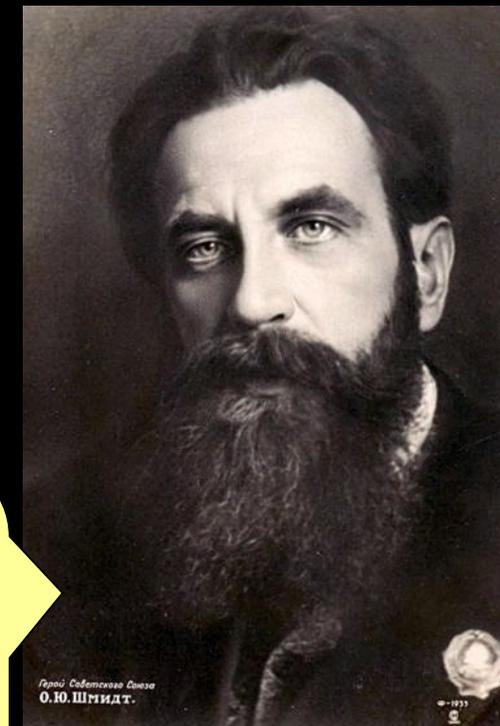


Ранние гипотезы происхождения Земли

1943 г. Гипотеза об аккумуляции планет из роя холодных тел и частиц, захваченного Солнцем



заведовал
ОГФ в
период
1951-1956



Отто
Юльевич
Шмидт
(1891-1956)

Современная концепция

Вселенная образовалась ~14 млрд. лет назад в результате «Большого взрыва»

излучение



«легкие»
частицы
(протоны,
электроны,
нейтроны,
ядра гелия
и др.)

**Тяжелых элементов
не существовало!**

Современная концепция

Образование Солнечной системы и Земли

- ❑ Солнечная система возникла ~ 4.7 млрд. лет назад как результат аккреции* твердых частиц холодного газопылевого протопланетного облака;
- ❑ Планеты и Солнце сформировались в едином процессе;
- ❑ «Строительный материал» образовался в результате взрыва двух** сверхновых звезд.

**Аккреция (accretion, прирост, срастание) – падение вещества на космическое тело из окружающего пространства*

***в метеоритах встречаются следы короткоживущих изотопов*

красные карлики,
нейтронные звезды и черные
дыры

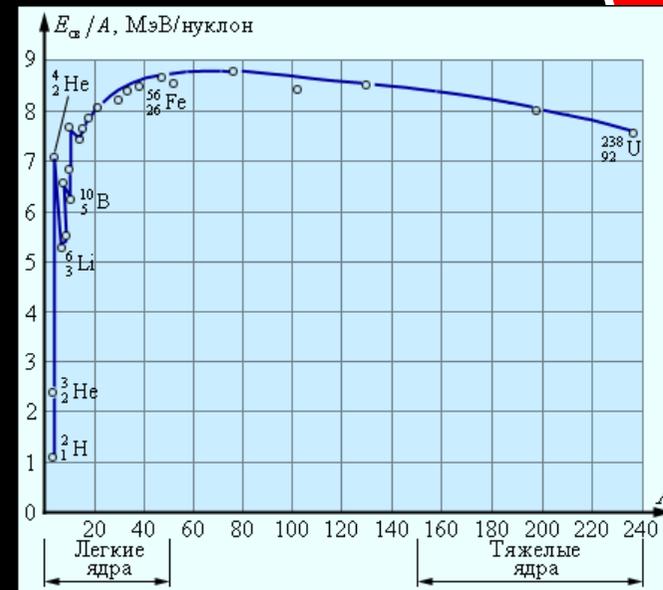
???

Гравитационный коллапс,
взрыв сверхновой

«Выгорание»
от H до Fe ,
 Ni

Водородно-гелиевые
протозвезды

Гравитационная
неустойчивость



«Строительный
материал» для звезд
следующего поколения,
в т.ч. тяжелые элементы

Ингредиенты Солнечной системы

<i>Металлы</i>	<i>T конденсации</i>	
Fe, Ni, Al	1600 K	0.2%
<i>минералы на основе кремния</i>		
силикаты	500-1300 K	0.4%
<i>льды: метан, аммиак, вода</i>		
CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O	~150 K	1.4%
<i>легкие газы</i>		
H, He	-	98%

Аккреционный диск

- **Гравитационное сжатие**
- **Сохранение углового момента**
- **Излучение и солнечный ветер**

Данные наблюдений подтверждают:

