

# Геофизика



---

2024 Лекция №1

---

Носов Михаил Александрович

*отделение геофизики, физический факультет МГУ*

---

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

# Разделы курса:

- *Физика атмосферы*
- *Физика гидросферы*
- *Физика твердой Земли*

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

# **Отделение геофизики (ОГФ) физического факультета МГУ**

**кафедра физики атмосферы**

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

**кафедра физики моря и вод суши**

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

**кафедра физики Земли**

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

**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**

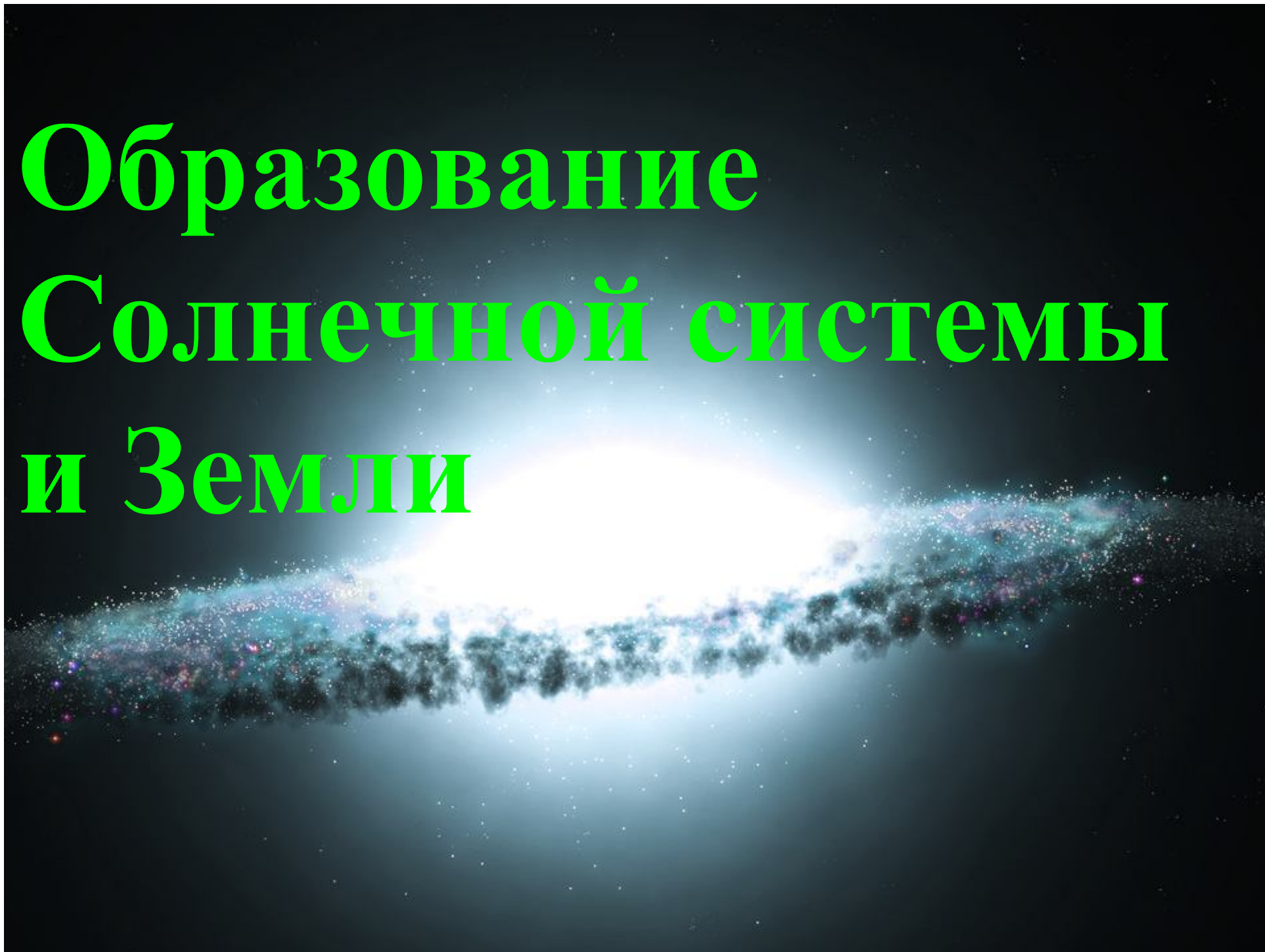
# Математические проблемы, имеющие прямое отношение к геофизике:

- ❑ **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.

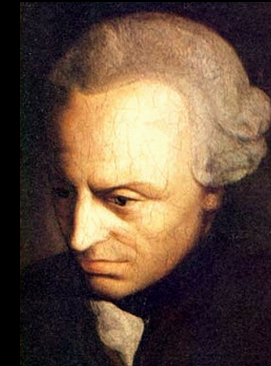


**Жорж-Луи Леклерк де Бюффон (1707-1788)**

**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)

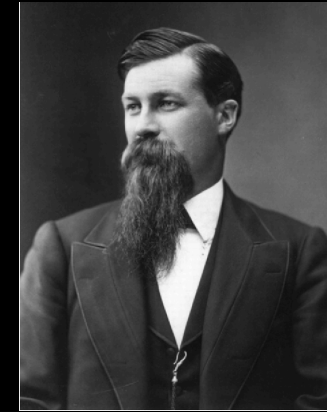
# Ранние гипотезы происхождения Земли

**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)**

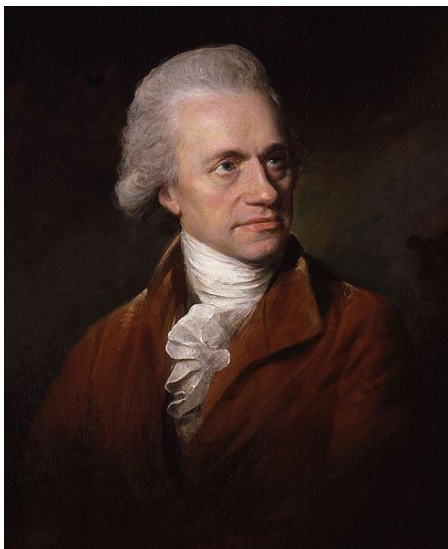


**Артур  
Стэнли  
Эддингтон  
1882-1944  
английский  
астрофизик**

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

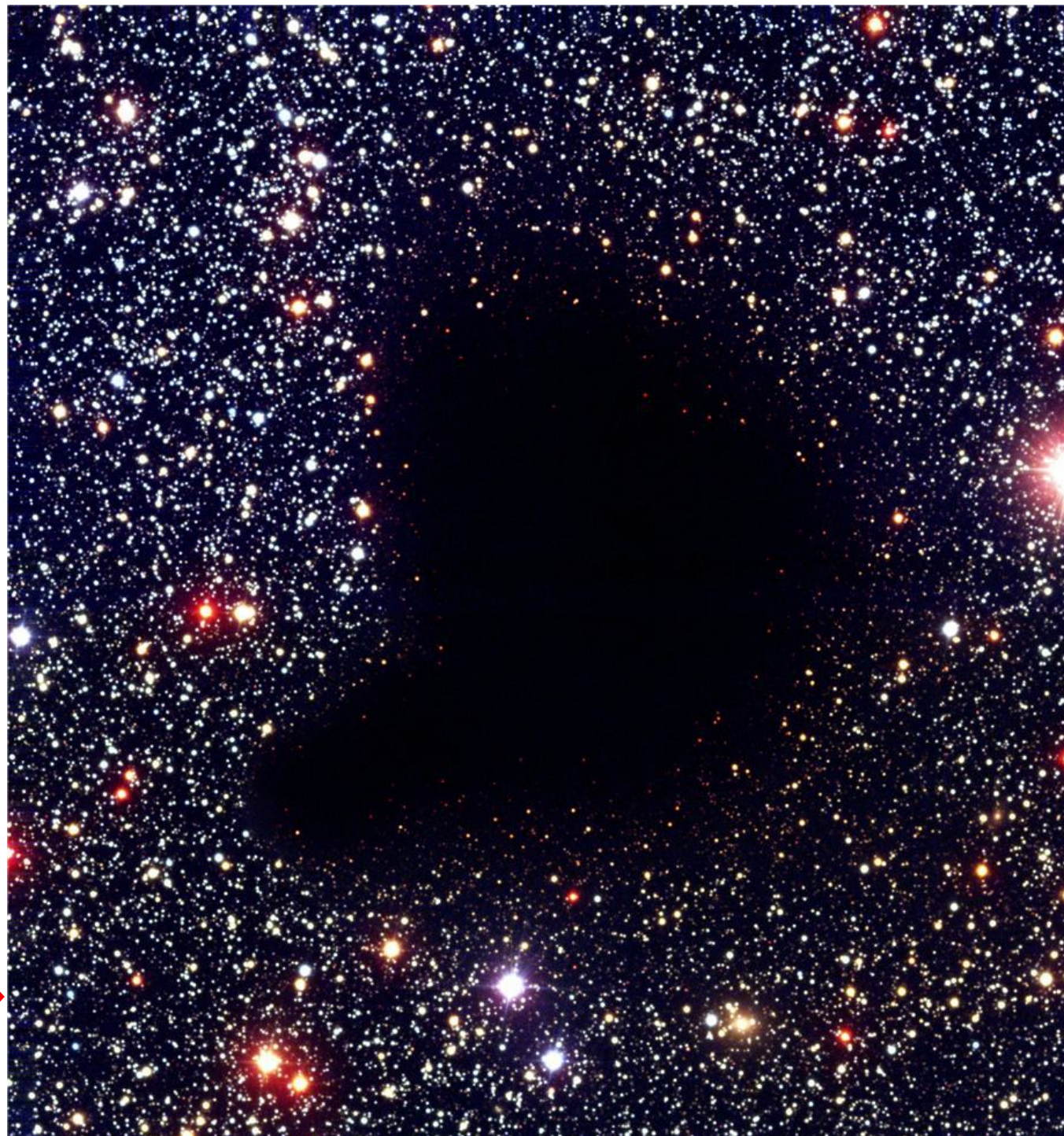
Eddington A. S. The Internal  
Constitution of the Stars // The  
Scientific Monthly Vol. 11,  
No.4 (Oct., 1920), pp. 297-303





