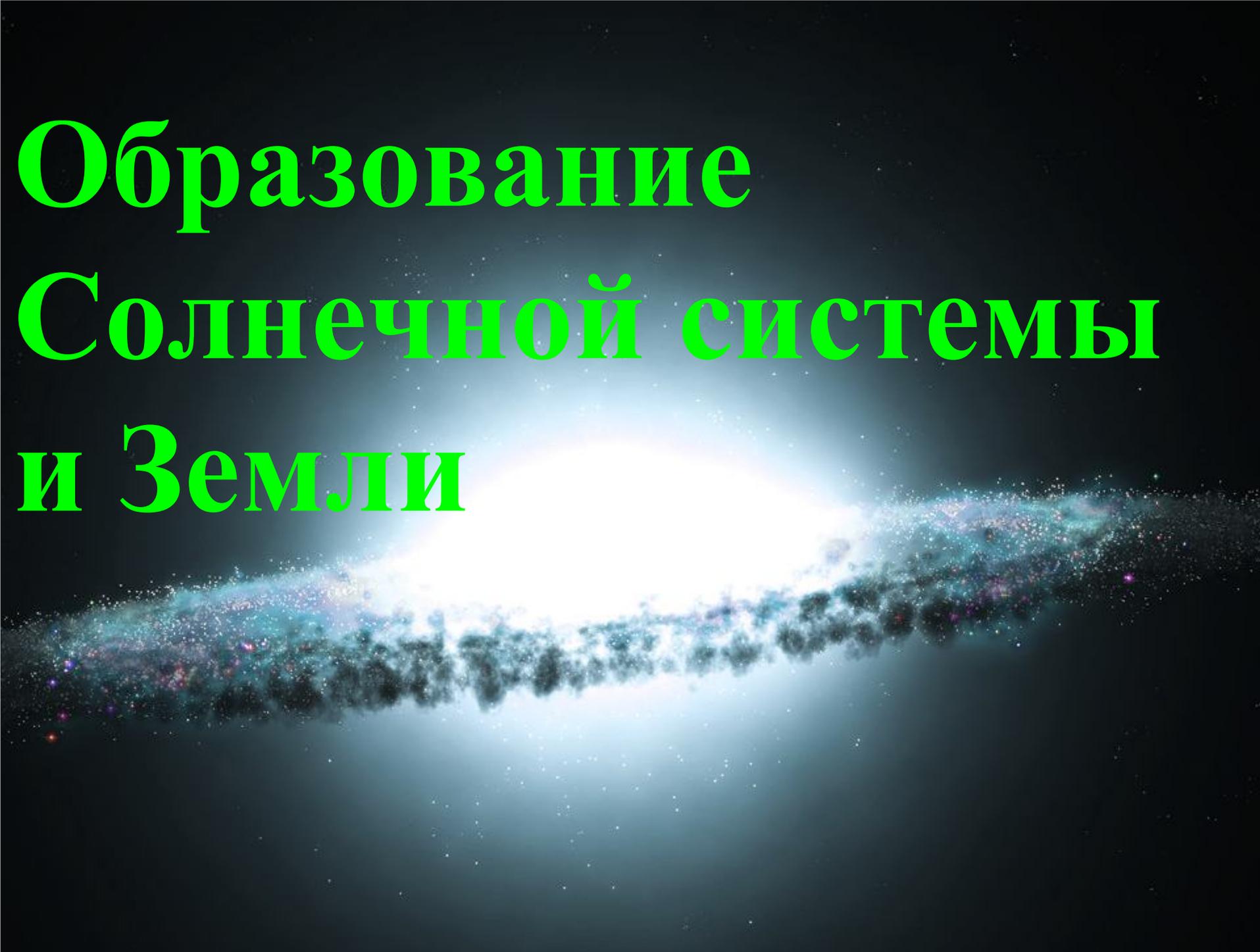


Физическое и математическое
моделирование процессов в геосредах
(Введение в физику моря и вод суши)

2021 Лекция №1

Носов Михаил Александрович
отделение геофизики, физический факультет МГУ

Образование Солнечной системы и Земли



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

излучение



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

**Тяжелых элементов
не существовало!**

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*

Ингредиенты Солнечной системы

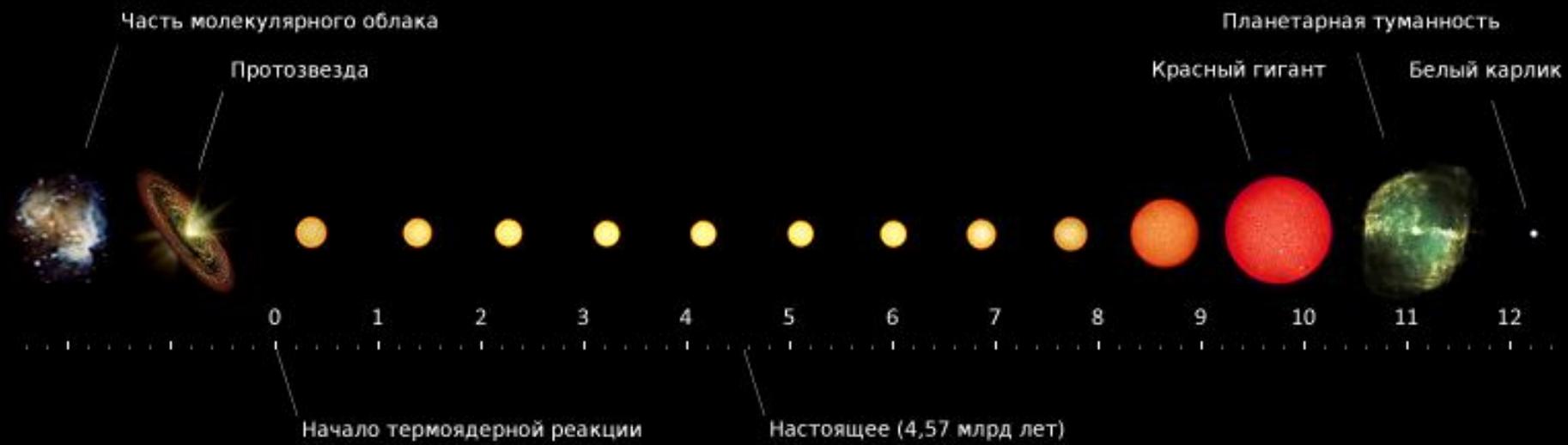
<i>Металлы</i>	<i>T конденсации</i>	
Fe, Ni, Al	1600 K	0.2%
<i>минералы на основе кремния</i>		
силикаты	500-1300 K	0.4%
<i>льды: метан, аммиак, вода</i>		
CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O	~150 K	1.4%
<i>легкие газы</i>		
H, He	-	98%

Аккреционный диск

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

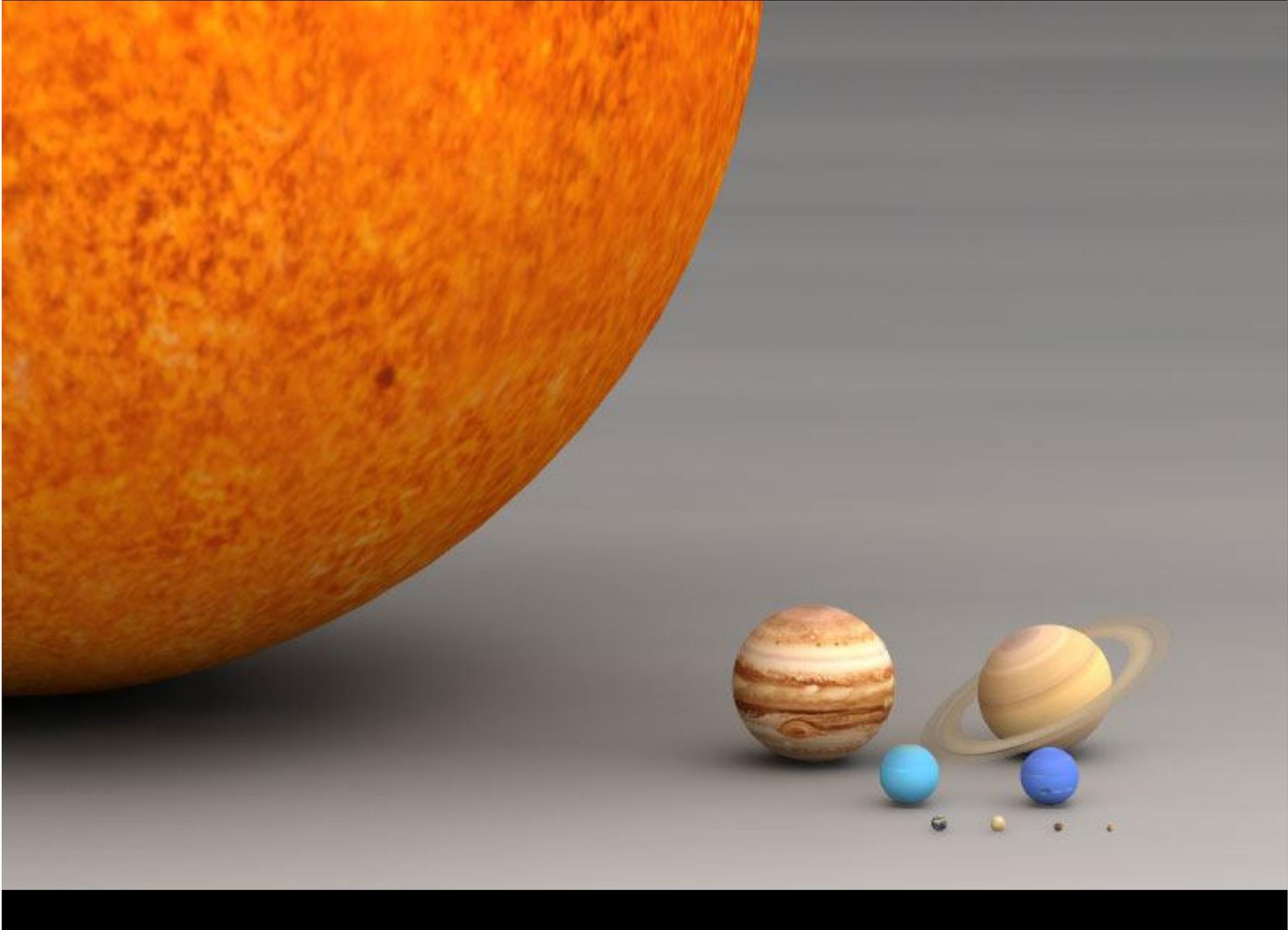
Данные наблюдений подтверждают:

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



Жизненный цикл Солнца

Масштаб и цвета условны. Временная шкала в миллиардах лет (приблизительно)



Солнечная система: наблюдаемые факты

- 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. Средняя плотность планет

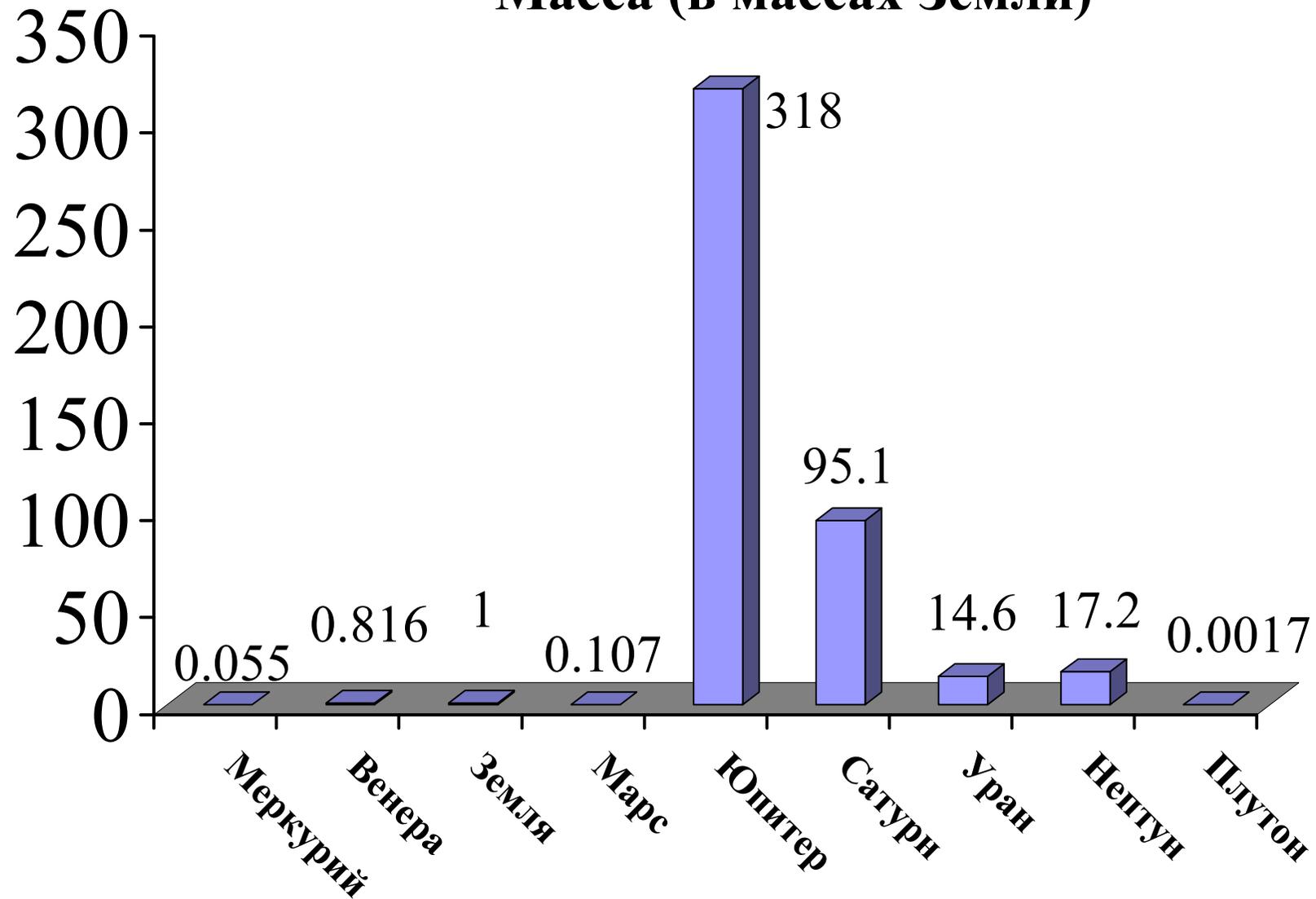


5. Размер планет



7. Массы планет

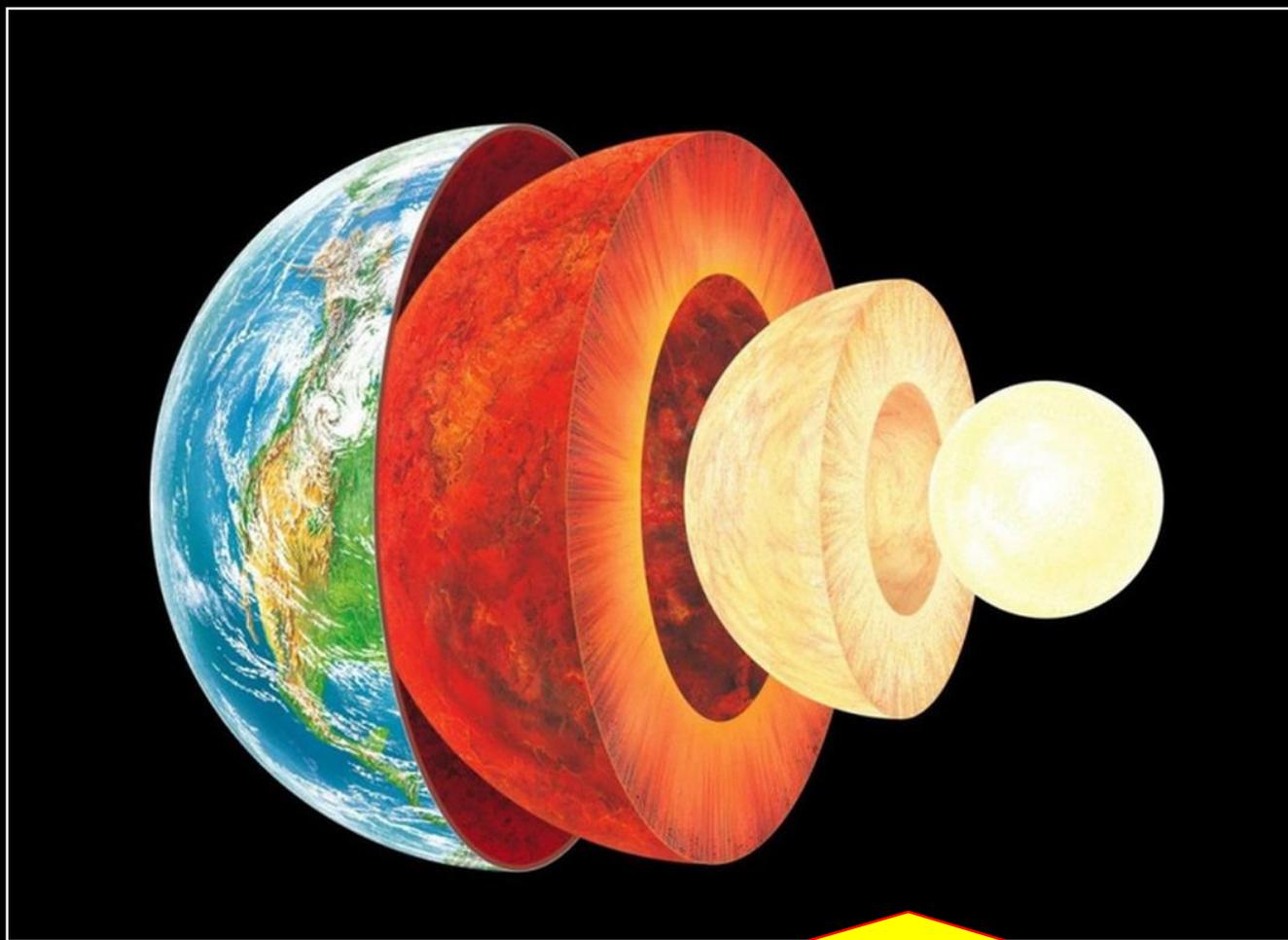
Масса (в массах Земли)



