

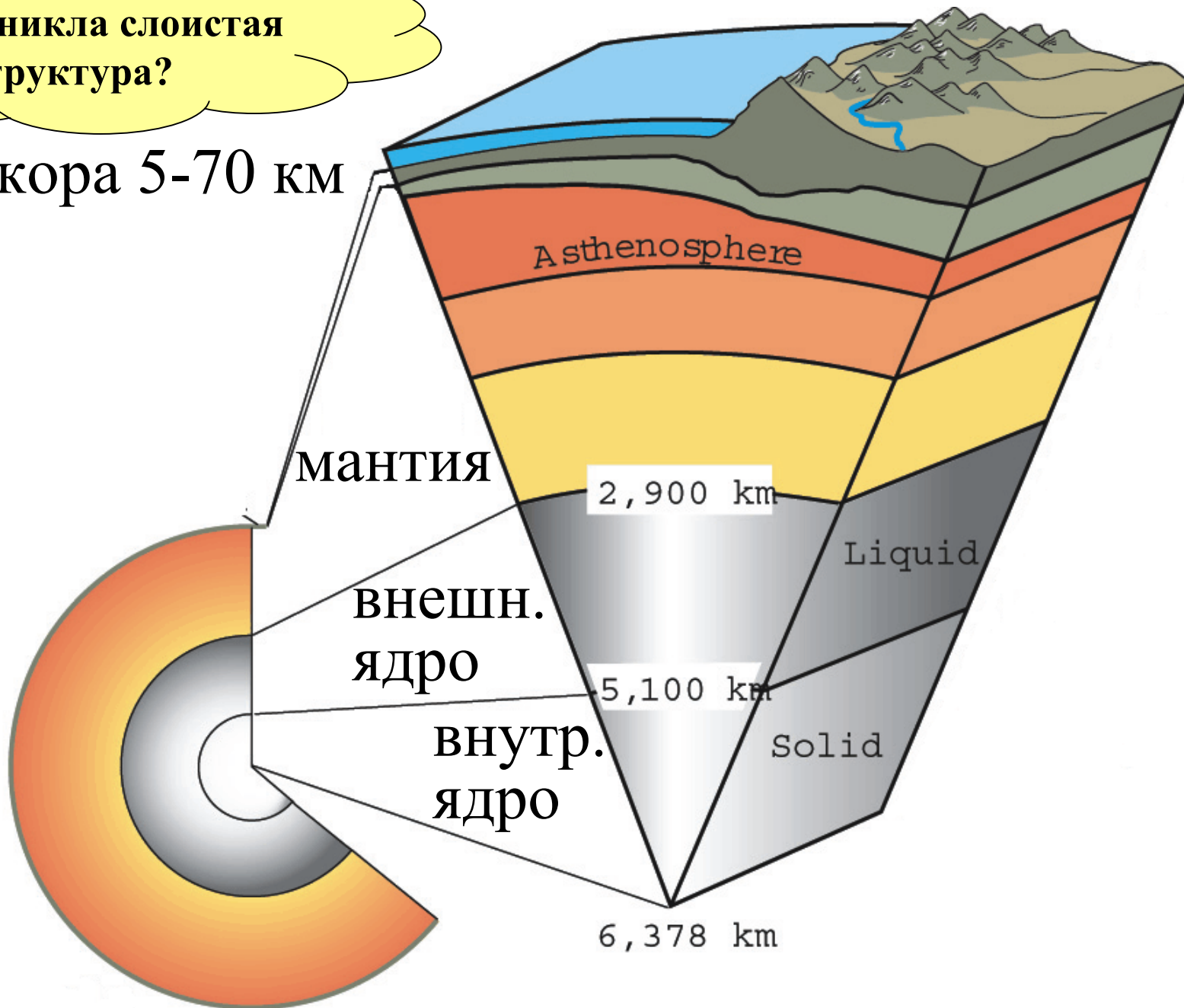
# АТМОСФЕРА И ГИДРОСФЕРА ЗЕМЛИ



- происхождение
- условия существования
- состав
- элементы структуры

Как возникла слоистая структура?