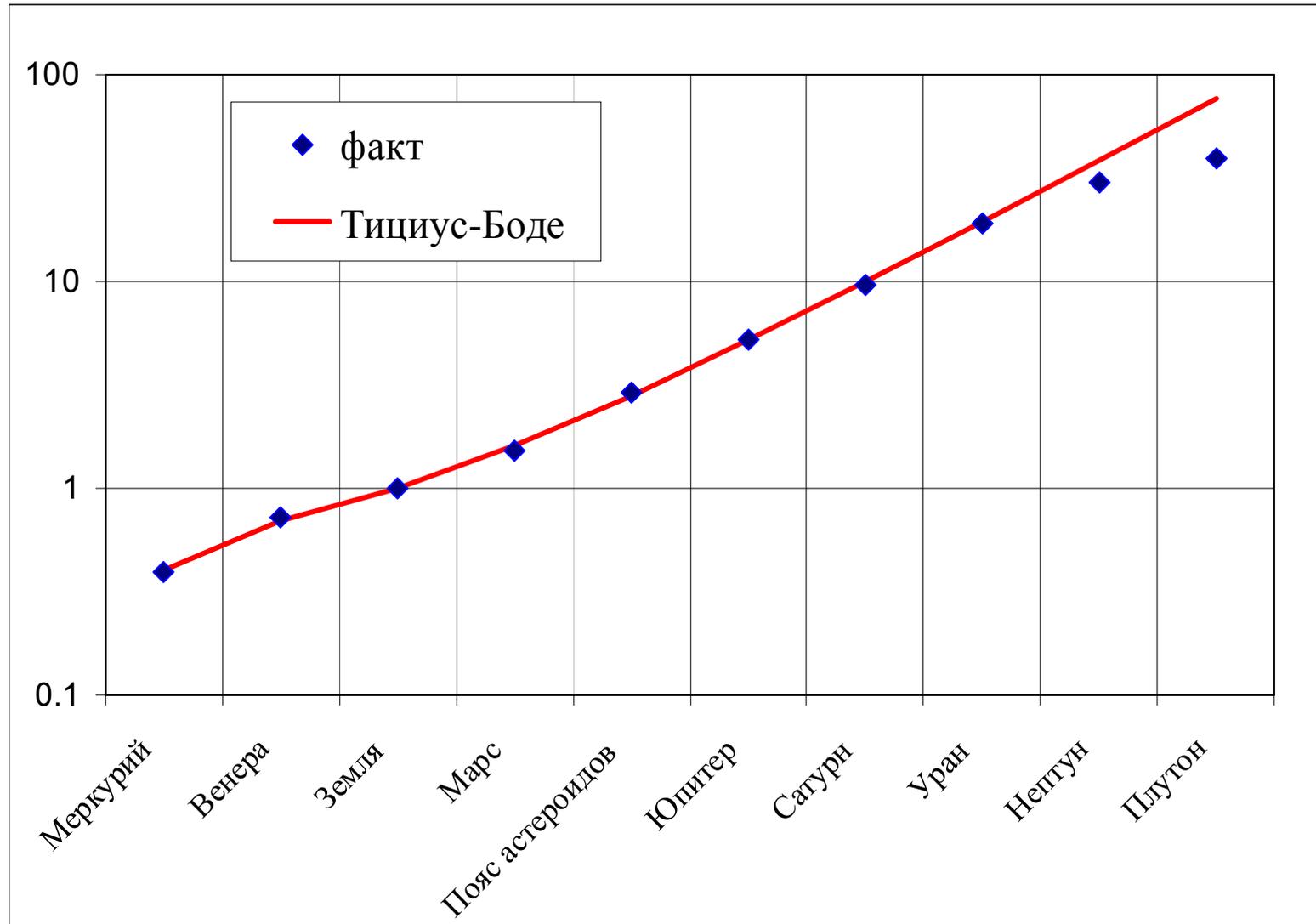
- **правдоподобность «стандартного сценария» формирования планетных систем**
- **оценку времени формирования (десятки млн. лет)**

Модель образования Солнечной системы должна объяснить следующий набор наблюдаемых фактов:

- 1. Все планеты движутся по эллиптическим орбитам в одном направлении**
- 2. Орбиты всех планет (кроме Плутона - 17°) лежат в единой плоскости (различие не превышает 6°)**
- 3. Солнце вращается в направлении движения планет по орбитам, а ось его вращения перпендикулярна плоскости орбит**

4. Закономерное изменение среднего гелиоцентрического расстояния (правило Тициуса — Боде)