Общие сведения о планете Земля

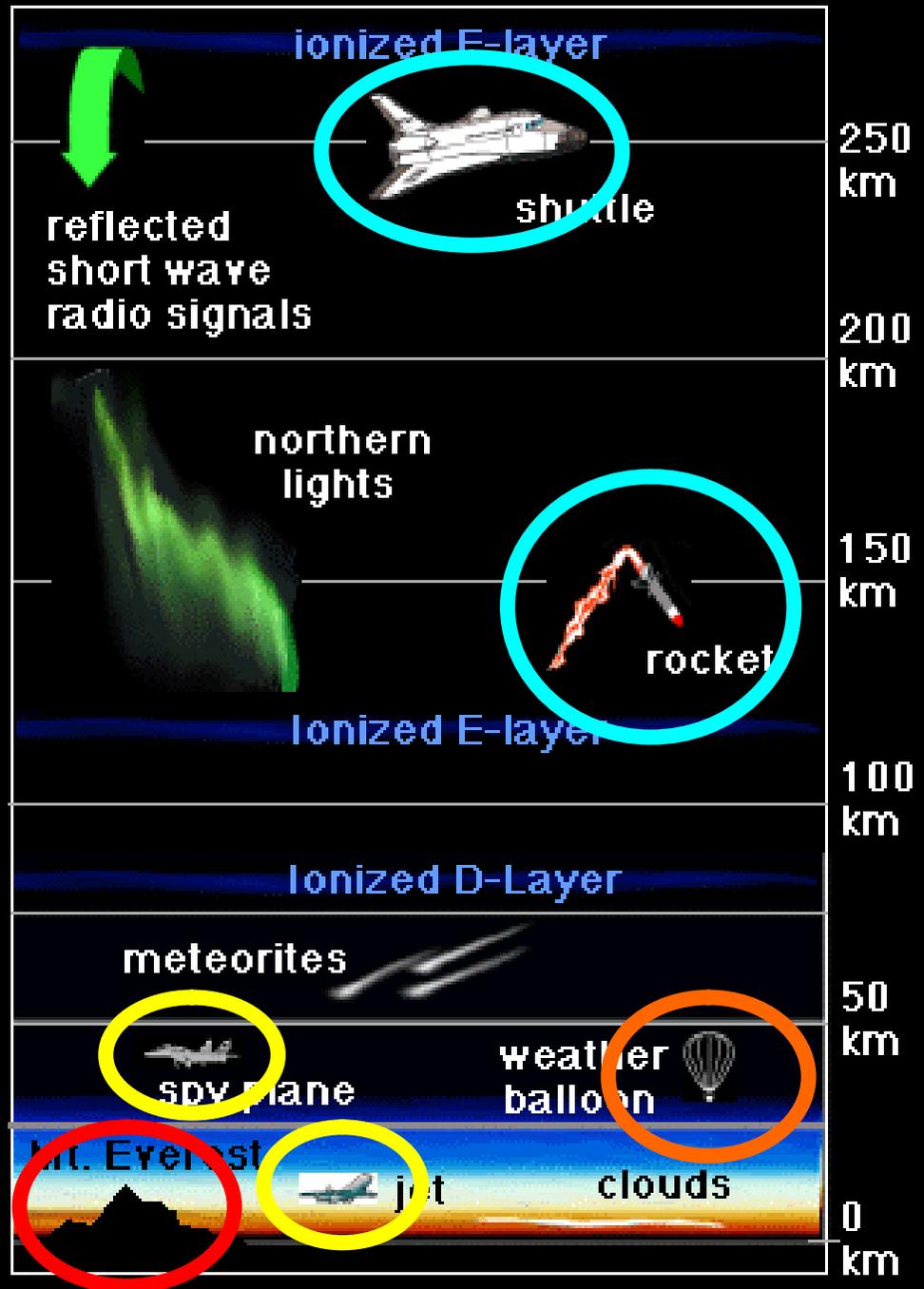
Расстояние до Солнца	149.6 млн. км
Масса	$5.978 \cdot 10^{24}$ кг
Период вращения вокруг оси	23ч. 56мин. 04с.
Средний радиус	6371 км
Средняя плотность	5518 кг/м ³
Наклон экватора к орбите	23°27'

Внутреннее строение Земли

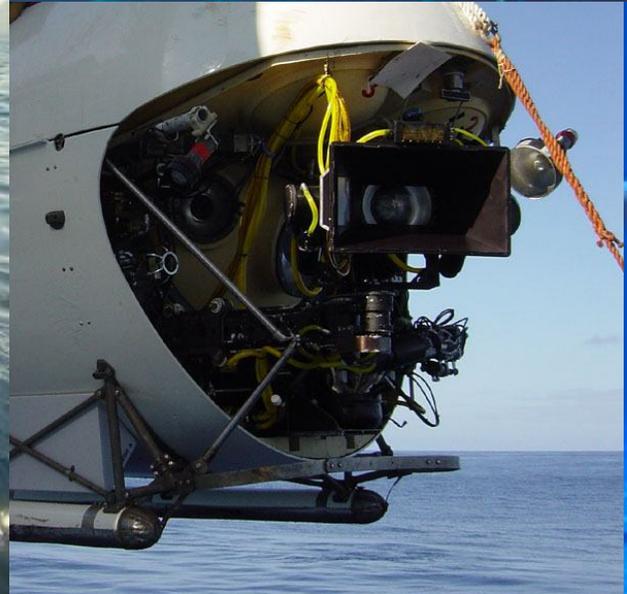
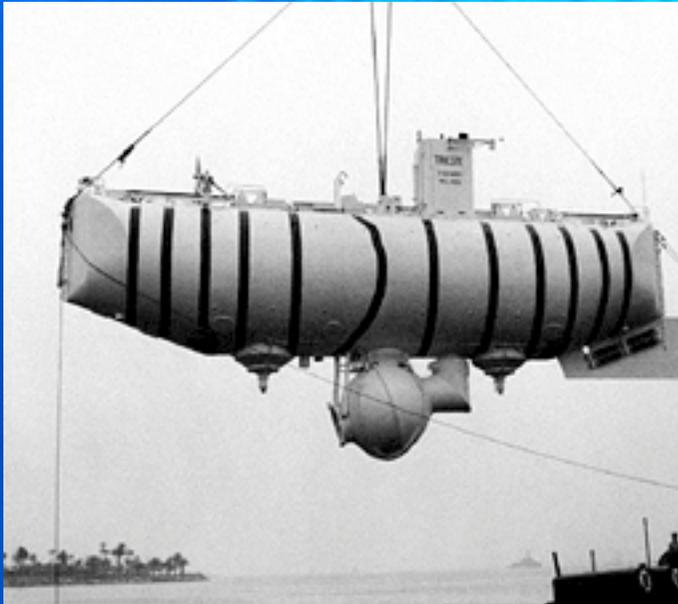


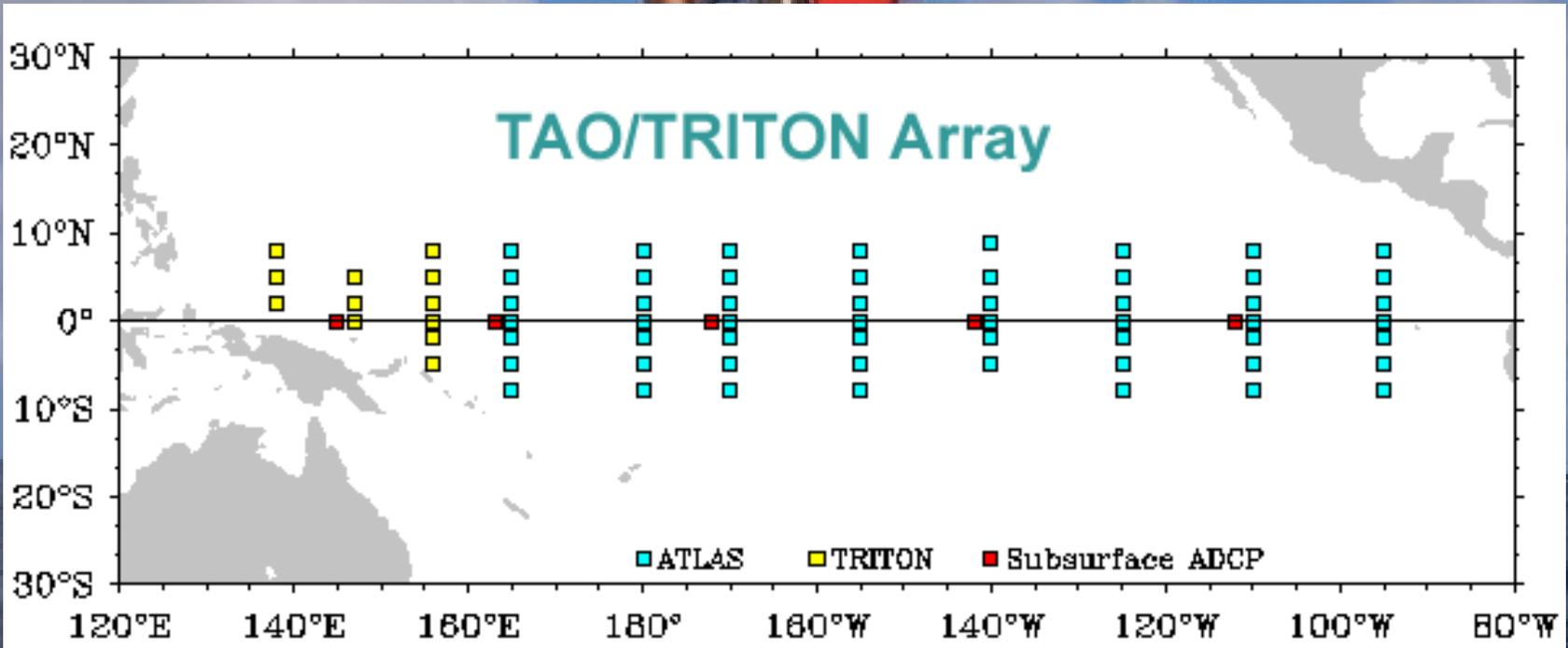
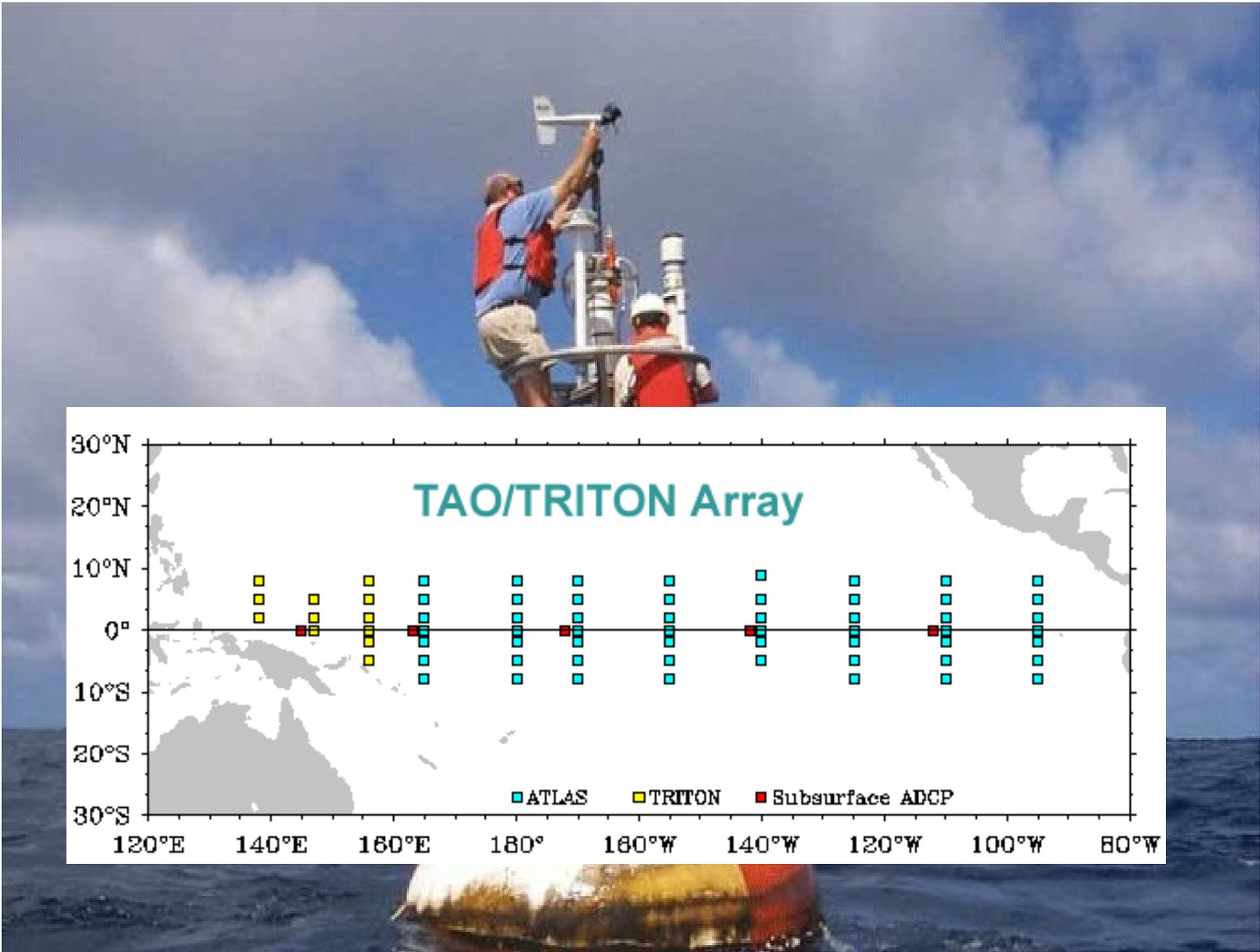
В отличие от атмосферы и гидросферы
практически недоступно для прямого изучения