кора 5-70 км



# Источники энергии в недрах Земли

1. Распад радиоактивных U, Th,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$
2. Гравитационная дифференциация
3. Приливная диссипация
4. Гравитационное сжатие
5. Химические реакции и фазовые переходы (источники и стоки энергии)

# Источники энергии в недрах Земли

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

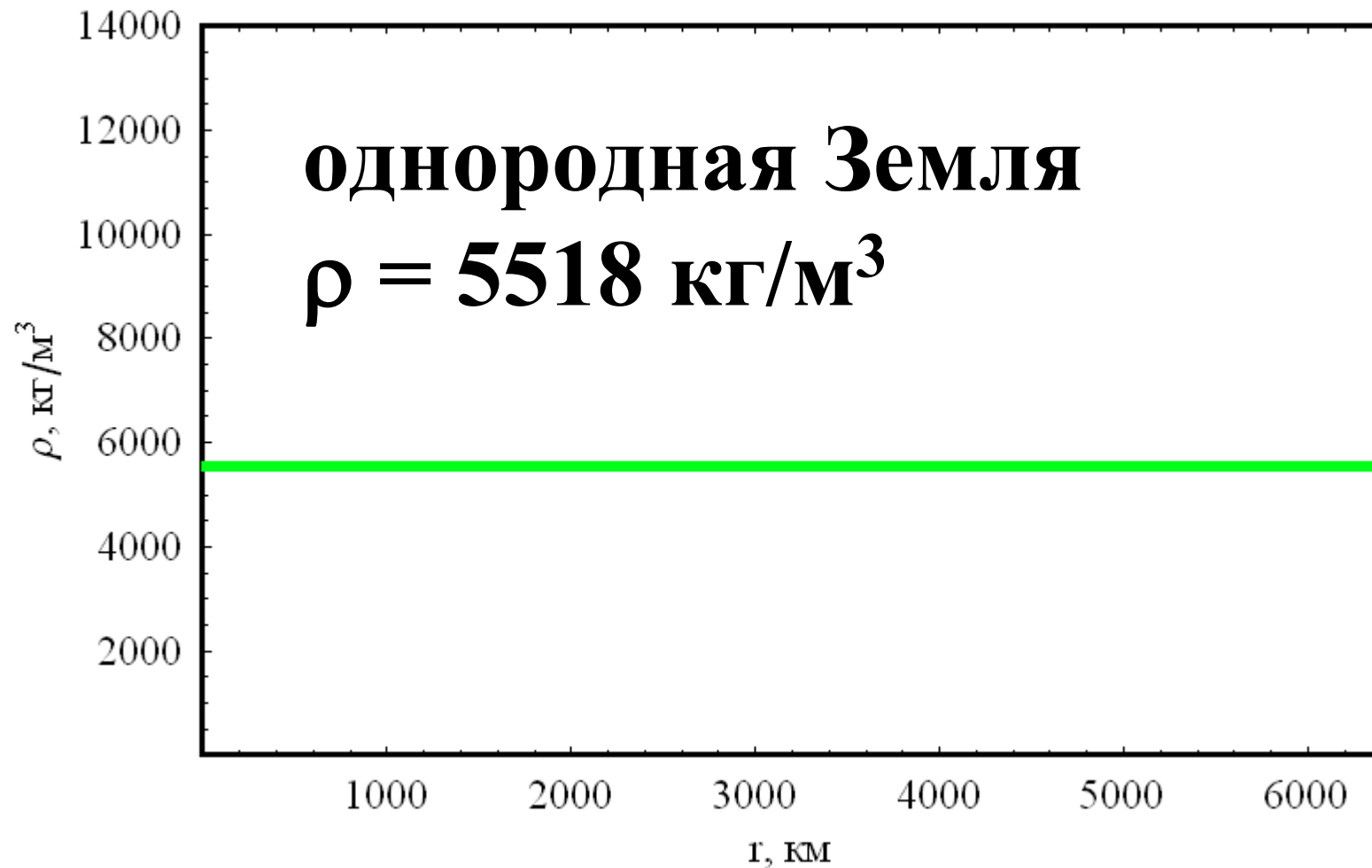
2. Гравитационная дифференциация

3. Приливная диссипация

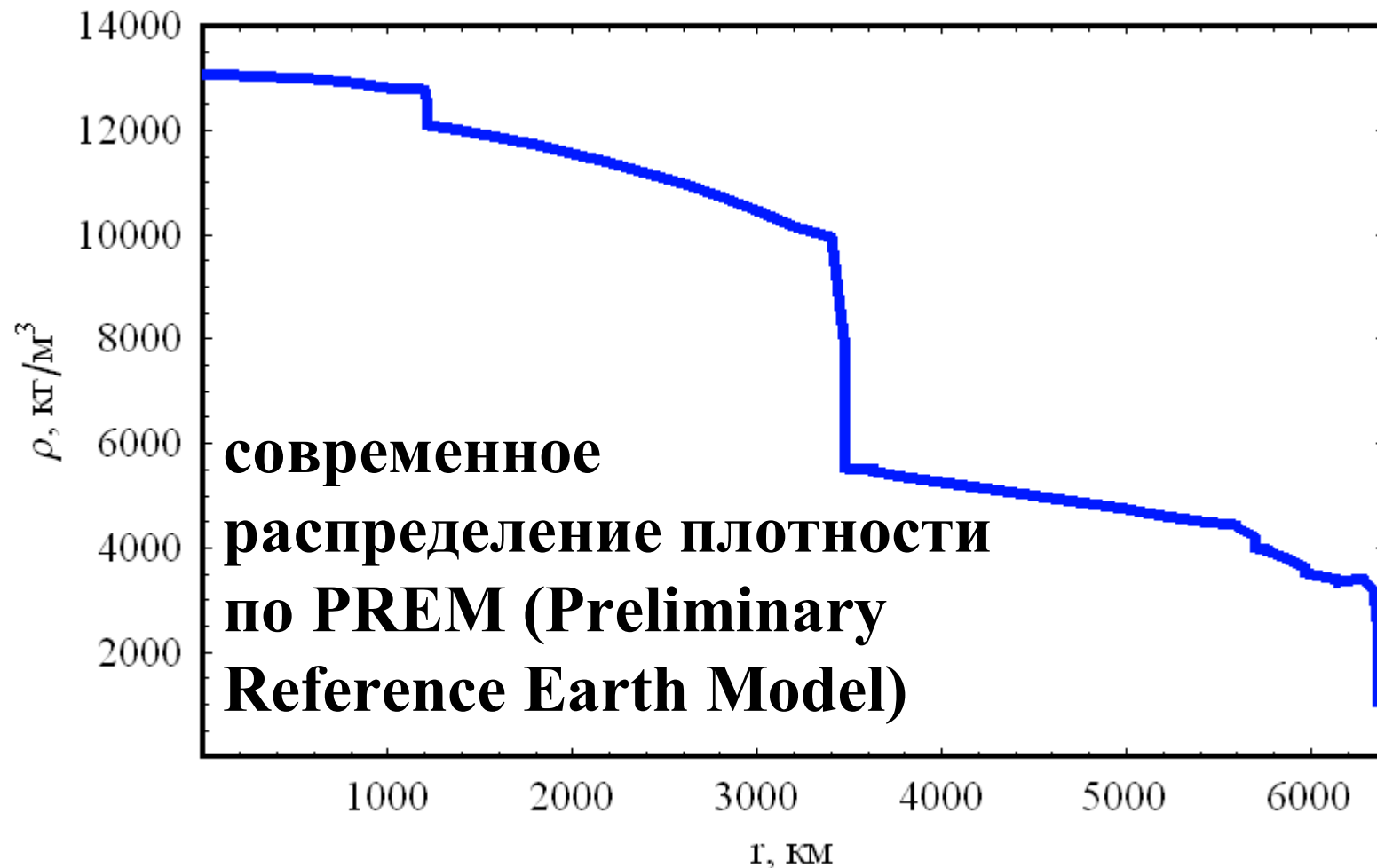
4. Гравитационное сжатие

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

# Энергия гравитационной дифференциации

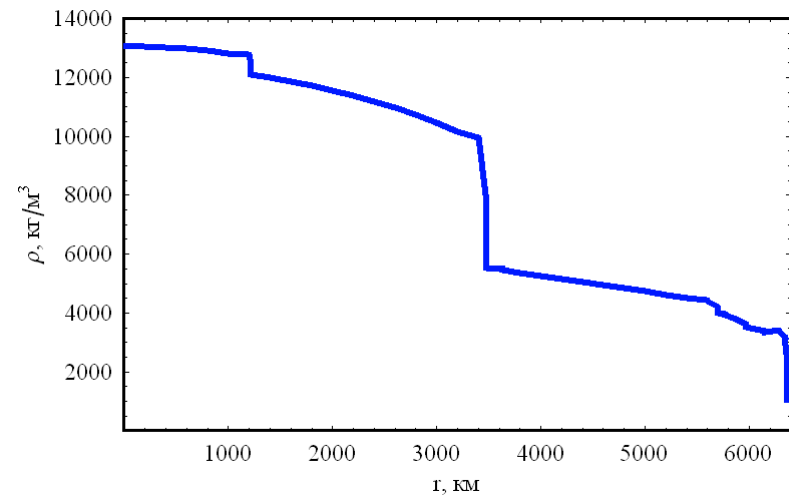
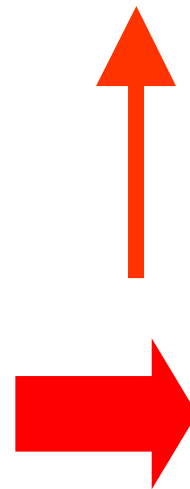
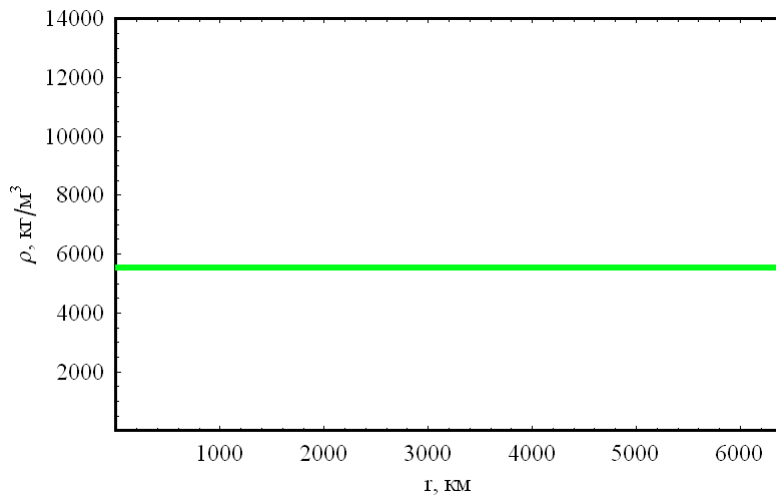