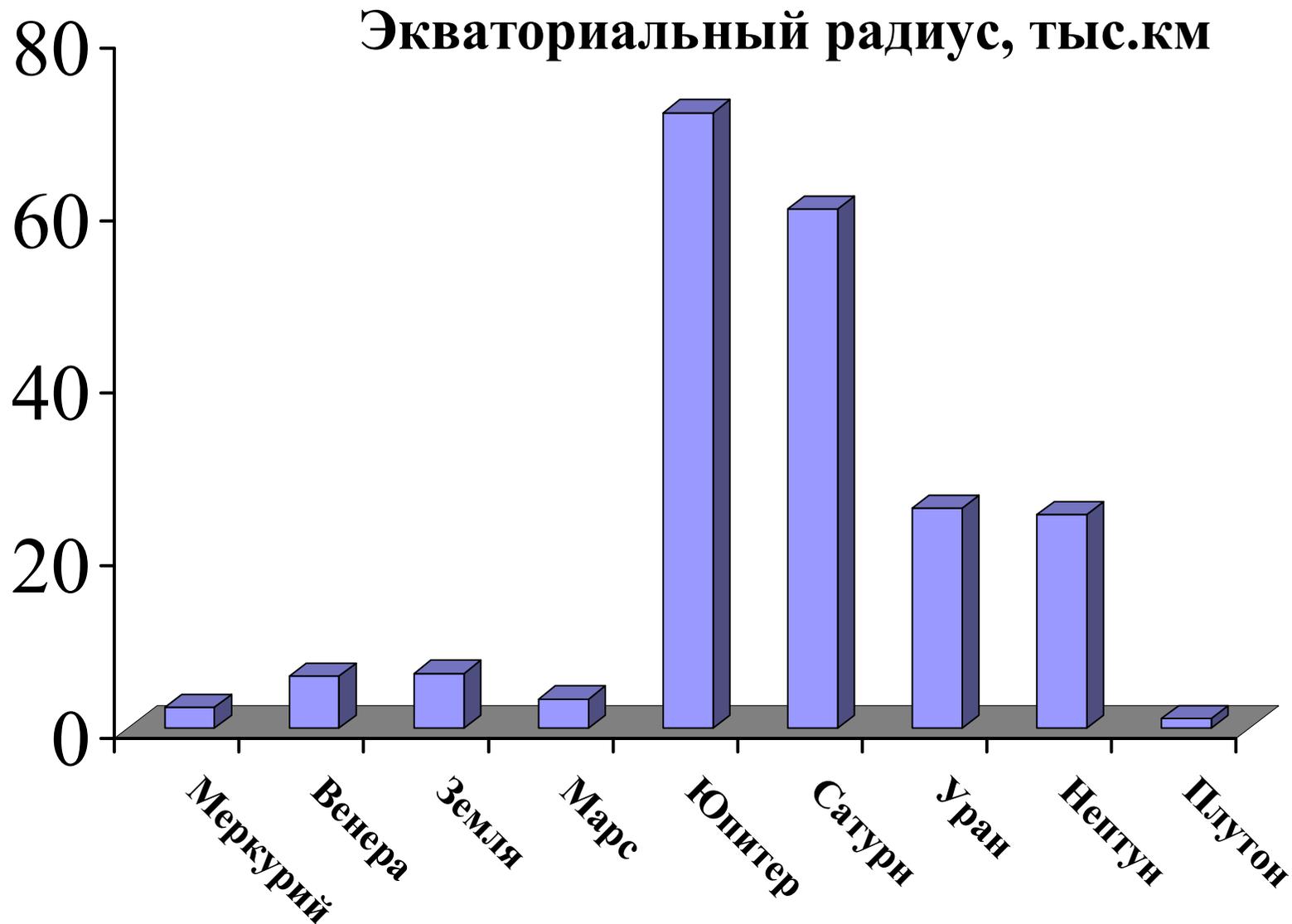
$$R = 0.4 + 0.3 \cdot 2^m, \quad m = -\infty, 0, 1, 2, 3 \dots$$