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

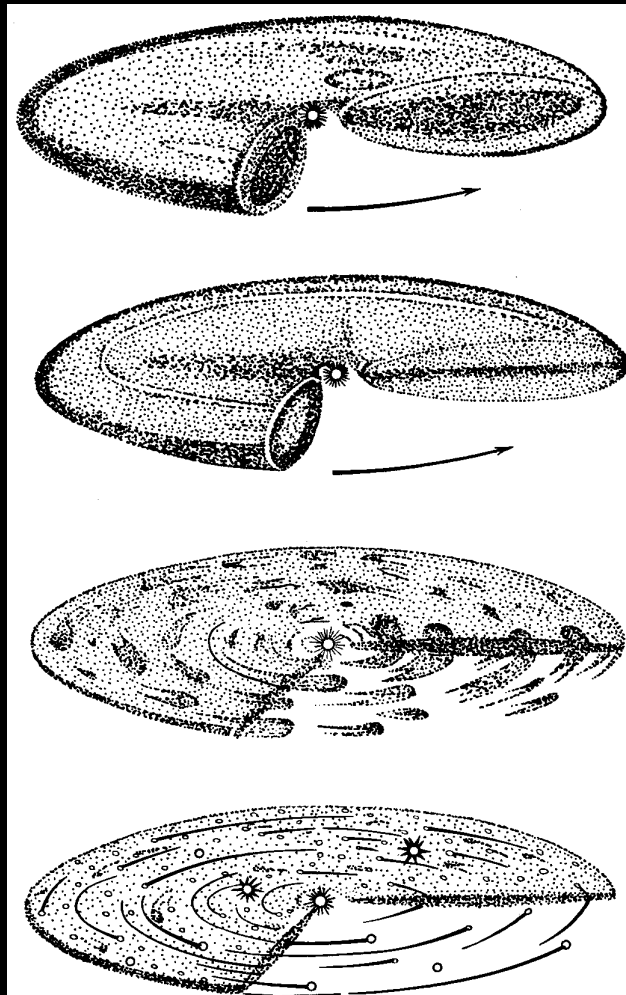
**«Здесь,  
вероятно,  
дыра в небе!»**



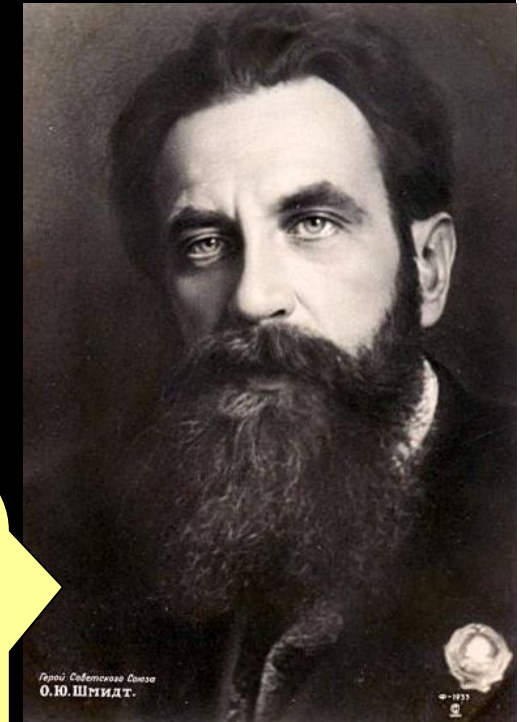


# Ранние гипотезы происхождения Земли

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

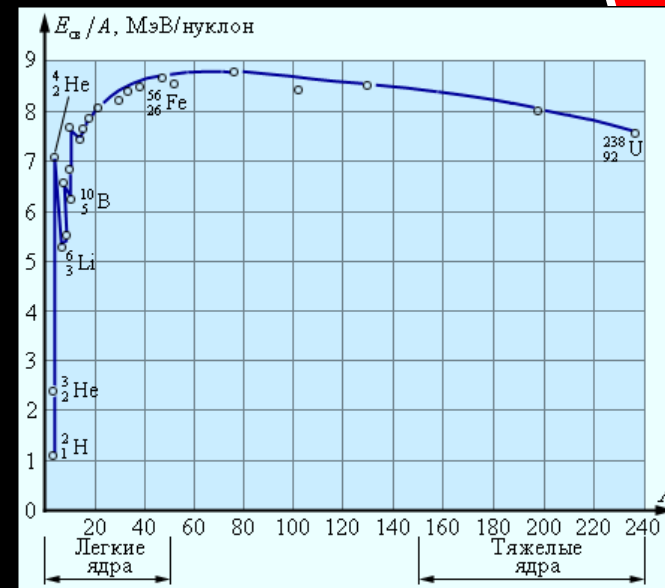
???

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 <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O	~150 K	1.4%
<i>легкие газы</i>		
H, He	-	98%

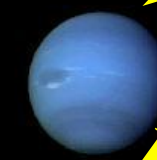
# Аккреционный диск

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

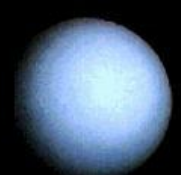
Данные наблюдений подтверждают:

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

~~ПЛУТОН~~



Нептун



Уран



Сатурн



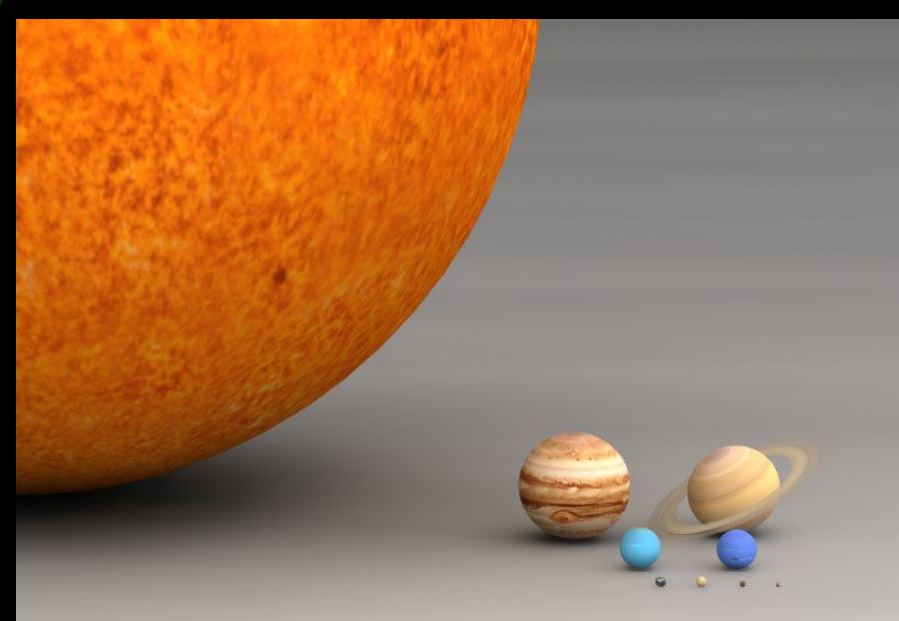
Юпитер

Марс

Земля

Венера

Меркурий

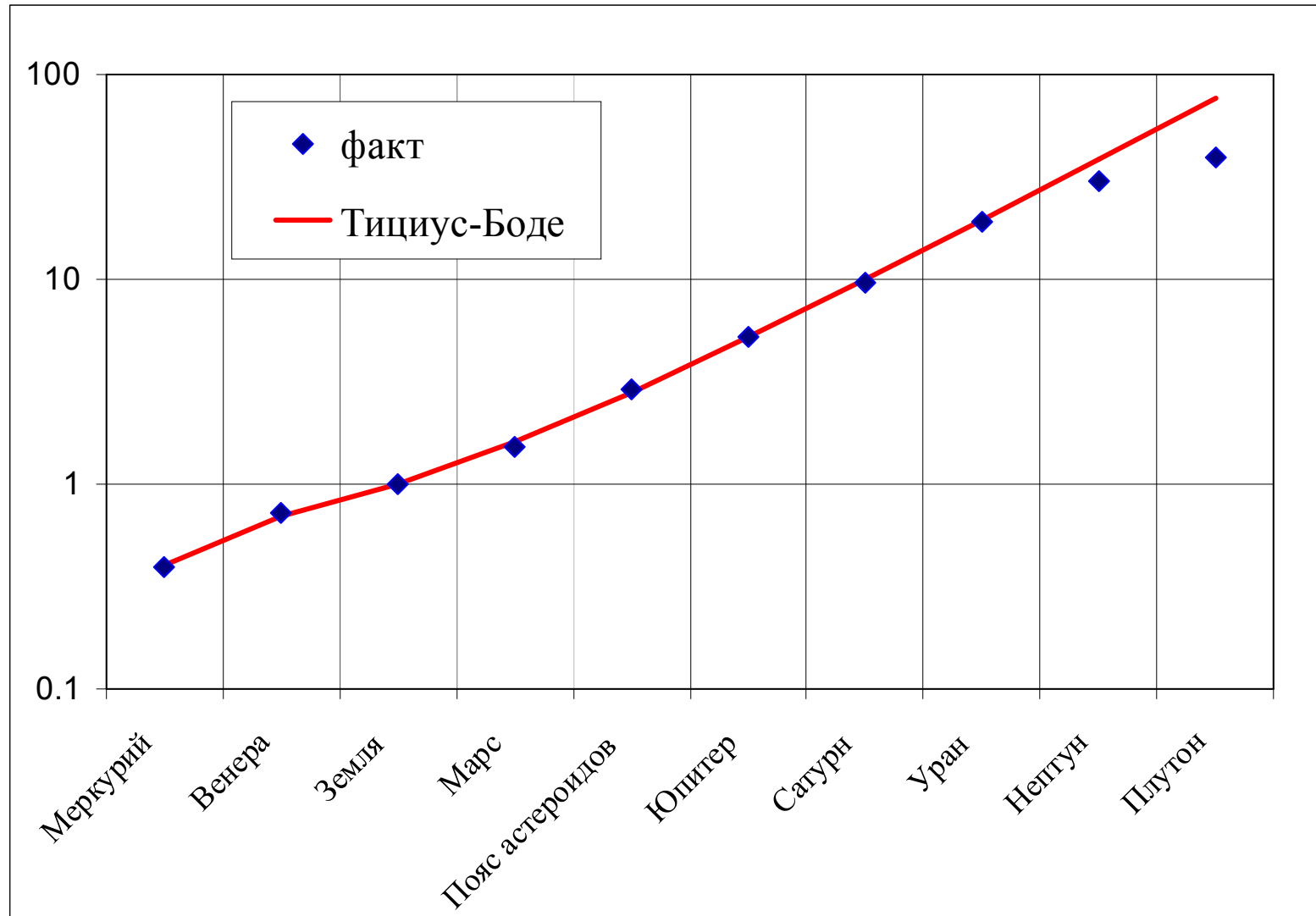


# **Модель образования Солнечной системы должна объяснять следующий набор наблюдаемых фактов:**

- 1. Все планеты движутся по эллиптическим орбитам в одном направлении**
- 2. Орбиты всех планет (кроме Плутона -  $17^\circ$ ) лежат в единой плоскости (различие не превышает  $6^\circ$ )**
- 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