# Энергия гравитационной дифференциации

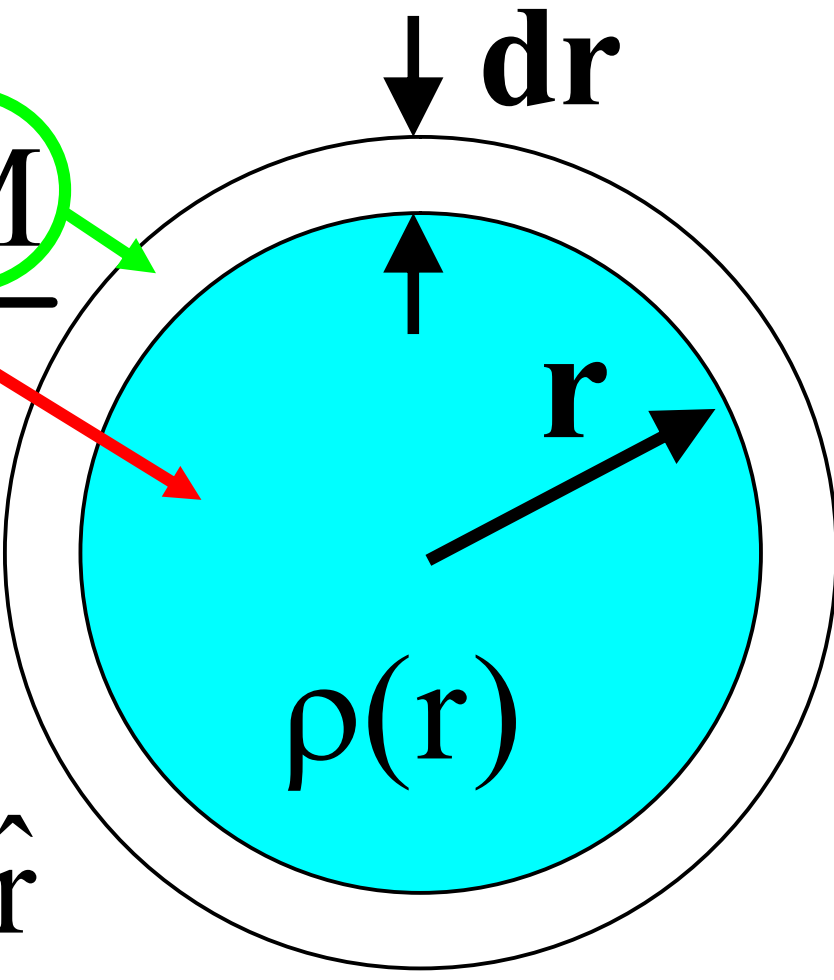


# Энергия гравитационной дифференциации

$$Q = W_1 - W_2$$



# Энергия гравитационной дифференциации

$$dW = -G \frac{M dM}{r}$$
$$dM = 4\pi r^2 \rho(r) dr$$
$$M = \int_0^r 4\pi \hat{r}^2 \rho(\hat{r}) d\hat{r}$$




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

если  $\rho = M_3 / \frac{4\pi}{3} R^3 = \text{const} \neq f(r)$

$$W = -G \frac{16}{15} \pi^2 \rho^2 R^5 = -\frac{3}{5} \frac{GM_3^2}{R} = -A$$

$$A = G\rho^{1/3} \left( \frac{4\pi}{3} \right)^{1/3} \frac{3}{5} M_3^{5/3}$$