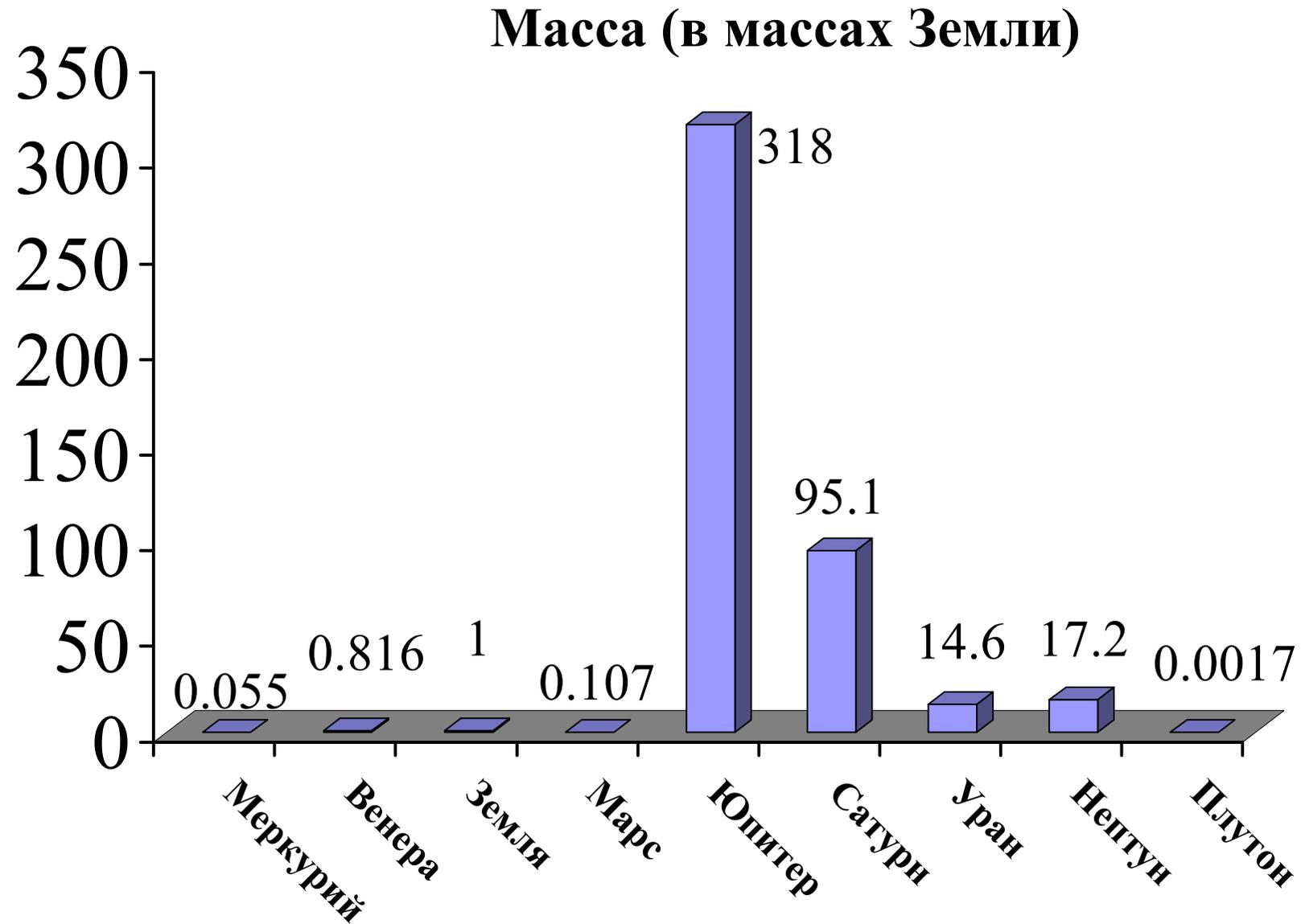
5. Закономерное изменение средней плотности