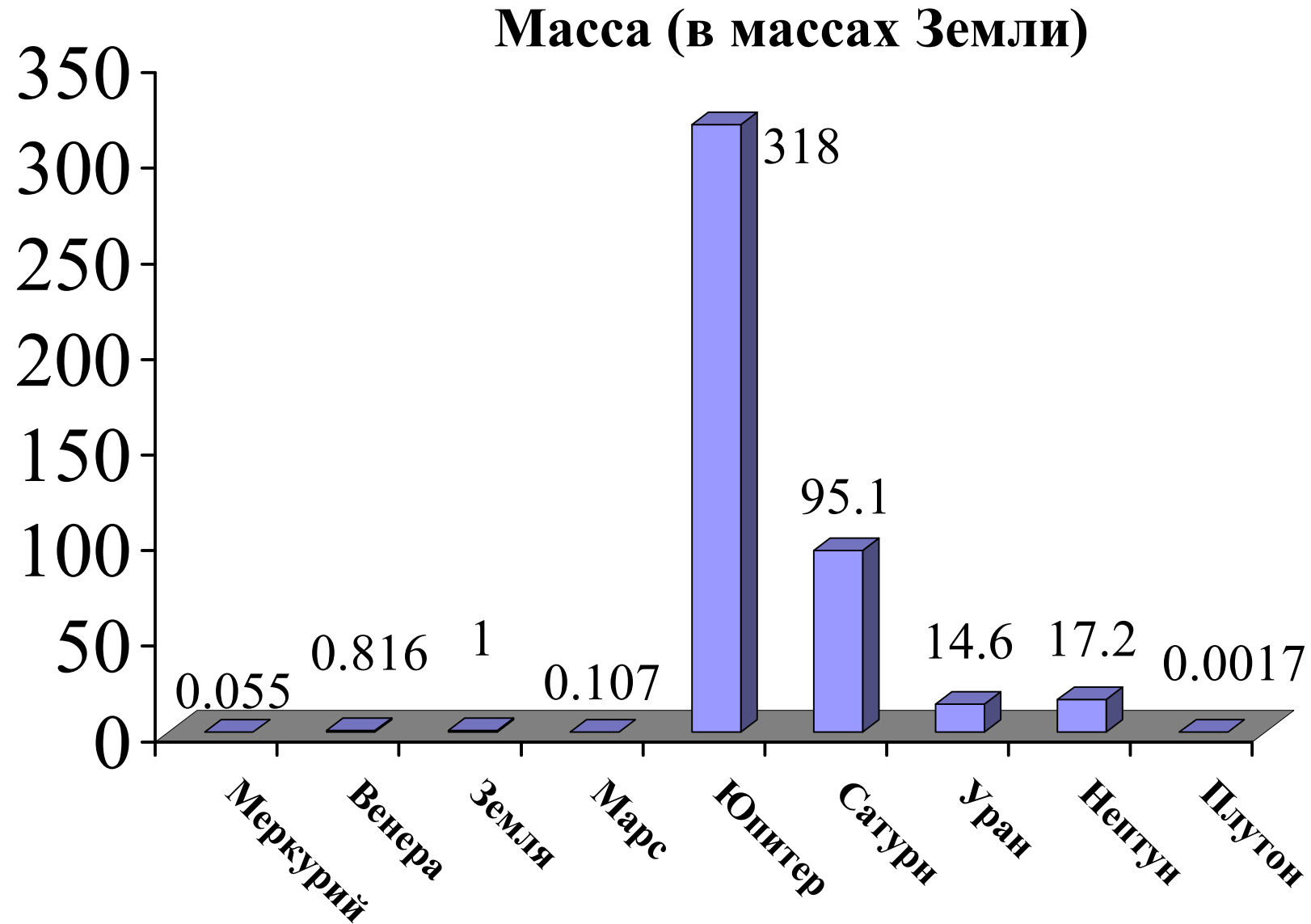


## 6. Закономерное изменение радиуса



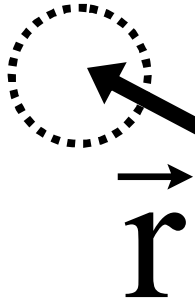


## 7. Закономерное изменение массы



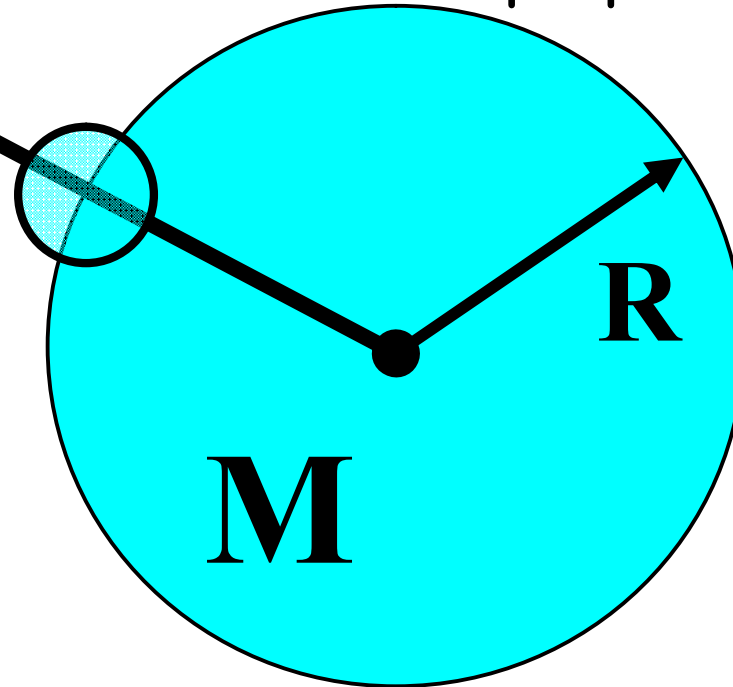
# Энергия аккреции

$dM$



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

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



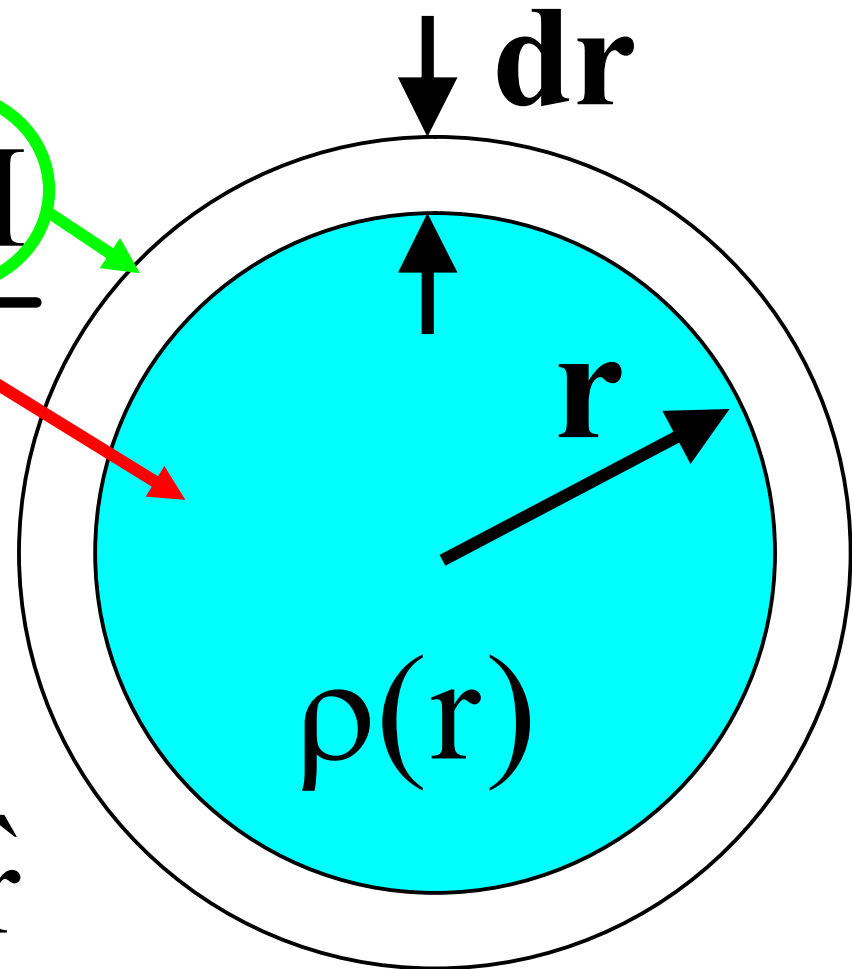
$$dW = -dA$$

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!**

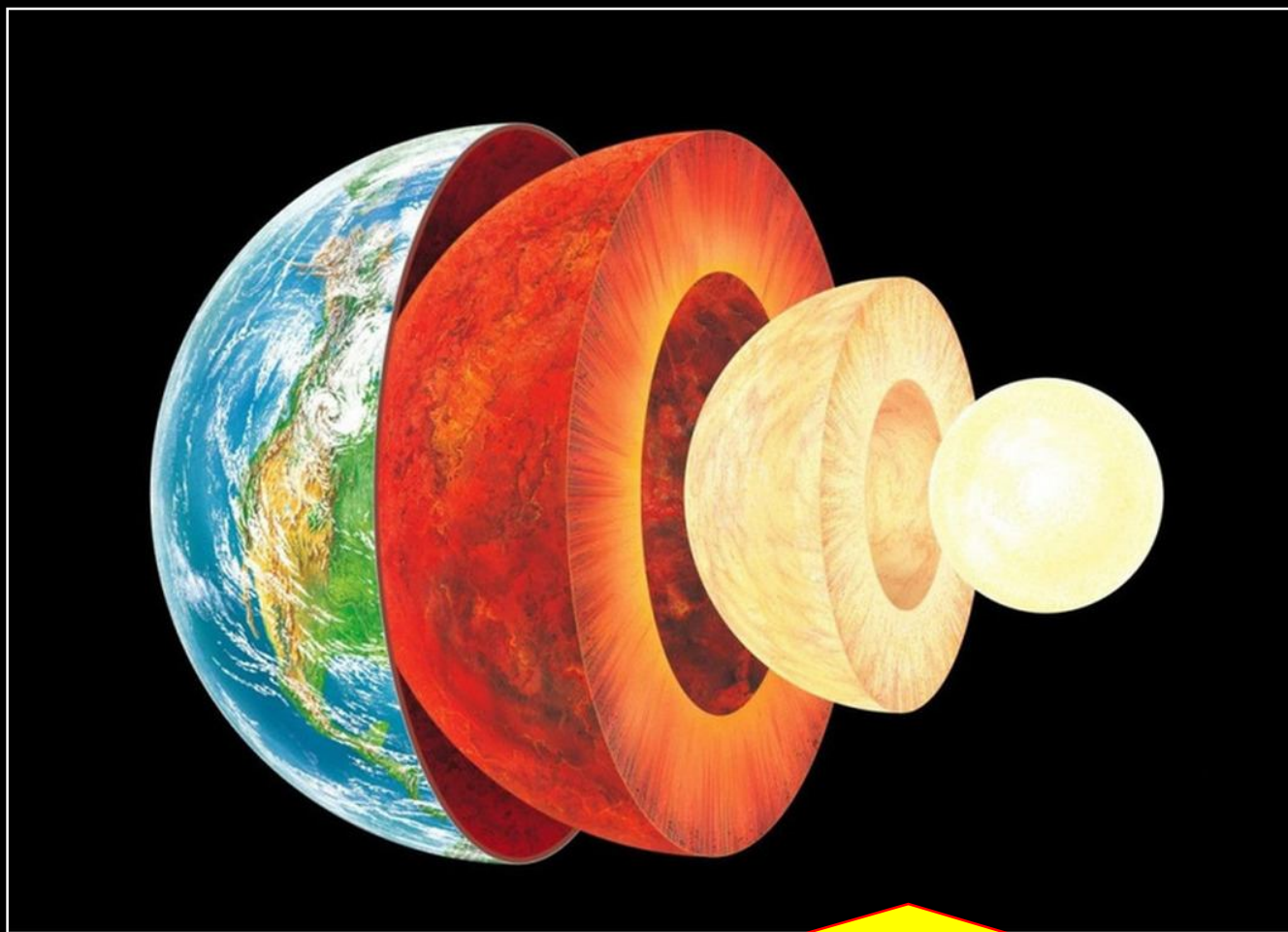
Солнце  $\rightarrow$  Земля

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

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

**При времени роста  $\sim 10$  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,  $^{40}\text{K}$ ,  
 $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$