**энергия  
аккреции**

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

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

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

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

**Энергия гравитационной  
дифференциации**

# Время тепловой релаксации шара

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

6 371 000 м

$\chi$

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

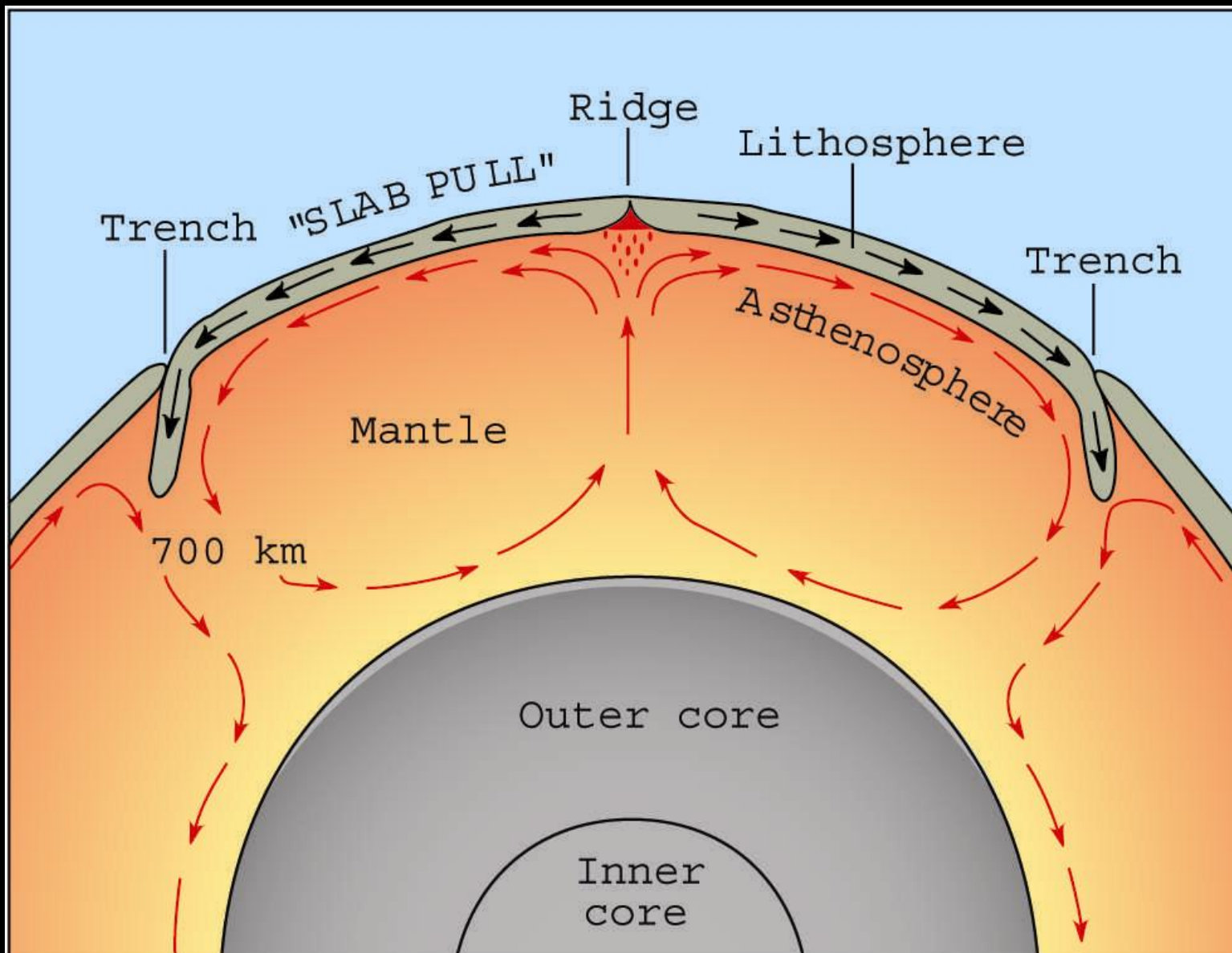
Коэффициент  
температуро-  
проводности  
[м<sup>2</sup>/с]