Сеть метеостанций

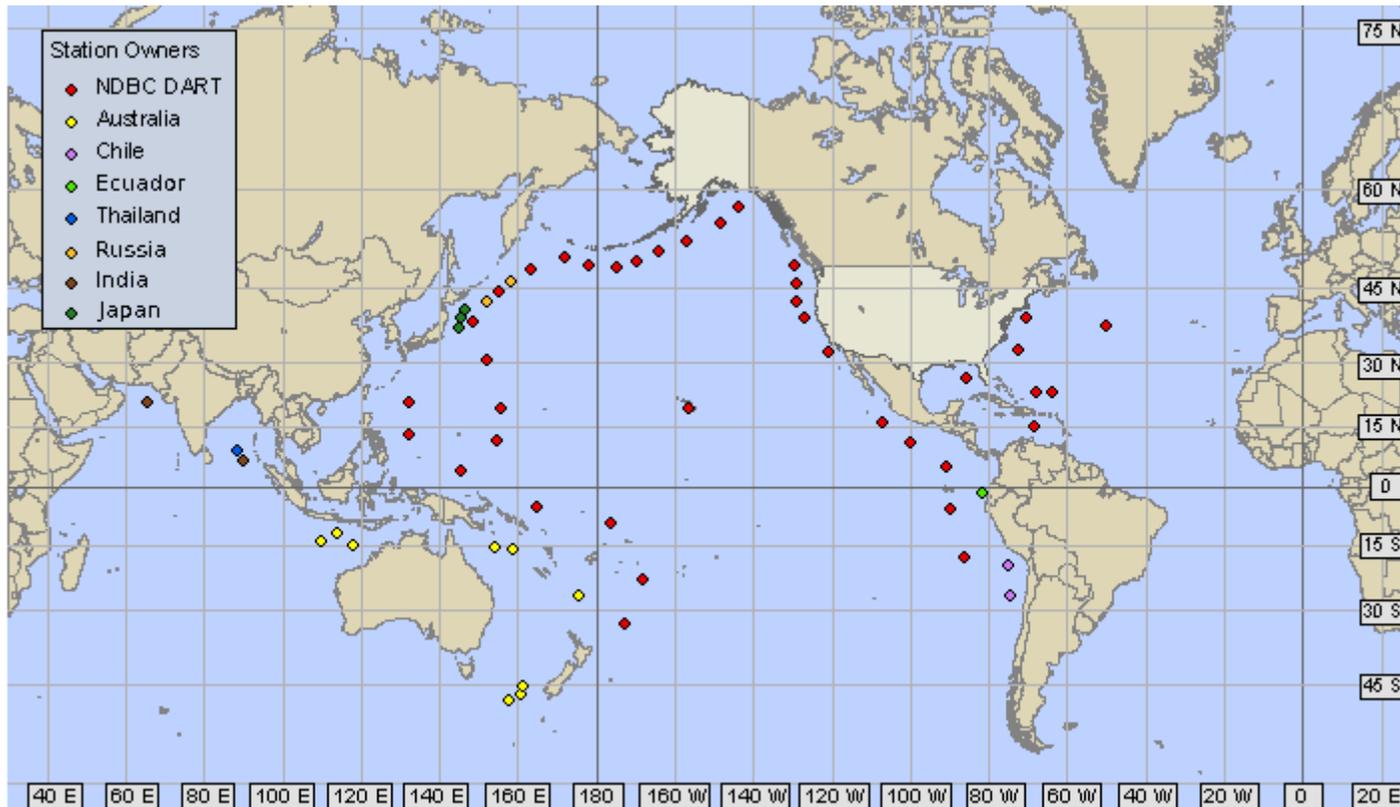




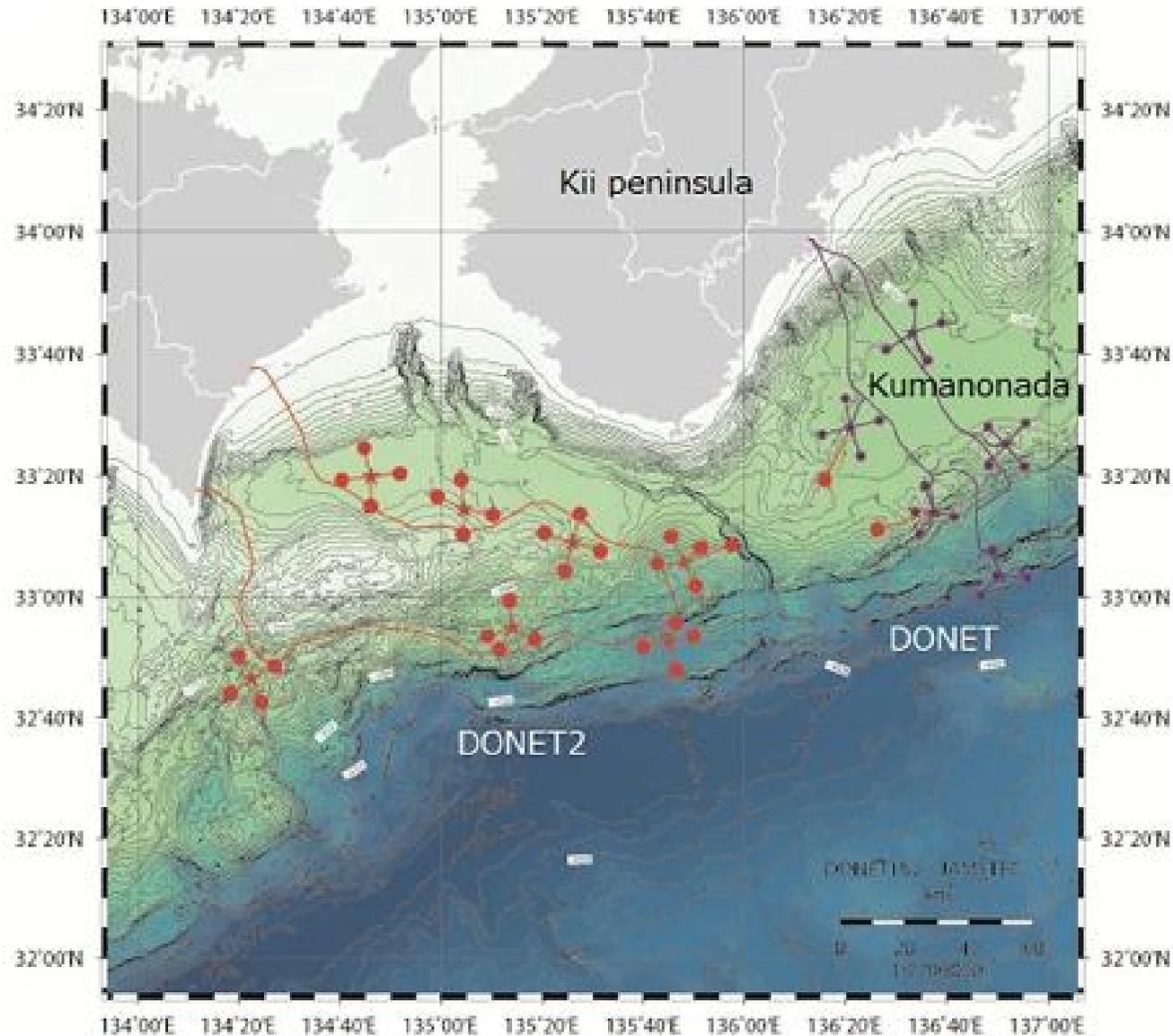




Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis



Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis



Источники информации о внутреннем строении Земли:

- ❑ Сверхглубокое бурение (12 262 м);
- ❑ Материал, извергнутый вулканами;
- ❑ Сейсмические данные;
- ❑ Тепловой поток;
- ❑ Магнитное поле;
- ❑ Гравитационное поле;
- ❑ Интегральные характеристики (масса, момент инерции).