2. Гравитационная дифференциация

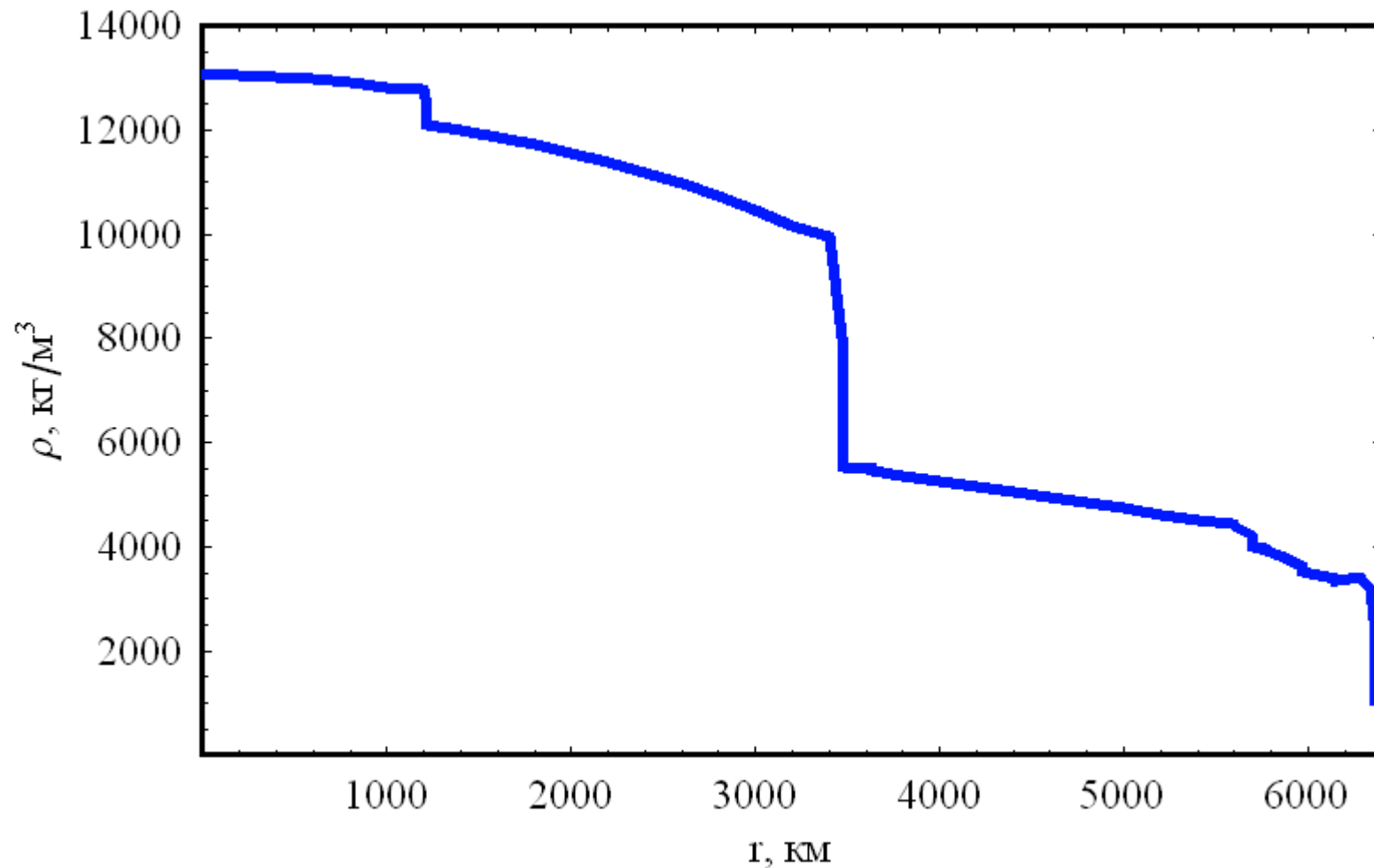
3. Приливная диссипация

4. Гравитационное сжатие

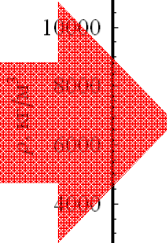
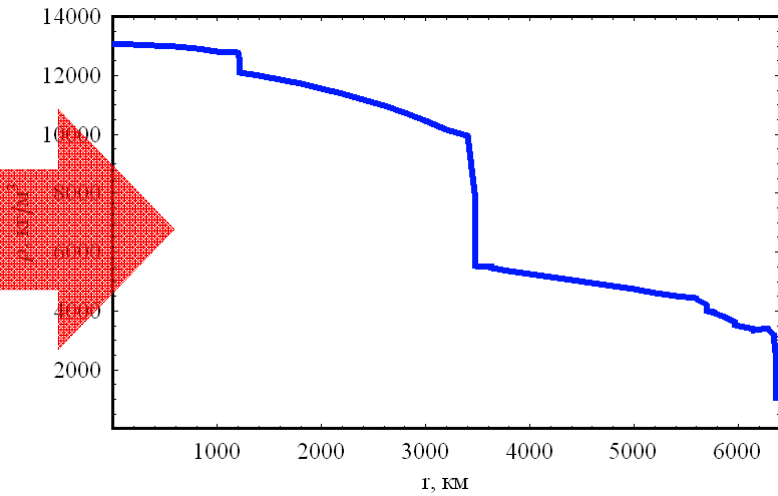
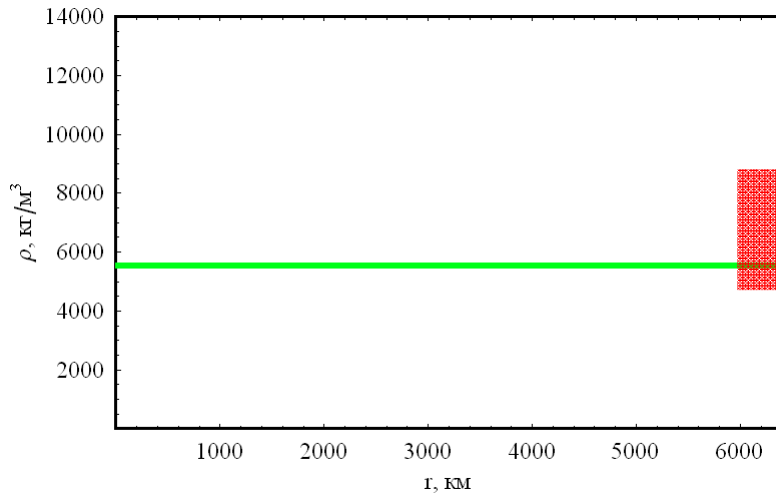
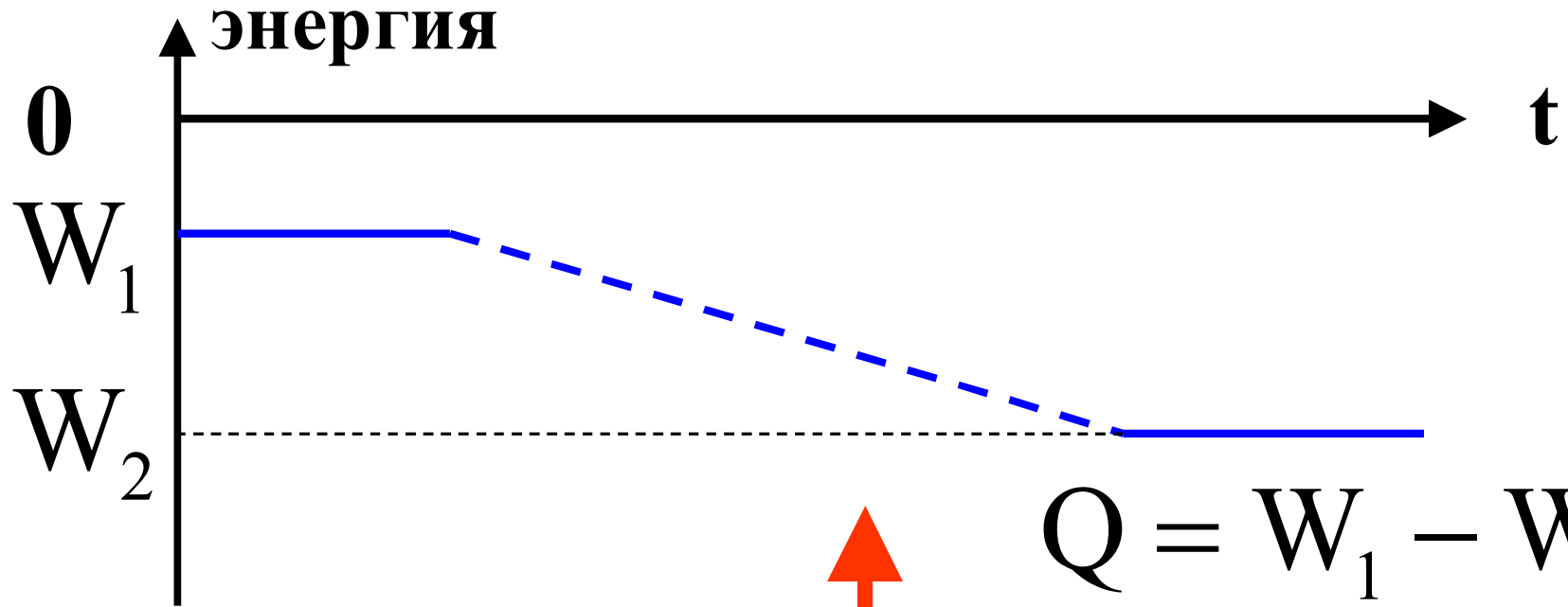
5. Химические реакции и фазовые  
переходы (источники и стоки энергии)



# 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

$\chi$

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

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

**возраст Земли**

**$4.6 \cdot 10^9$  лет !!!**

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

**Атмосфера** — воздушная оболочка Земли, состоящая из газов и взвешенных частиц примесей — аэрозолей.

**Гидросфера** — прерывистая водная оболочка Земли, располагающаяся между атмосферой и твёрдой земной корой (литосферой) и представляющая собой совокупность океанов, морей и поверхностных вод суши.

В более широком смысле в состав гидросферы включают также подземные воды, лёд, снег, атмосферную воду и воду, содержащуюся в живых организмах.

**Гипотезы о  
происхождении  
атмосферы и  
гидросферы  
Земли**

## **Гипотеза 1**

**Атмосфера и гидросфера были захвачены 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 ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{Ar}$ )**

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

### **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:

$\text{H}_2\text{O}$  – гидросфера, атмосфера, ...

$\text{CO}_2$  – большая часть связана в горных породах и органическом веществе

$\text{N}_2$  – органическое вещество, осадочные породы, современная атмосфера

$\text{O}_2$  – 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**

# Состав атмосферы

**ПОСТОЯННЫЕ  
КОМПОНЕНТЫ**

**переменные  
КОМПОНЕНТЫ**

	<b>% объема</b>		<b>% объема</b>
<b>Азот</b>	<b>78.11</b>	<b>Вода</b>	<b>0 – 7</b>
<b>Кислород</b>	<b>20.957</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>0.01 – 0.1</b>
<b>Аргон</b>	<b>0.937</b>	<b>Озон</b>	<b>0 – 0.01</b>

## Постоянные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
<b>Азот</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>28.016</b>	<b>78.110</b>
<b>Кислород</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>31.9986</b>	<b>20.957</b>
<b>Аргон</b>	<b>Ar</b>	<b>39.942</b>	<b>0.937</b>
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 <sub>2</sub>	2.016	0.00005
Метан	CH <sub>4</sub>	18.043	0.0002
Закись азота	N <sub>2</sub> 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%**