**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

# **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  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и др. газов ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{Ar}$ )

□  $\text{O}_2$  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  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и др. газов ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{Ar}$ )

### Эксперимент «Царев-2» (ИДГ РАН)

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

Выделяются:  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , 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**

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

# **Условие существования атмосферы**

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

$$v_{K2} = \sqrt{2GM/R} \approx \sqrt{2gR} \approx 11.2 \text{ км/с}$$

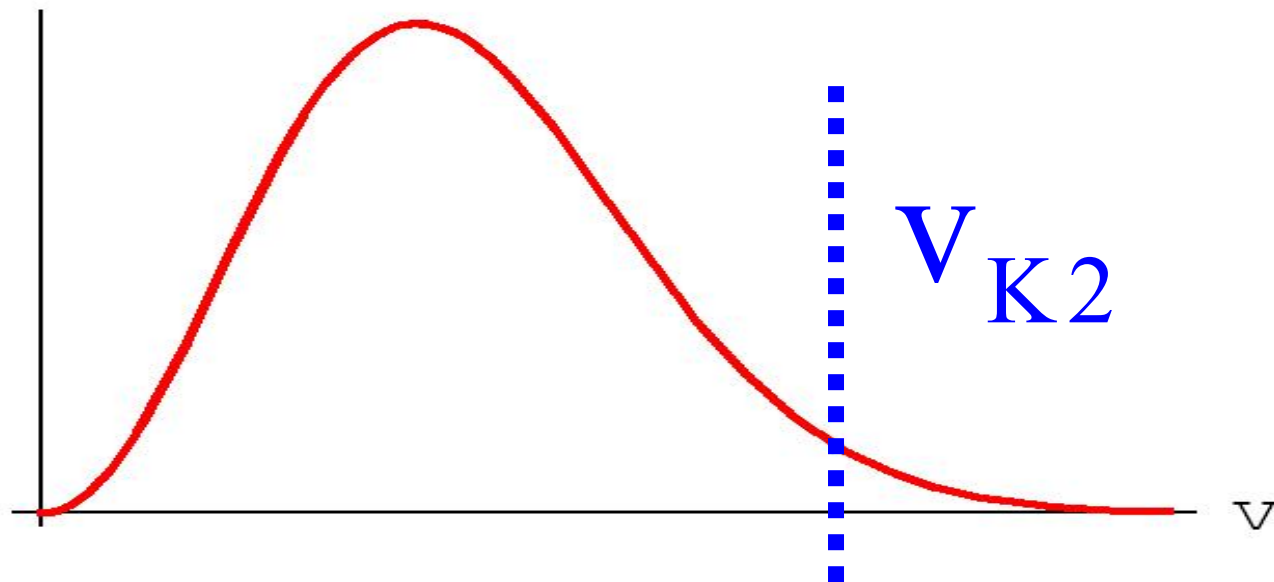
**наиболее вероятная тепловая скорость**