Внутреннее строение Земли

Как возникла
такая
структура?

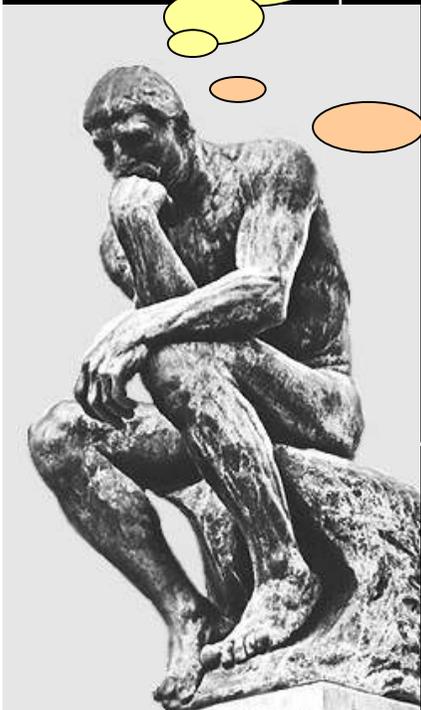
мантия до 2900 км

внешн.ядро до 5100 км

внутр.ядро



Источники
энергии внутри
Земли?



Источники энергии в недрах Земли

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

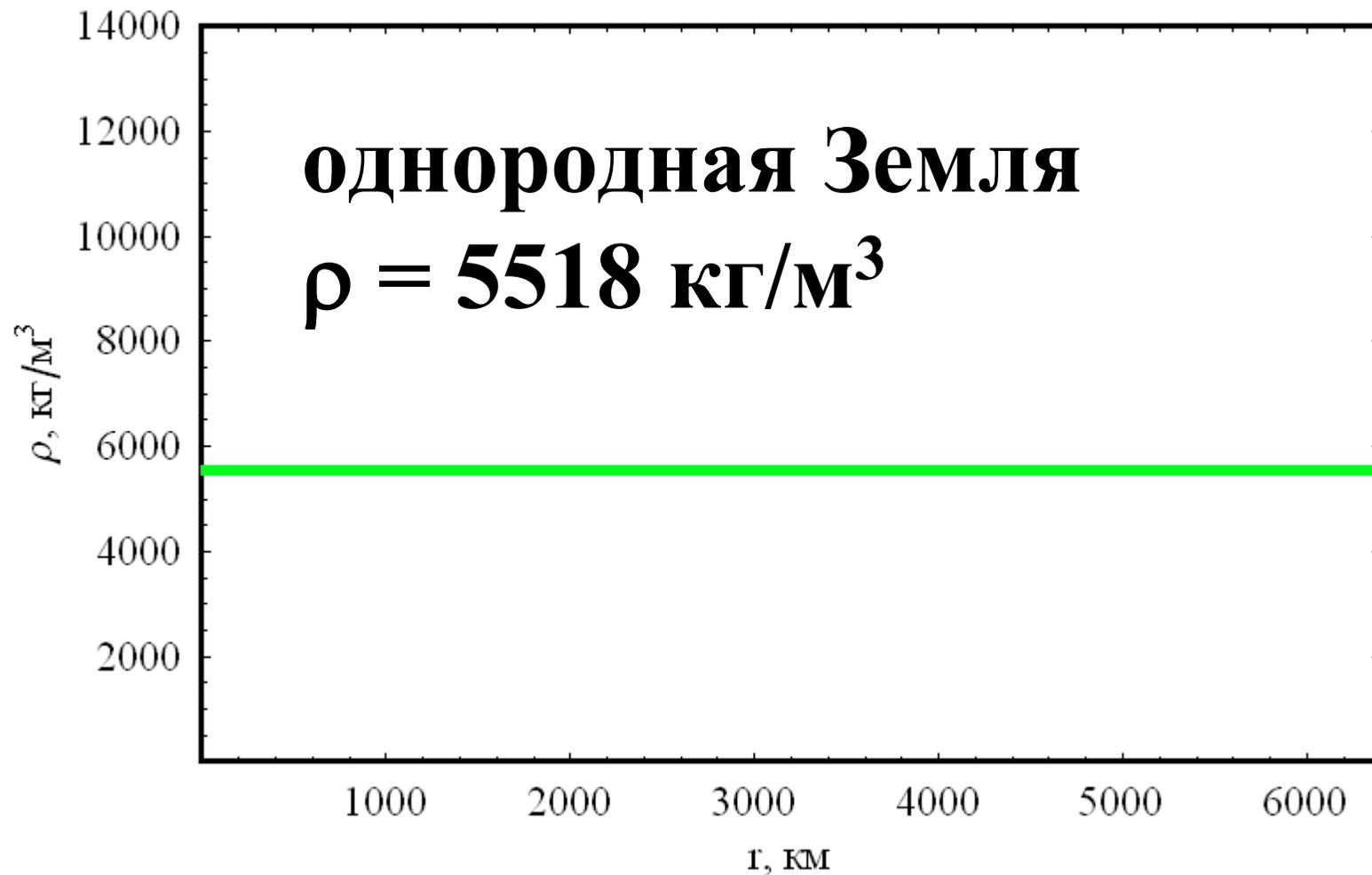
2. Гравитационная дифференциация

3. Приливная диссипация

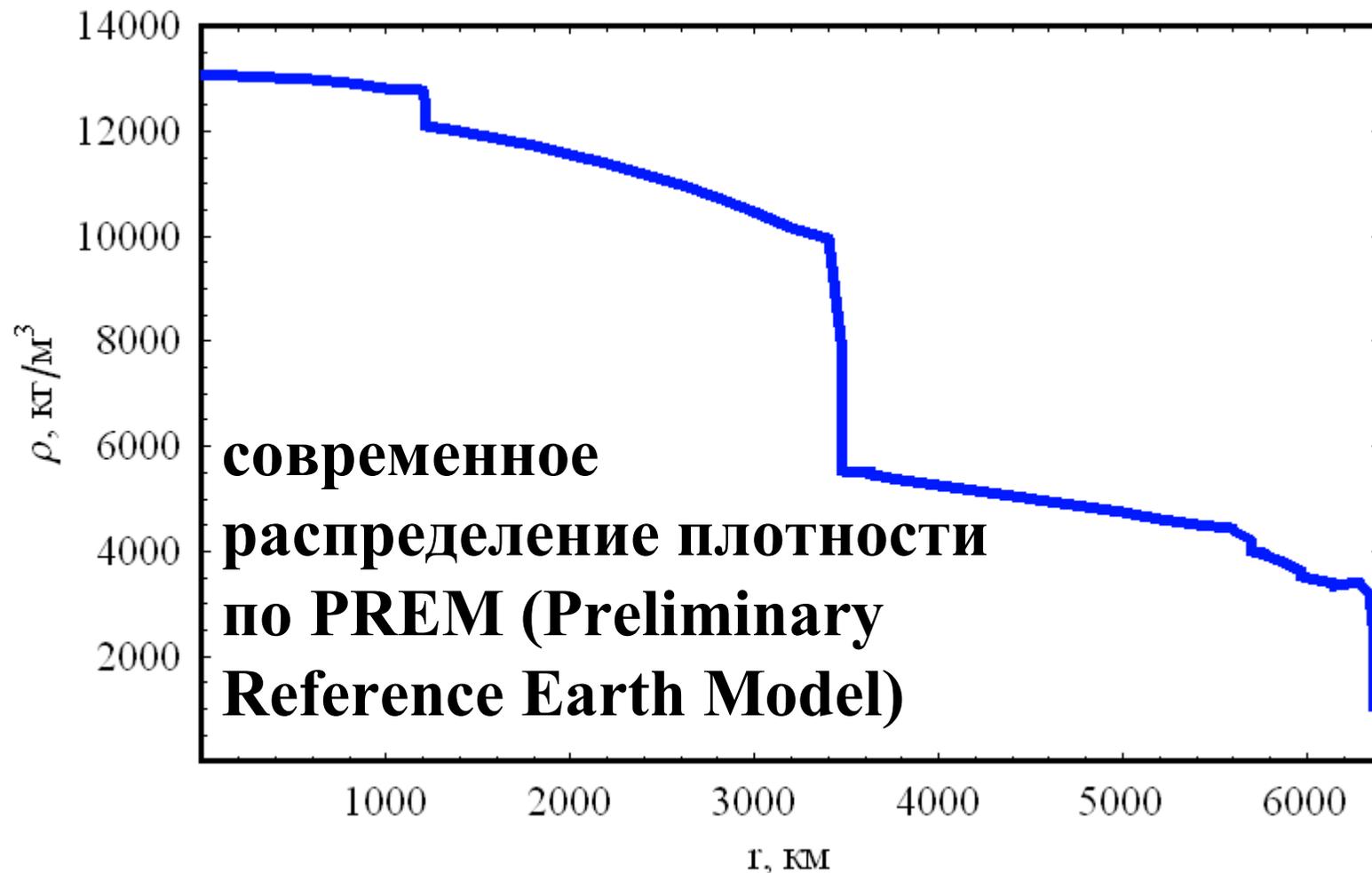
4. Гравитационное сжатие