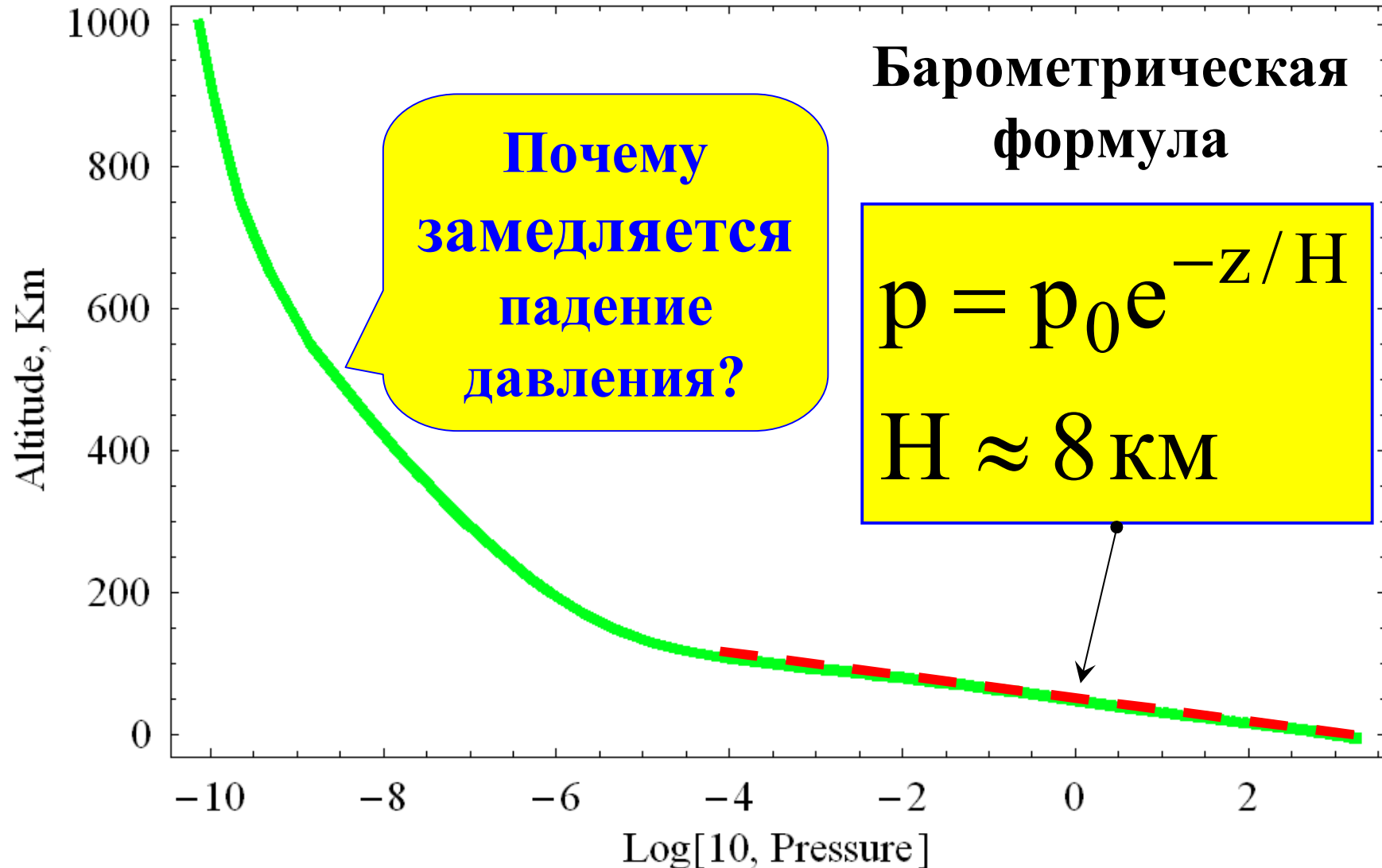
**90% массы атмосферы в слое 16.3 км**

**99% массы атмосферы в слое 32.2 км**

**Радиус Земли**

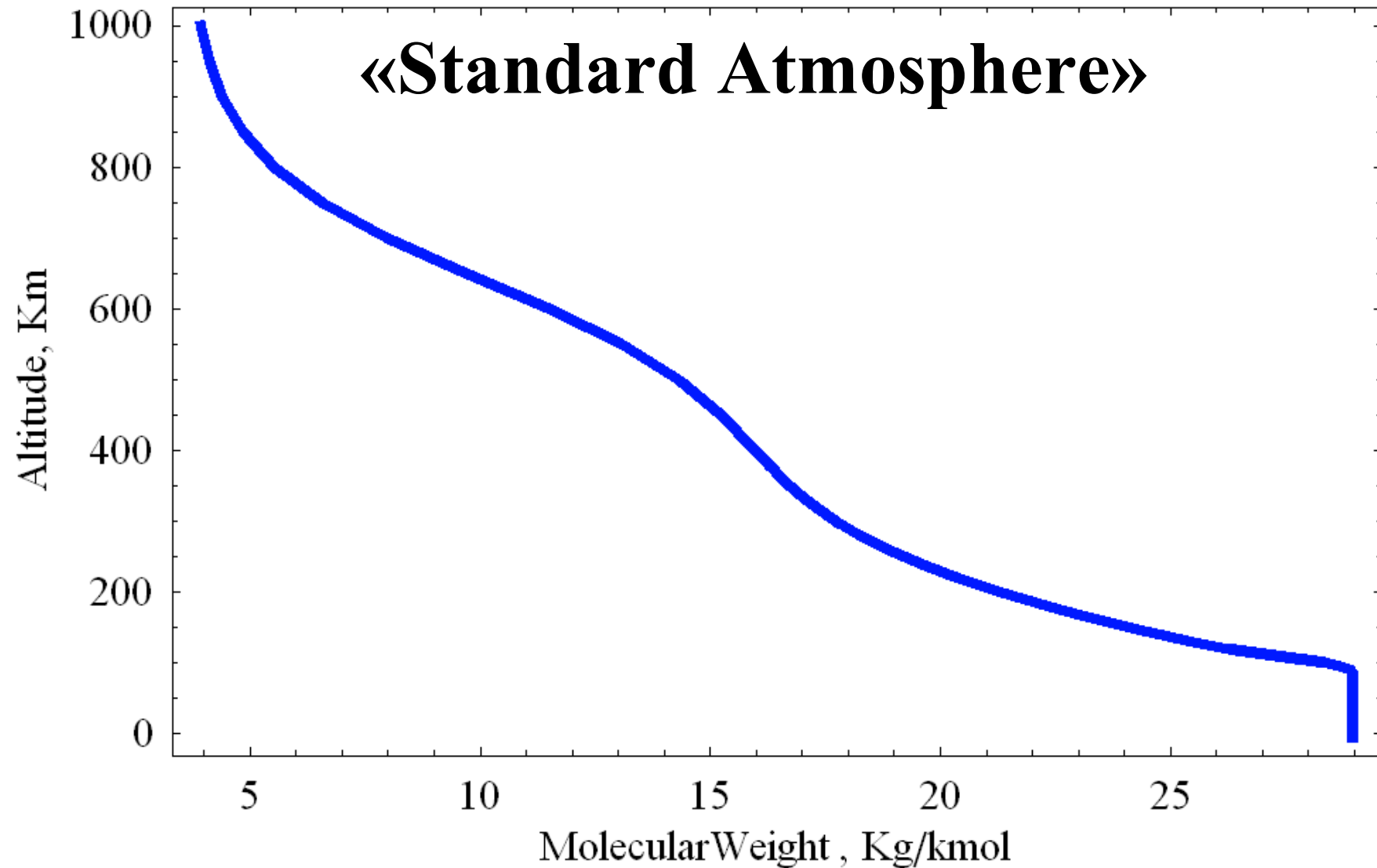
**6371 км**

# Зависимость давления воздуха от высоты «Standard Atmosphere»

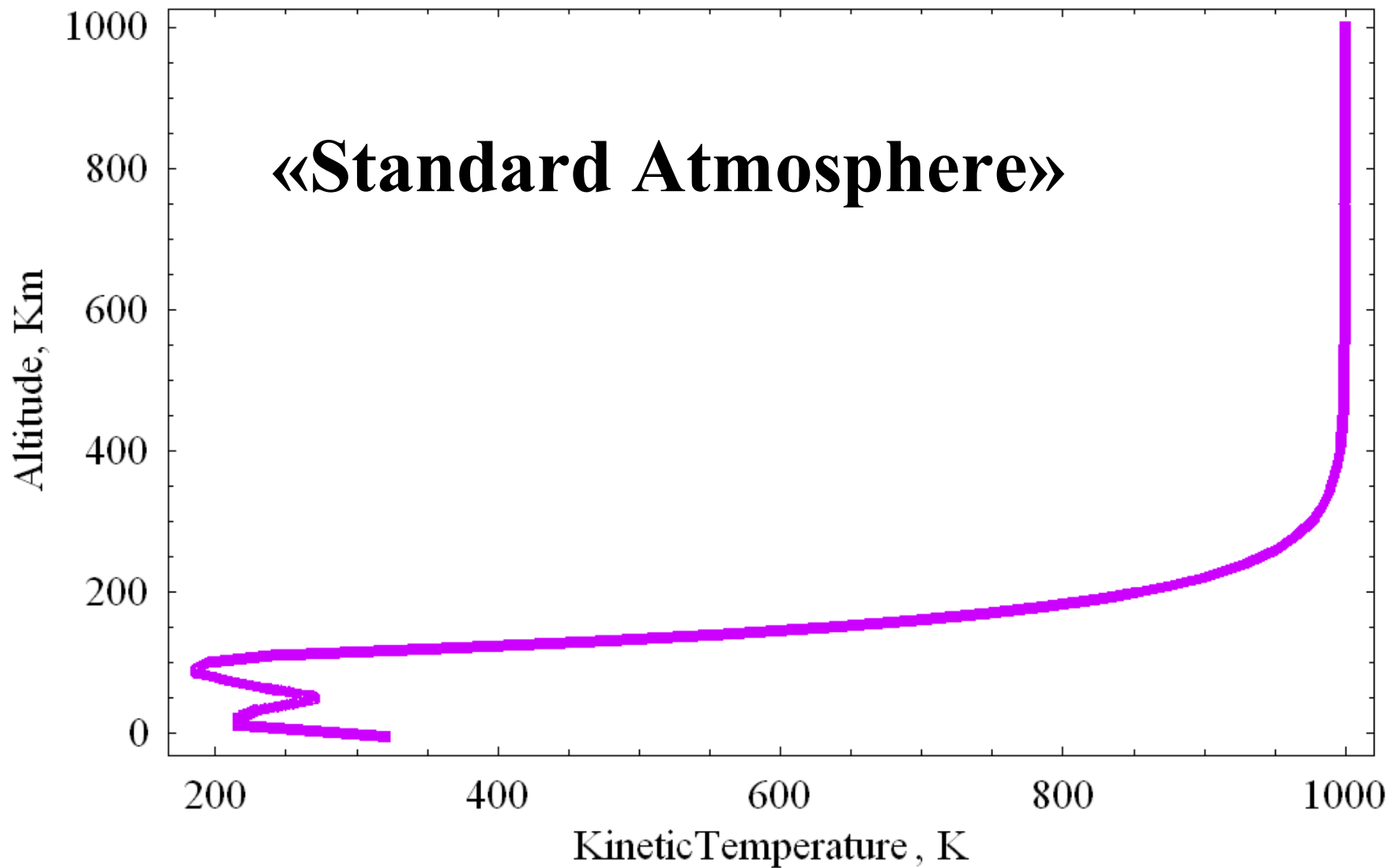




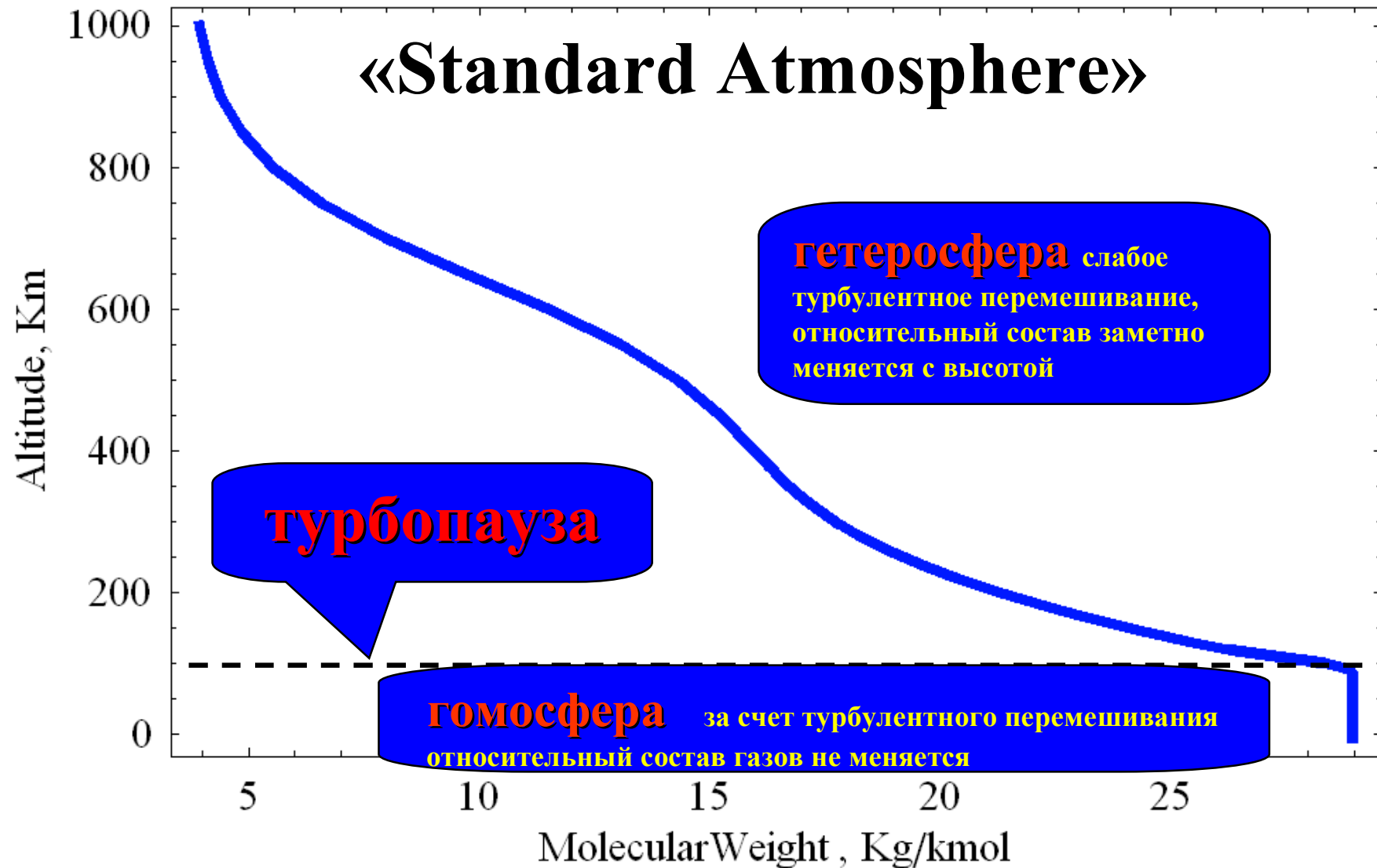