6. Закономерное изменение радиуса

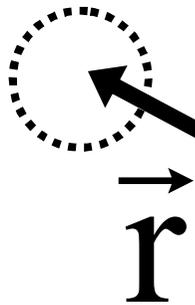


7. Закономерное изменение массы



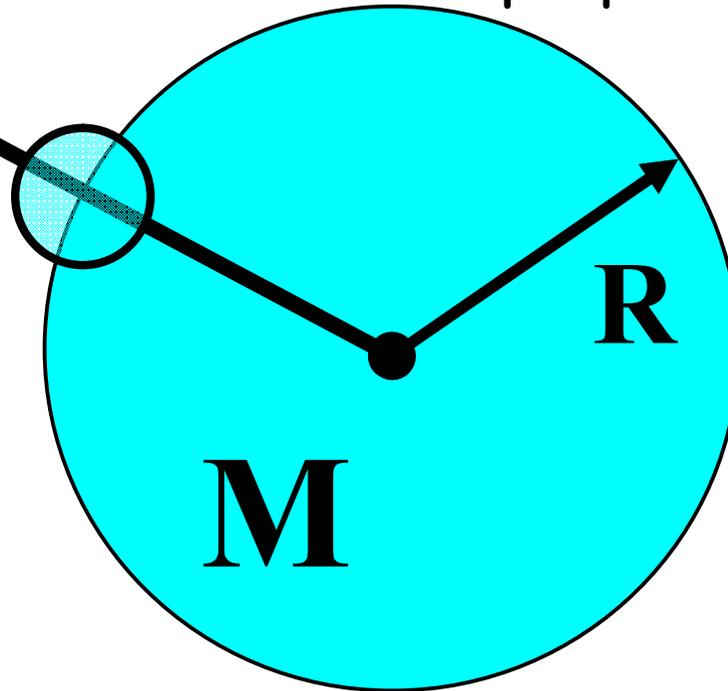
Энергия аккреции

dM



$$\vec{F} = -G \frac{M dM}{|\vec{r}|^3} \vec{r}$$

$$dA = \int_{\infty}^R \vec{F} d\vec{r} =$$
$$= G \frac{M dM}{R}$$



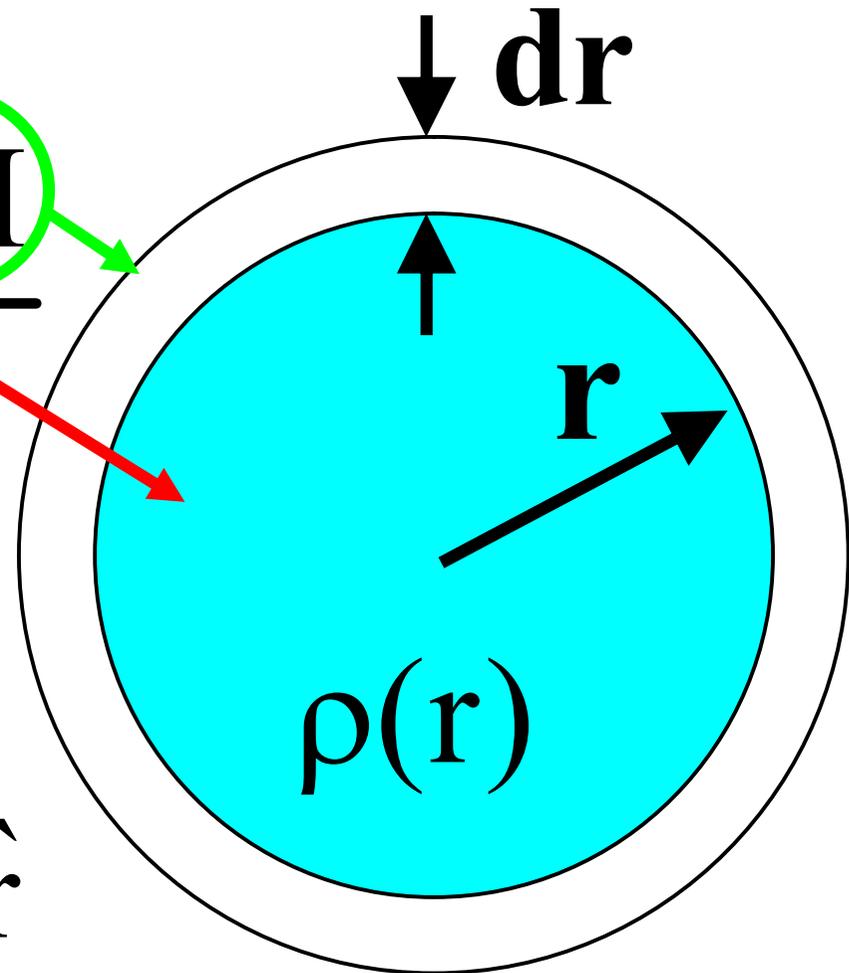
$$dW = -dA$$

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

$$dW = -G \frac{M dM}{r}$$

$$dM = 4\pi r^2 \rho(r) dr$$

$$M = \int_0^r 4\pi \hat{r}^2 \rho(\hat{r}) d\hat{r}$$



$$W = -16\pi^2 G \int_0^{R_{\oplus}} \left(\int_0^r \hat{r}^2 \rho(\hat{r}) d\hat{r} \right) r \rho(r) dr$$

$\neq f(r)$

$$\rho = \text{const} \equiv \rho_{\oplus} = M_{\oplus} / \frac{4\pi}{3} R_{\oplus}^3$$

$$W = -G \frac{16}{15} \pi^2 \rho_{\oplus}^2 R_{\oplus}^5 = -\frac{3}{5} \frac{GM_{\oplus}^2}{R_{\oplus}} =$$

$$= -G \left(\frac{4\pi}{3} \rho_{\oplus} \right)^{1/3} \frac{3}{5} M_{\oplus}^{5/3} = -A$$

энергия
аккреции

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$$

$$\rho_{\oplus} = 5518 \text{ кг} / \text{м}^3 \quad M_{\oplus} = 5.978 \cdot 10^{24} \text{ кг}$$

$$A = G \left(\frac{4\pi}{3} \rho_{\oplus} \right)^{1/3} \frac{3}{5} M_{\oplus}^{5/3}$$

Удельная теплота
парообразования
железа:
 $6.12 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$