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

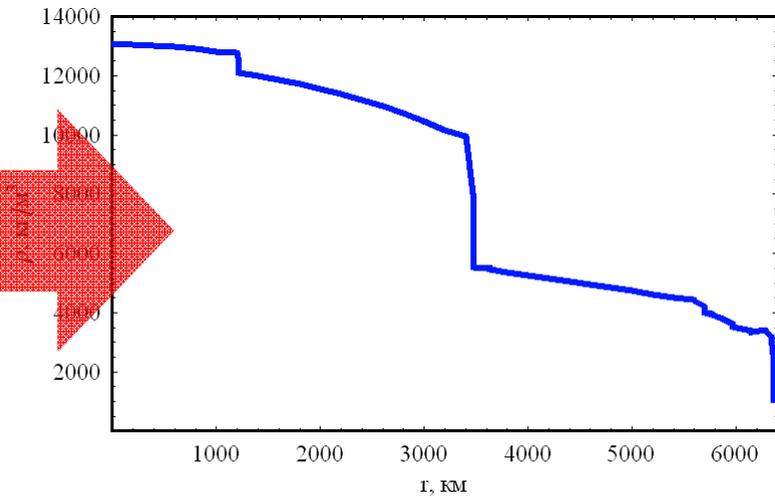
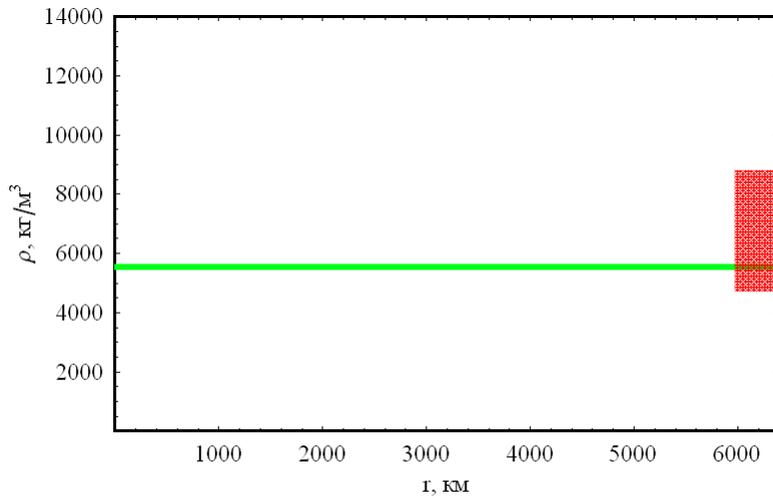
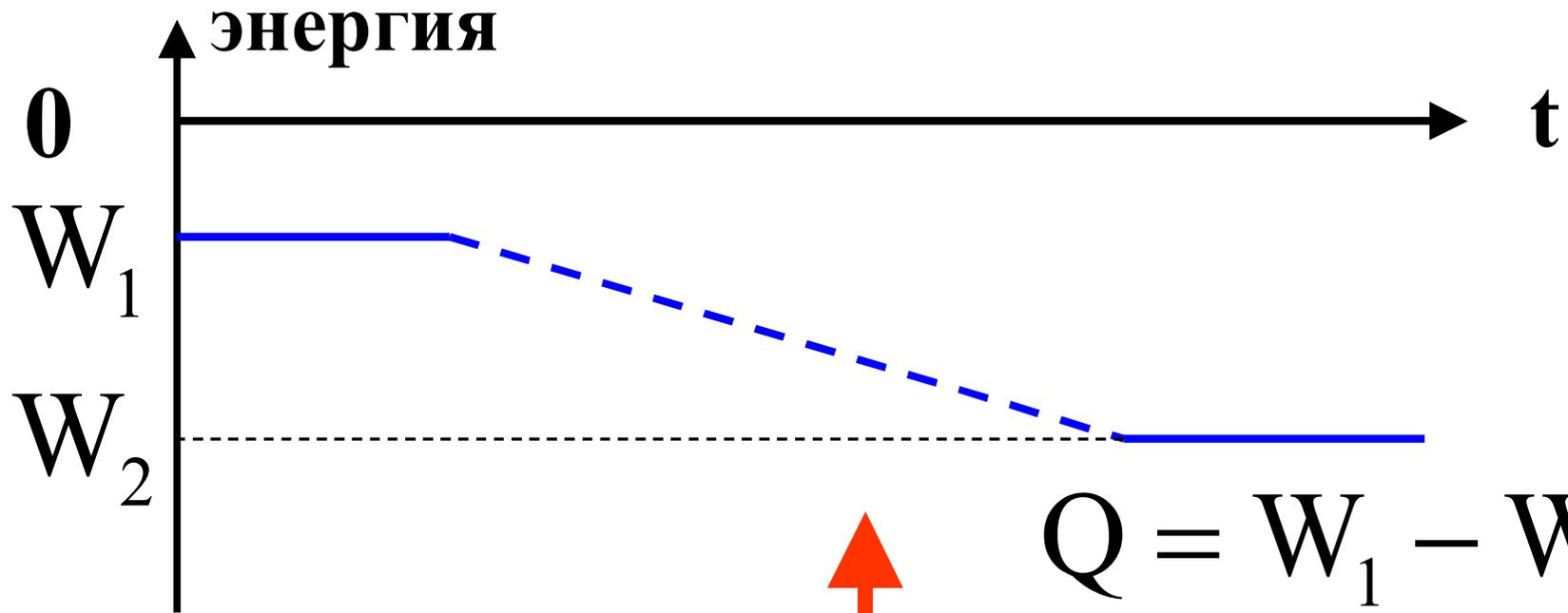
Энергия гравитационной дифференциации



Энергия гравитационной дифференциации



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

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

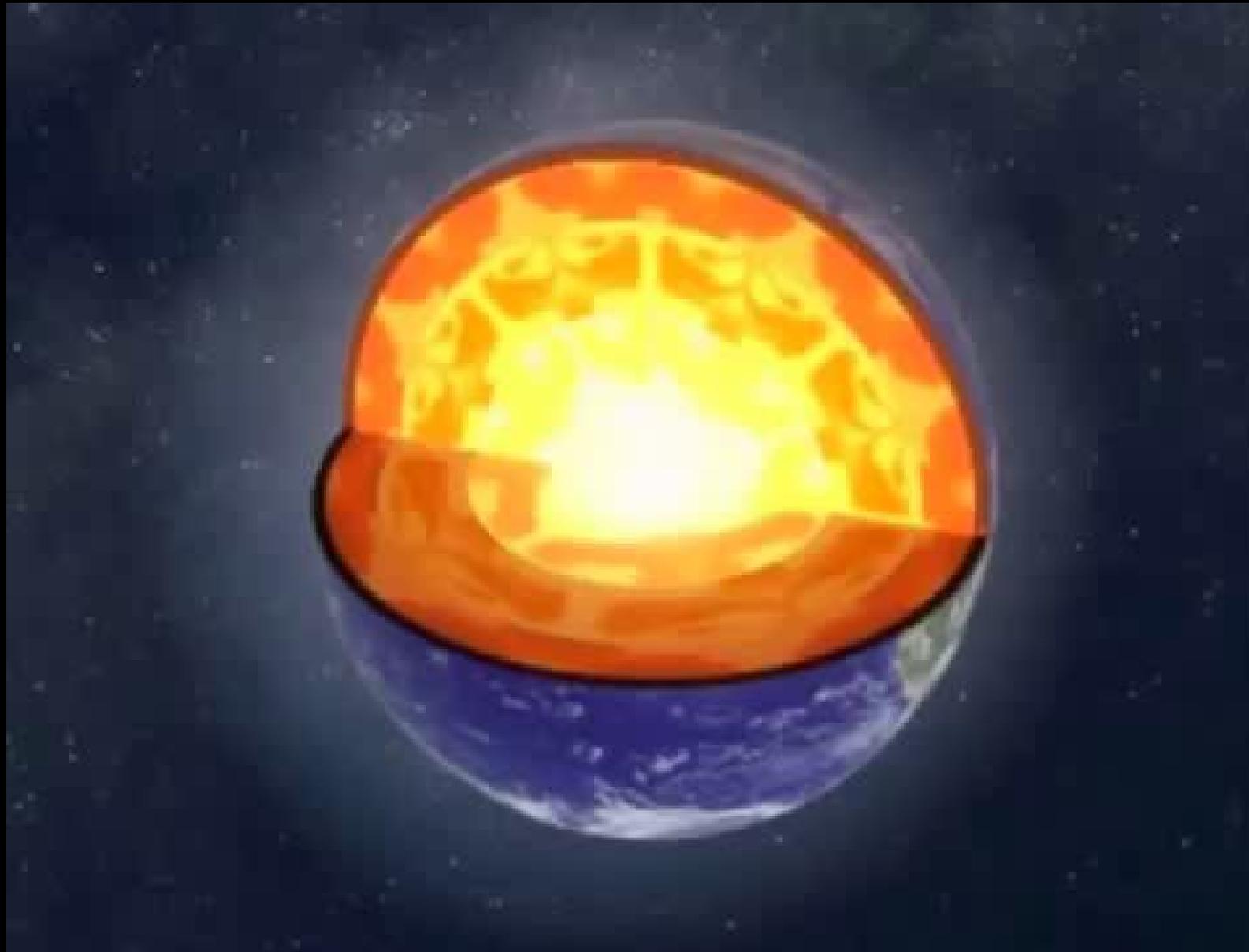
Коэффициент
температуро-
проводности
[м²/с]

возраст Земли

$4.6 \cdot 10^9$ лет !!!