# Зависимость среднего молекулярного веса от высоты



# Зависимость температуры воздуха от высоты



# Зависимость среднего молекулярного веса от высоты



# Условия существования\* атмосферы

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

# Условие существования атмосферы

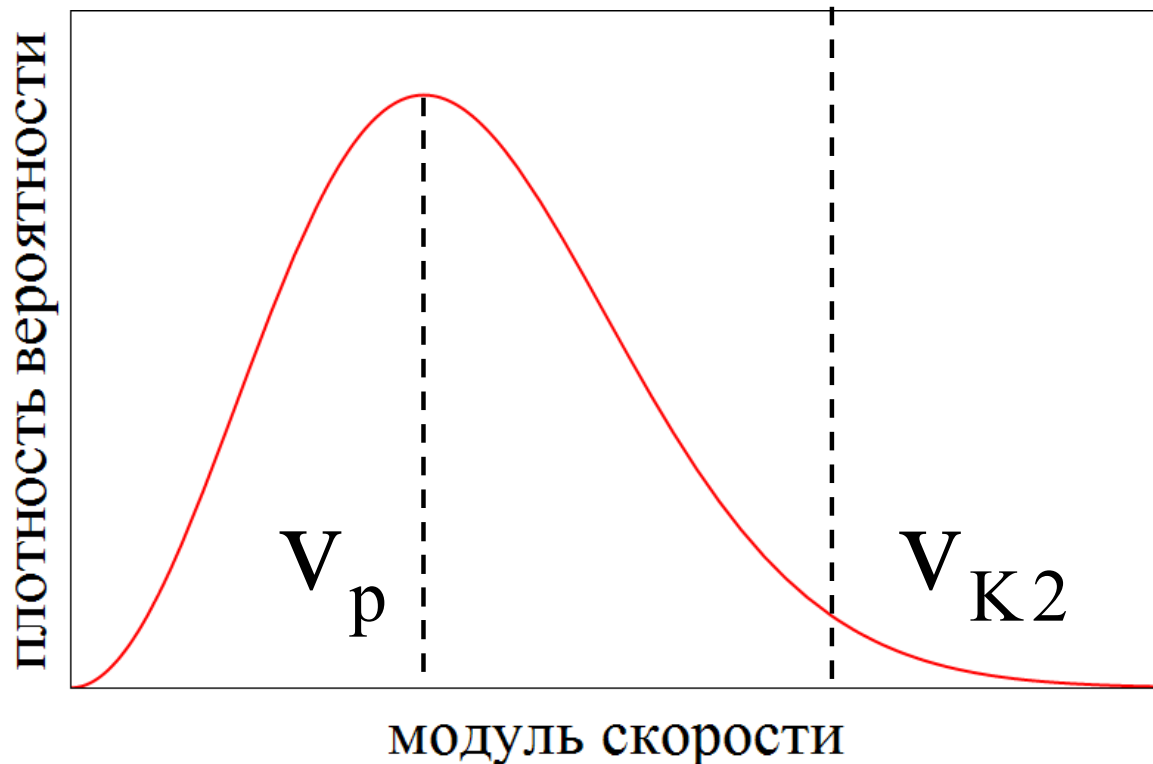
скорость тепл. движения < 2-й косм. скорости