$$v = \sqrt{2kT/m}$$

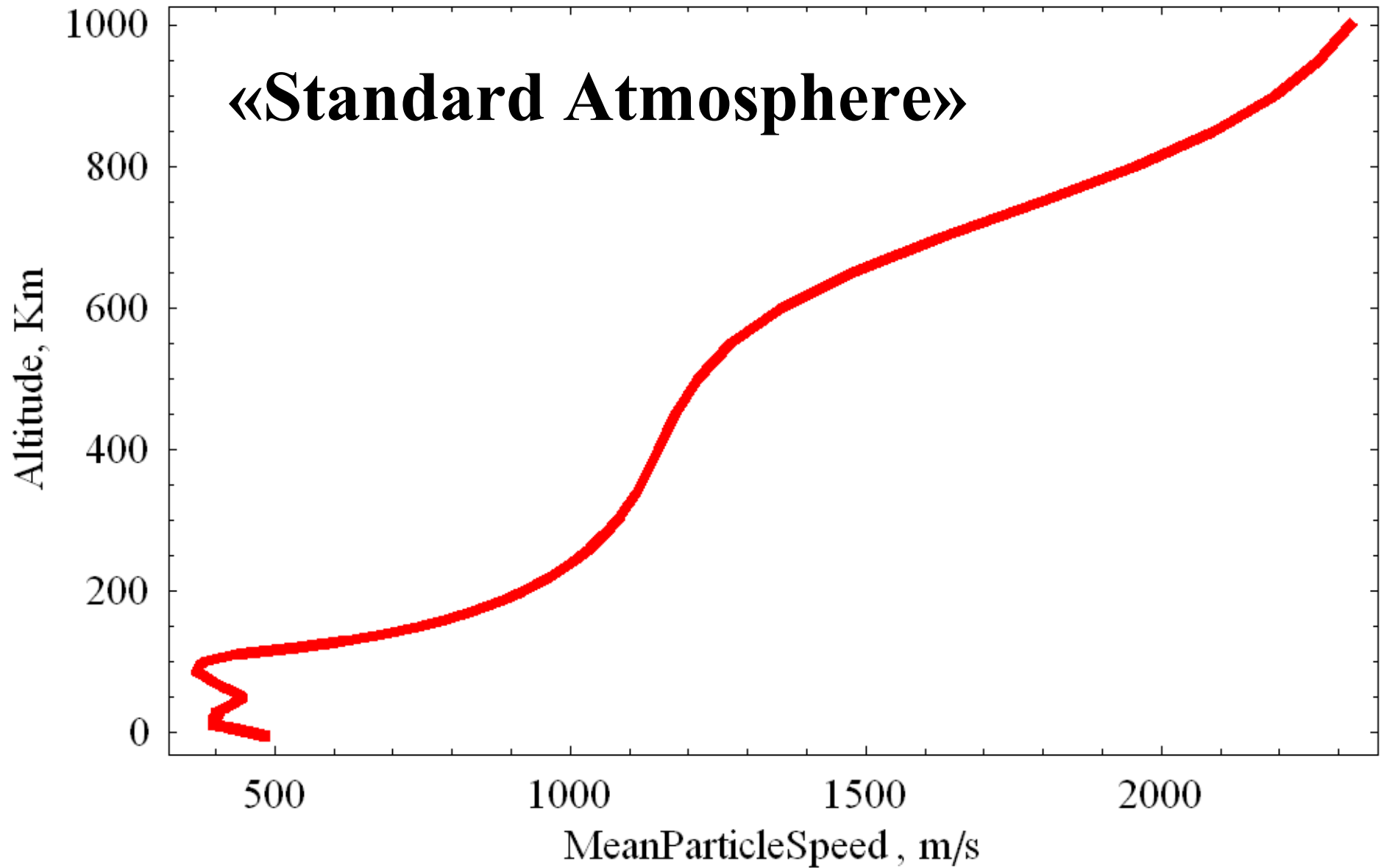
при  $T = 300 \text{ K}$

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

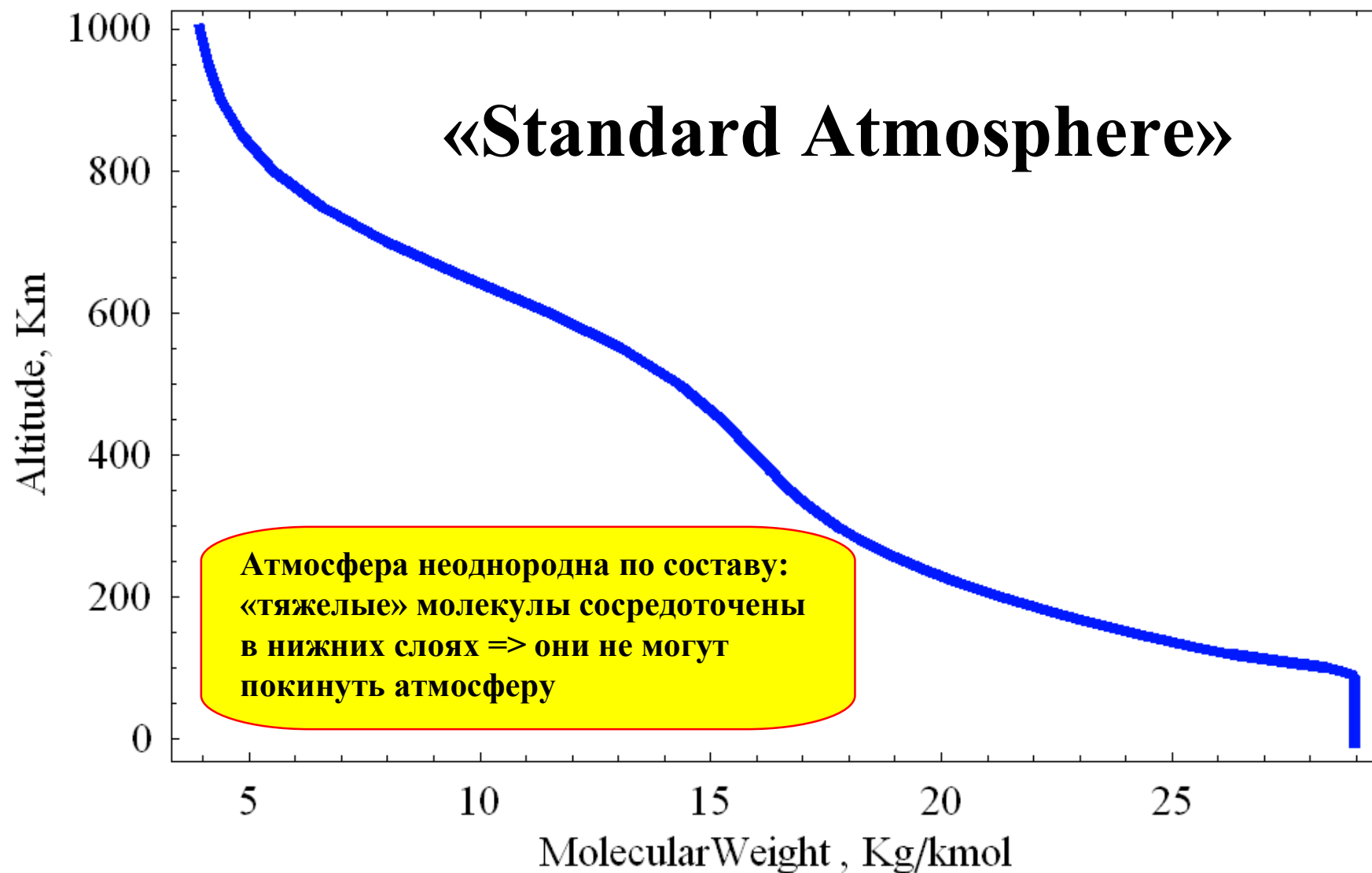
$f(v)$  **Распределение Максвелла**



# Зависимость средней скорости от высоты



# Зависимость среднего молекулярного веса от высоты



**Только водород и гелий эффективно  
диссипируют из атмосферы Земли**

**Время полного улетучивания  
газов из атмосферы Земли**

**• Водород – несколько лет**

**• Гелий – несколько млн. лет**

**⇒ должны существовать источники этих газов**



# Критерий устойчивости атмосферы

Время диссипации атмосферы превышает время существования планеты

В верхних (!) слоях атмосферы

$$v \ll v_{K2} \quad \Rightarrow \quad \frac{kT}{m} \ll \frac{GM}{R}$$

\*\*\*диссипация компенсируется источниками