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

Конвекция – эффективный механизм переноса тепла



Происхождение атмосферы и гидросферы Земли

Гипотеза 1

Атмосфера была захвачена из протопланетного облака в процессе аккреции

Основания для сомнений...

- 1. Летучие элементы не могли быть удержаны в зоне формирования планет земной группы из-за высокой температуры в этой области протопланетного диска**
- 2. Выметание первичных атмосфер солнечным ветром молодого Солнца**

Гипотеза 2 (современная концепция)

Атмосфера и гидросфера Земли образовались около 4 млрд. лет назад в результате дегазации мантии. Первичная атмосфера состояла из H_2O , CO_2 и др. газов (H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2S , NH_3 , HF , HCl , Ar)

O_2 отсутствовал

земное вещество сильно обеднено летучими и подвижными элементами и соединениями, в противном случае атмосфера и гидросфера были бы более мощными

Гипотеза 2 (современная концепция)

Атмосфера и гидросфера Земли образовались около 4 млрд. лет назад в результате дегазации мантии. Первичная атмосфера состояла из H_2O , CO_2 и др. газов (H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2S , NH_3 , HF , HCl , Ar)

Эксперимент «Царев-2» (ИДГ РАН)

СВЧ нагрев в вакууме метеоритного образца (обыкновен. хондрит класса L)

Выделяются: H_2 , N_2 , CH_4 , CO , H_2O , etc.

Гипотеза 2 (современная концепция)

«Судьба» основных соединений:

H_2O – гидросфера, атмосфера, ...

CO_2 – большая часть связана в горных породах и органическом веществе

N_2 – органическое вещество, осадочные породы, современная атмосфера

O_2 – в заметном количестве появился 1.5 млрд. лет назад, источники: **фотосинтез** (по мере развития жизни), фотодиссоциация пара

Гипотеза 3 (современная концепция)

**Атмосфера и гидросфера
сформировались в результате
интенсивной бомбардировки кометами
и астероидами из внешних областей
Солнечной системы на ранних этапах
эволюции**

**Условия
существования
атмосферы и
гидросферы**

Условие существования атмосферы

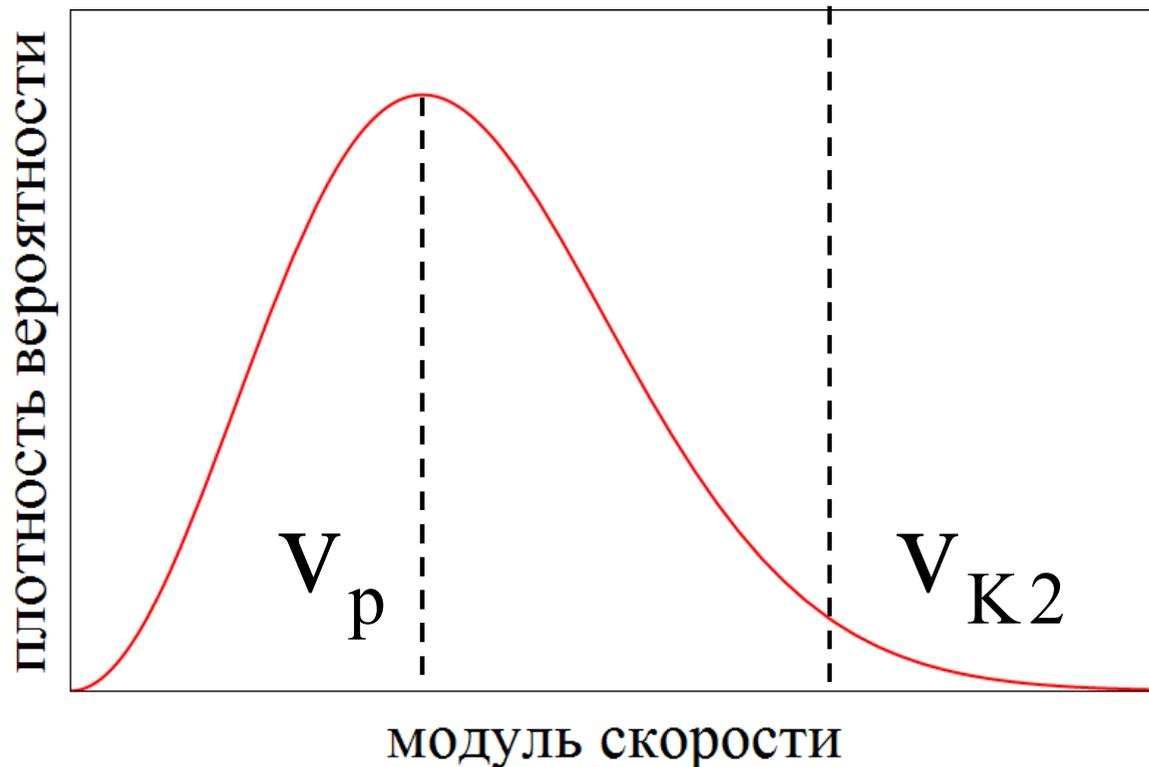
скорость тепл. движения < 2-й косм. скорости

$$V_{K2} = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} \approx \sqrt{2gR_{\oplus}} \approx 11.2 \text{ км/с}$$

Распределение Максвелла

наиболее
вероятная
тепловая
скорость

$$V_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$



Диссипация атмосфер – ускользание газов из атмосфер космических тел, вызванное тепловым движением атомов и молекул