$$A \approx 2.24 \cdot 10^{32} \text{ Дж}$$

$$A / M_{\oplus} \approx 3.9 \cdot 10^7 \text{ Дж} / \text{кг}$$

При аккреции Земли выделилось

$\sim 2.24 \cdot 10^{32}$ Дж

**Этой энергии достаточно для
испарения вещества Земли!**

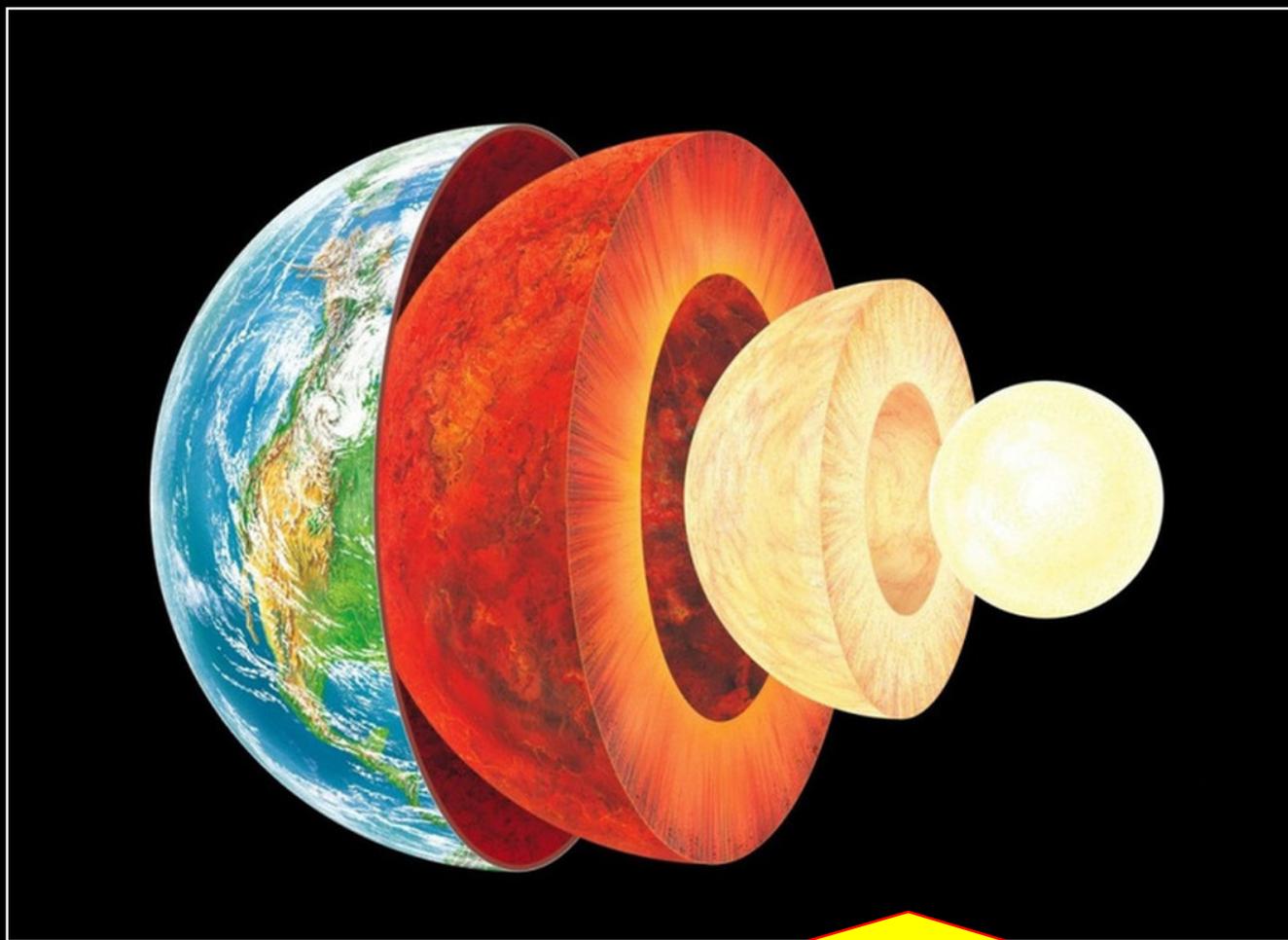
Солнце \rightarrow Земля

$$L_{\oplus} \approx 1.75 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$$

$$T = A / L_{\oplus} \approx 1.3 \cdot 10^{15} \text{ с} \approx 40 \text{ млн. лет}$$