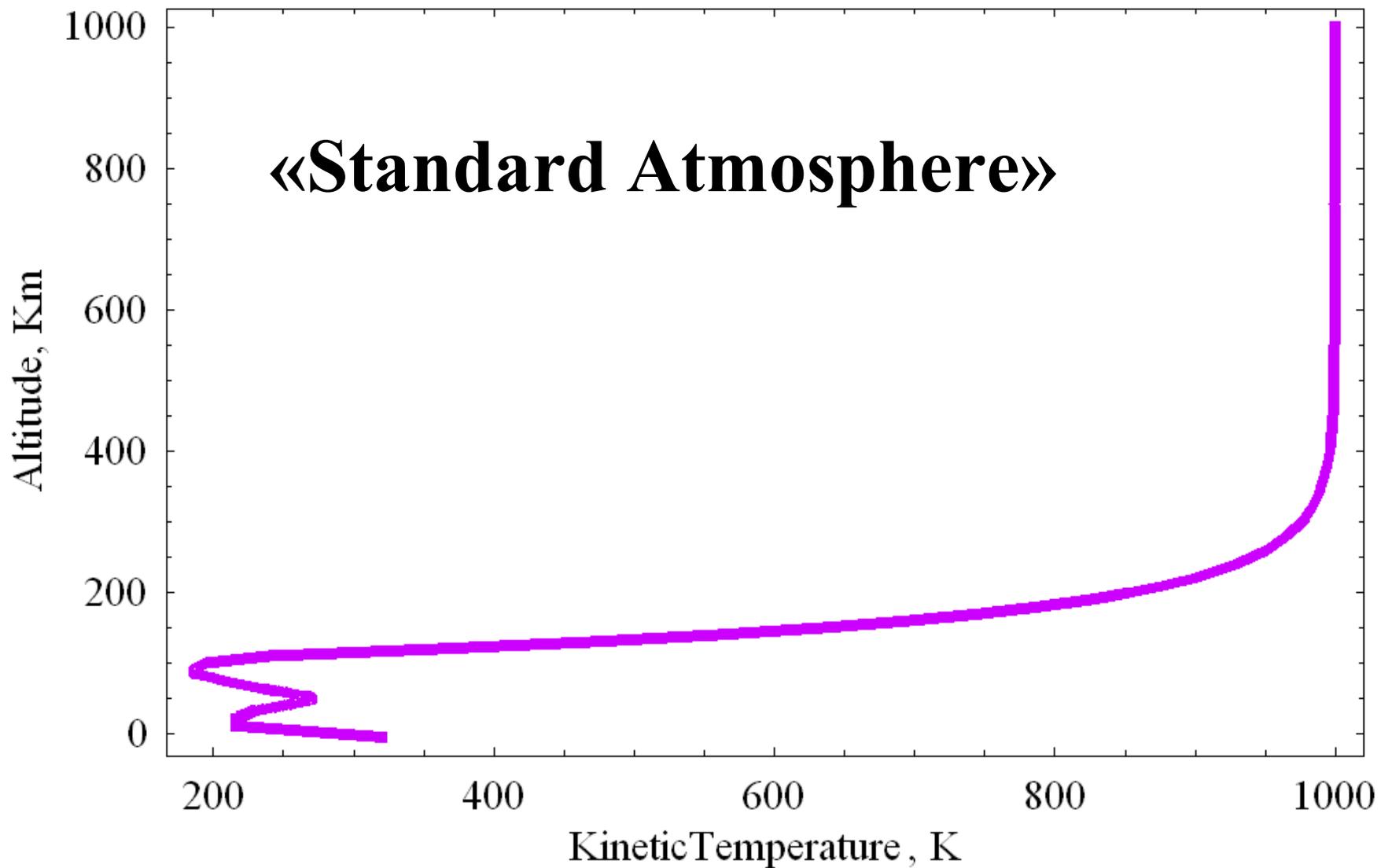
$$v_p < v_{K2}$$

условие не обеспечивает отсутствие диссипации

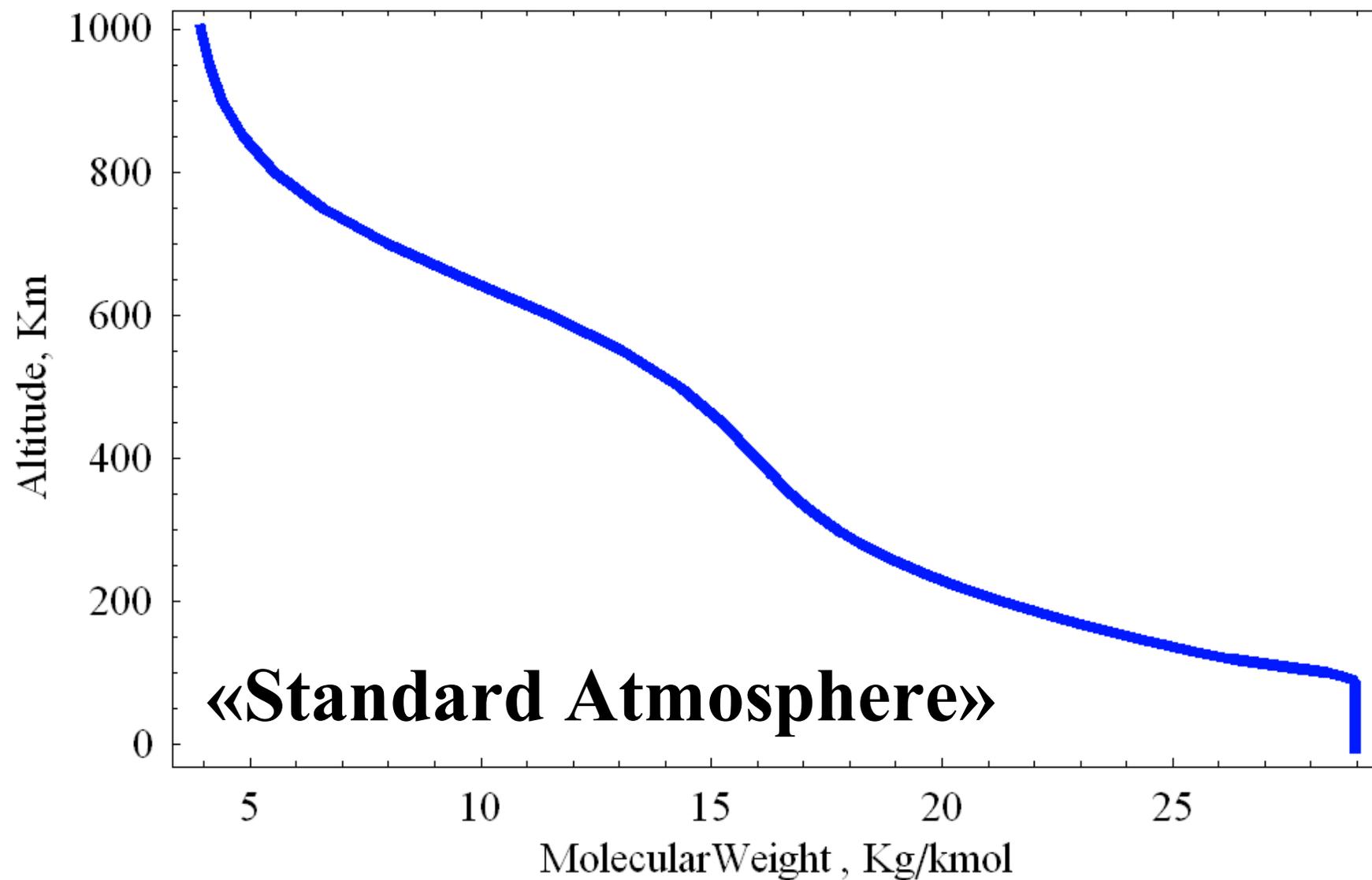
при $T = 300 \text{ K}$

$$\left. \begin{array}{l} v_{\text{H}_2} \approx 1.5 \text{ км/с} \\ v_{\text{N}_2} \approx 0.5 \text{ км/с} \end{array} \right\} < 11.2 \text{ км/с}$$

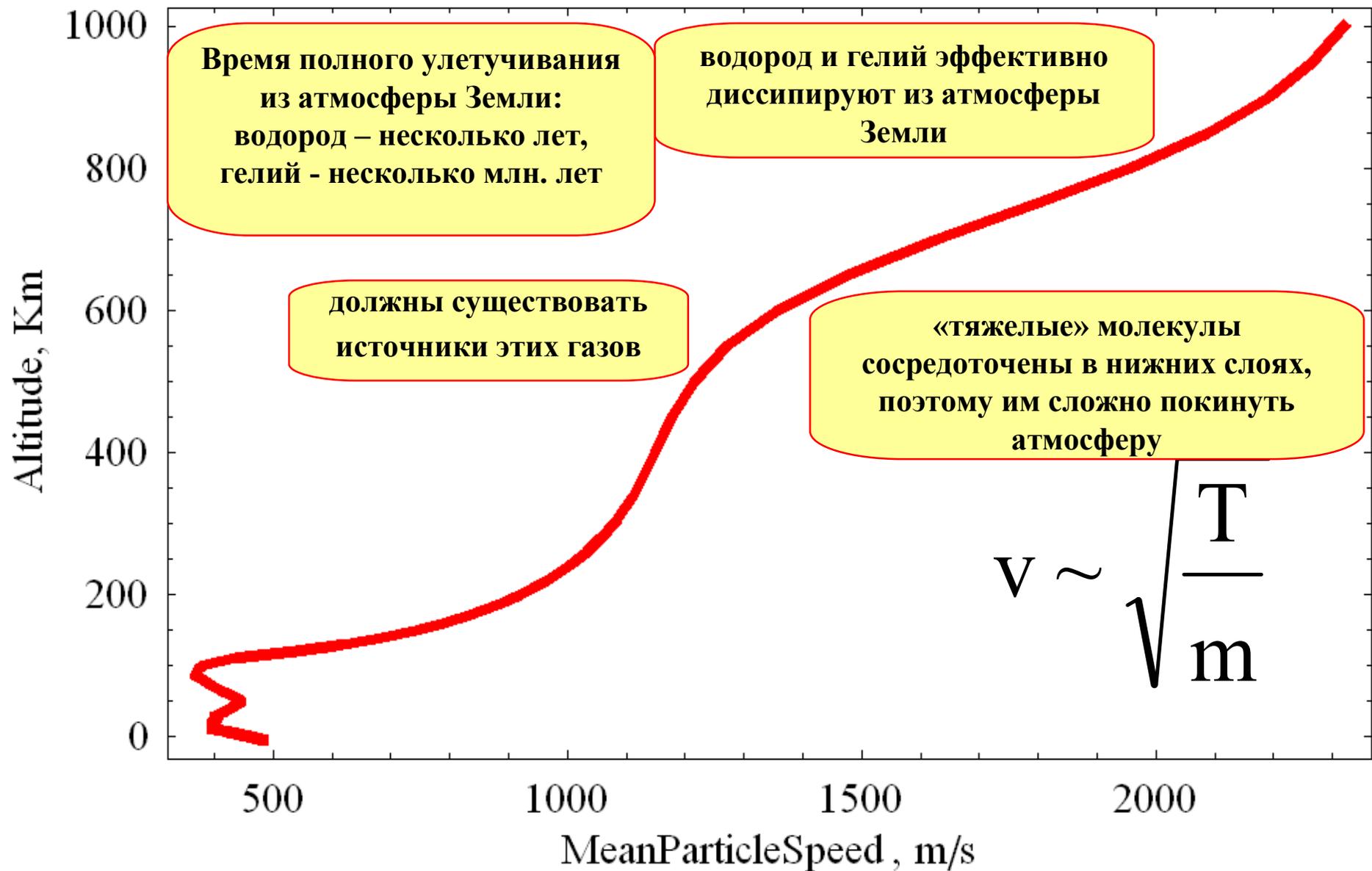
Зависимость температуры воздуха от высоты



Зависимость среднего молекулярного веса от высоты



Зависимость средней скорости от высоты



Состав атмосферы

**ПОСТОЯННЫЕ
КОМПОНЕНТЫ**

**переменные
КОМПОНЕНТЫ**

	% объема		% объема
Азот	78.11	Вода	0 – 7
Кислород	20.957	CO₂	0.01 – 0.1
Аргон	0.937	Озон	0 – 0.01

Постоянные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
Азот	N₂	28.016	78.110
Кислород	O₂	31.9986	20.957
Аргон	Ar	39.942	0.937
Неон	Ne	20.182	0.001818
Гелий	He	4.003	0.000524
Криптон	Kr	83.80	0.000114
Ксенон	Xe	131.3	0.0000087
Водород	H ₂	2.016	0.00005
Метан	CH ₄	18.043	0.0002
Закись азота	N ₂ O	44.015	0.00005

Переменные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
Вода	H_2O	18.005	0 – 7
Двуокись углерода	CO_2	44.009	0.01 – 0.1 у пов-ти среднее 0.032
Озон	O_3	47.998	0 – 0.01
Двуокись серы	SO_2	64.064	0 – 0.0001
Двуокись азота	NO_2	46.007	0 – 0.000002

Масса атмосферы

$\sim 5 \cdot 10^{18}$ кг

Масса Земли

$\sim 6 \cdot 10^{24}$ кг

Ингредиенты Солнечной системы

металлы

и

силикаты

0.6%

легкие газы

и

льды

99.4%

90% массы атмосферы в слое 16.3 км

99% массы атмосферы в слое 32.2 км

Радиус Земли

6371 км

Зависимость давления воздуха от высоты