**При времени роста ~ 10 млн. лет планета
остается относительно «холодной»!**

Внутреннее строение Земли



В отличие от атмосферы и гидросферы
практически недоступно для прямого изучения

Источники энергии в недрах Земли

1. Распад радиоактивных U, Th, ^{40}K ,
 ^{26}Al , ^{60}Fe

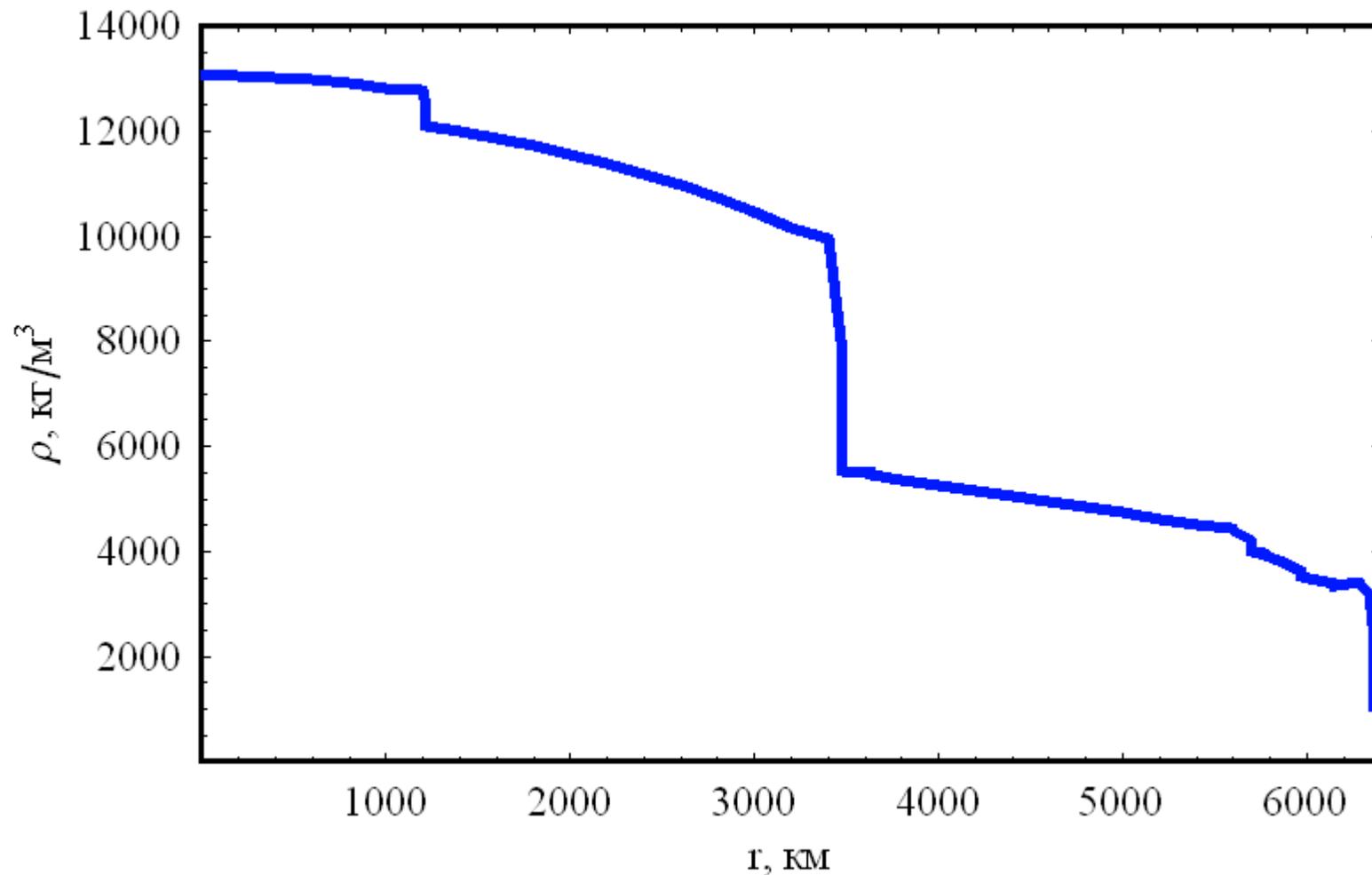
2. Гравитационная дифференциация

3. Приливная диссипация

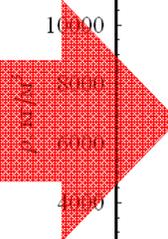
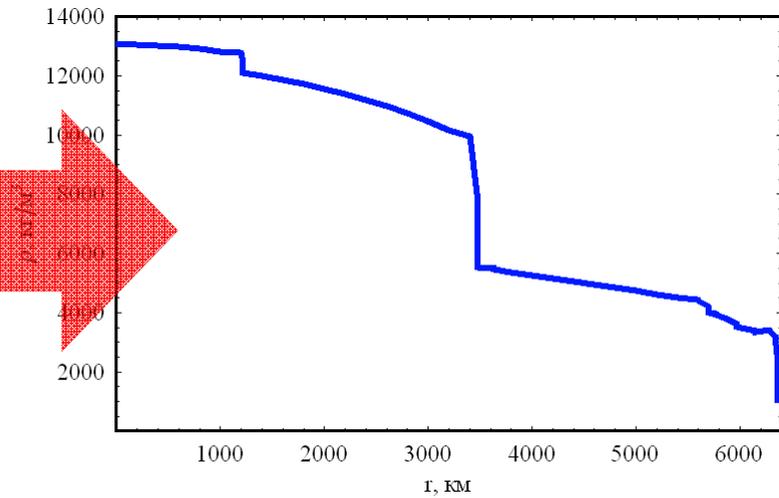
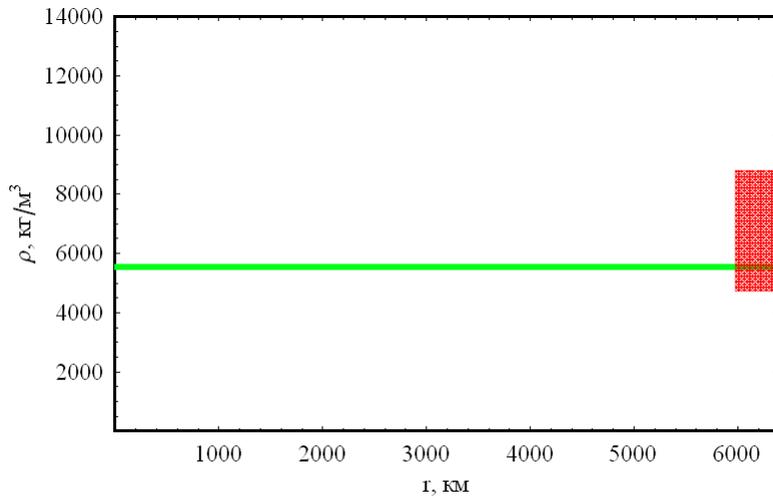
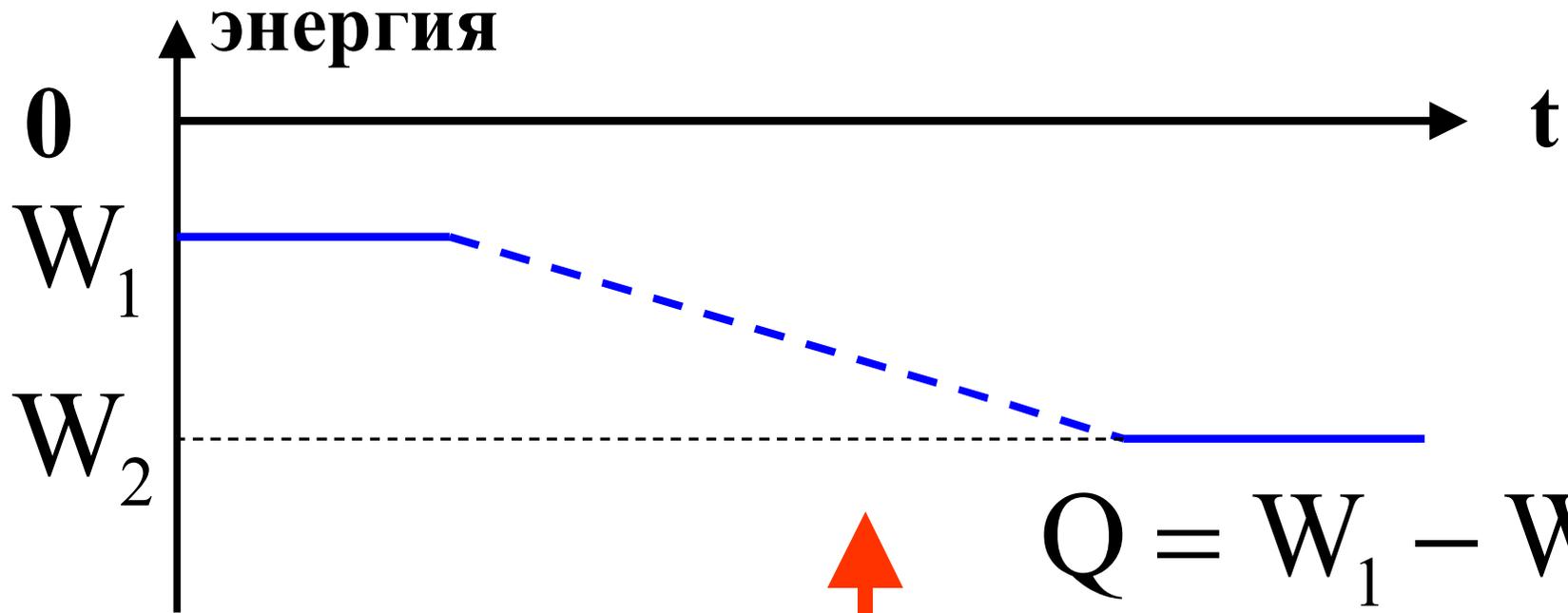
4. Гравитационное сжатие

5. Химические реакции и фазовые
переходы (источники и стоки энергии)

Современное распределение плотности по PREM (Preliminary Reference Earth Model)



Энергия гравитационной дифференциации



$$W = -16\pi^2 G \int_0^R \left(\int_0^r \hat{r}^2 \rho(\hat{r}) d\hat{r} \right) r \rho(r) dr$$

$$W_1 = -2.24 \cdot 10^{32} \text{ Дж } (\rho = \text{const})$$

$$W_2 = -2.55 \cdot 10^{32} \text{ Дж (PREM)}$$

$$Q = W_1 - W_2 = 0.31 \cdot 10^{32} \text{ Дж}$$

**Энергия гравитационной
дифференциации**

Время тепловой релаксации шара

$$\tau \sim \frac{R^2}{\chi}$$

6 371 000 м

χ

$5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$

Коэффициент
температуро-
проводности
[м²/с]

возраст Земли

$4.6 \cdot 10^9$ лет !!!

$$R \sim \sqrt{\tau \chi} \approx 270 \text{ км}$$