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

## 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**

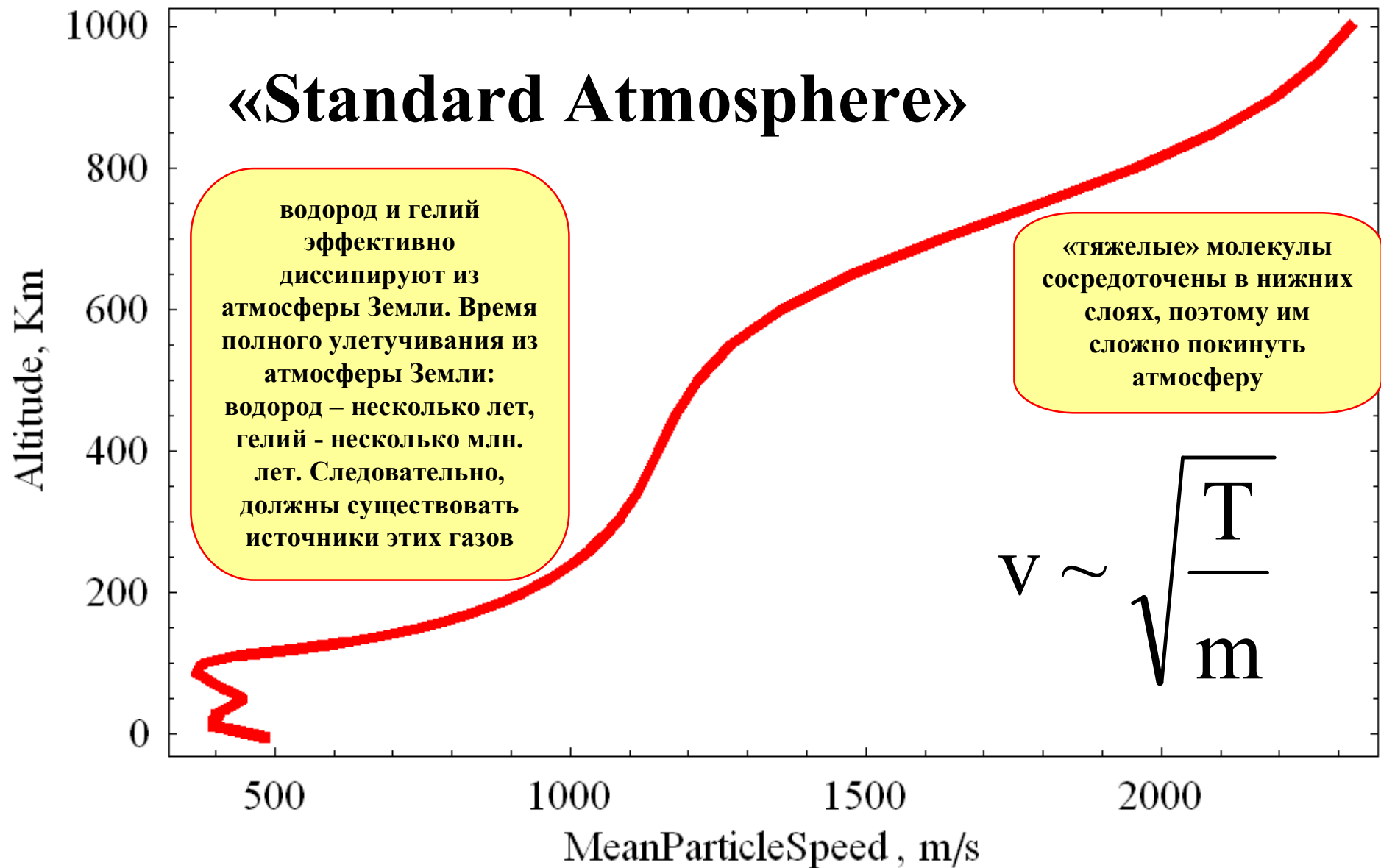
$$v_p < v_{K2}$$

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 средней скорости от высоты



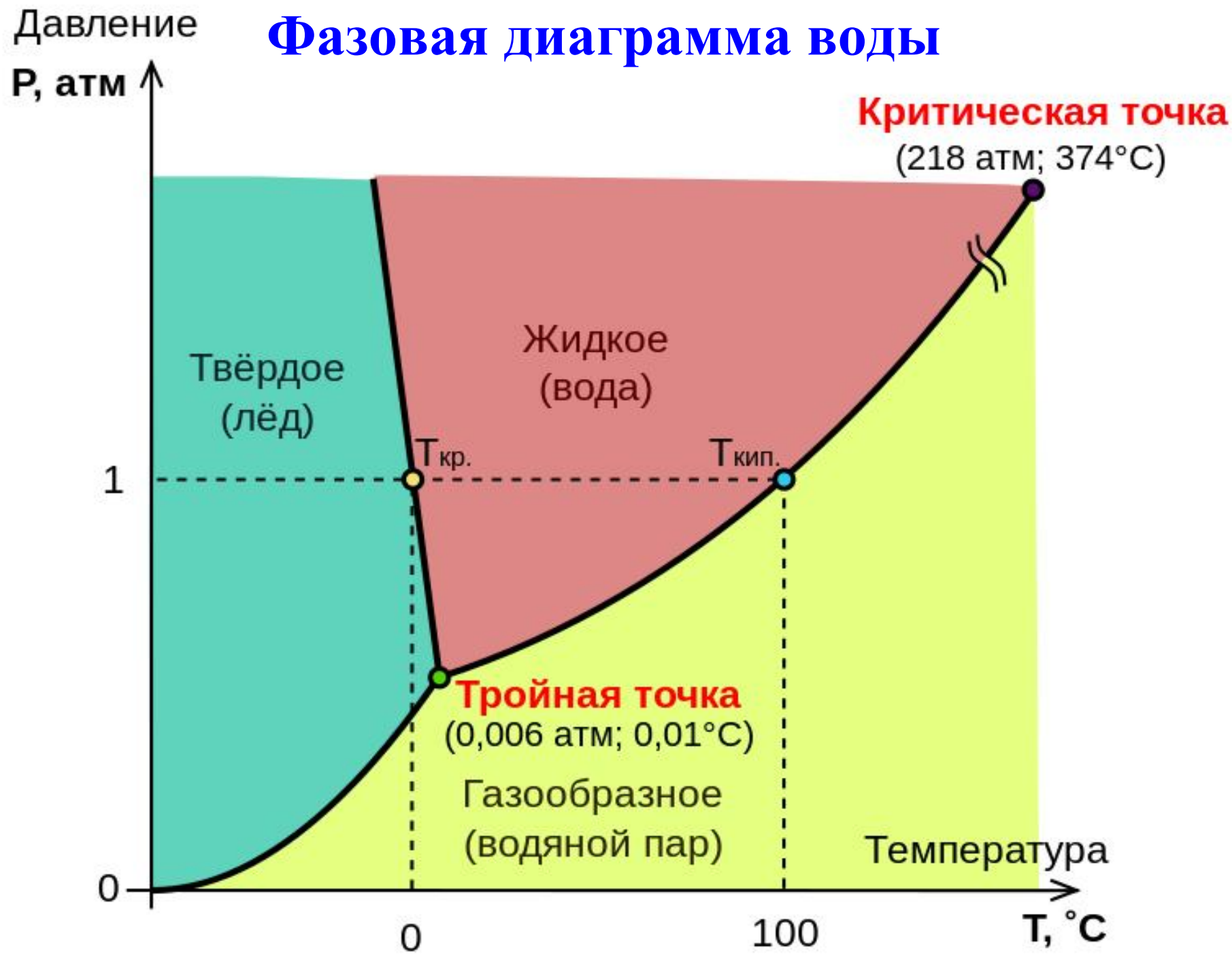
# Условия существования гидросферы (океана)

1. Температура на планете должна быть выше температуры плавления вещества, из которого состоит океан
2. Парциальное давление газообразной фазы этого вещества должно быть выше насыщающего давления
3. Температура и давление должны быть ниже критической точки (для воды: 647.3К, 22.12МПа)

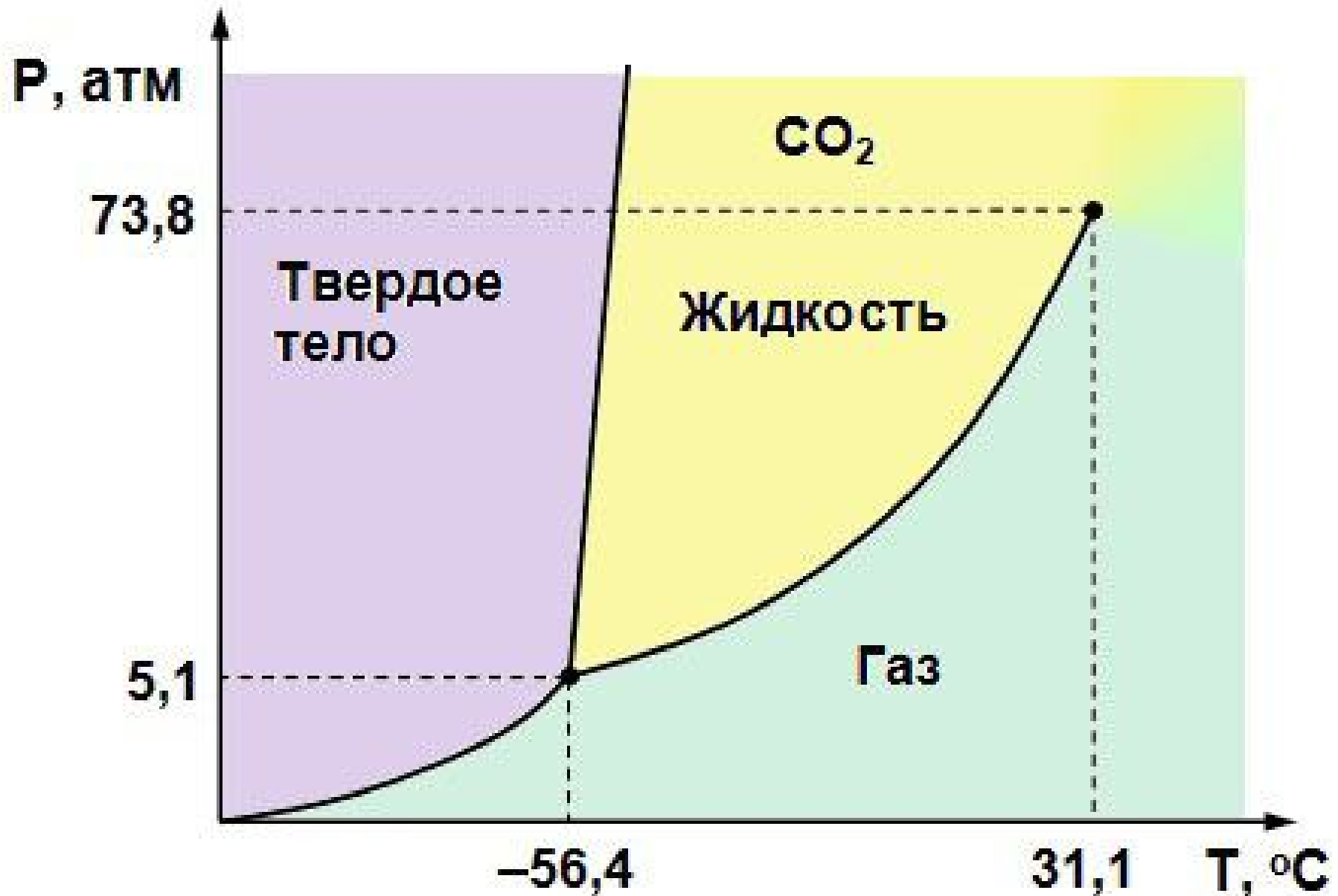
**Точка, в которой фазы вещества становятся тождественными:** обращаются в ноль теплота фазового перехода и поверхн. натяжение



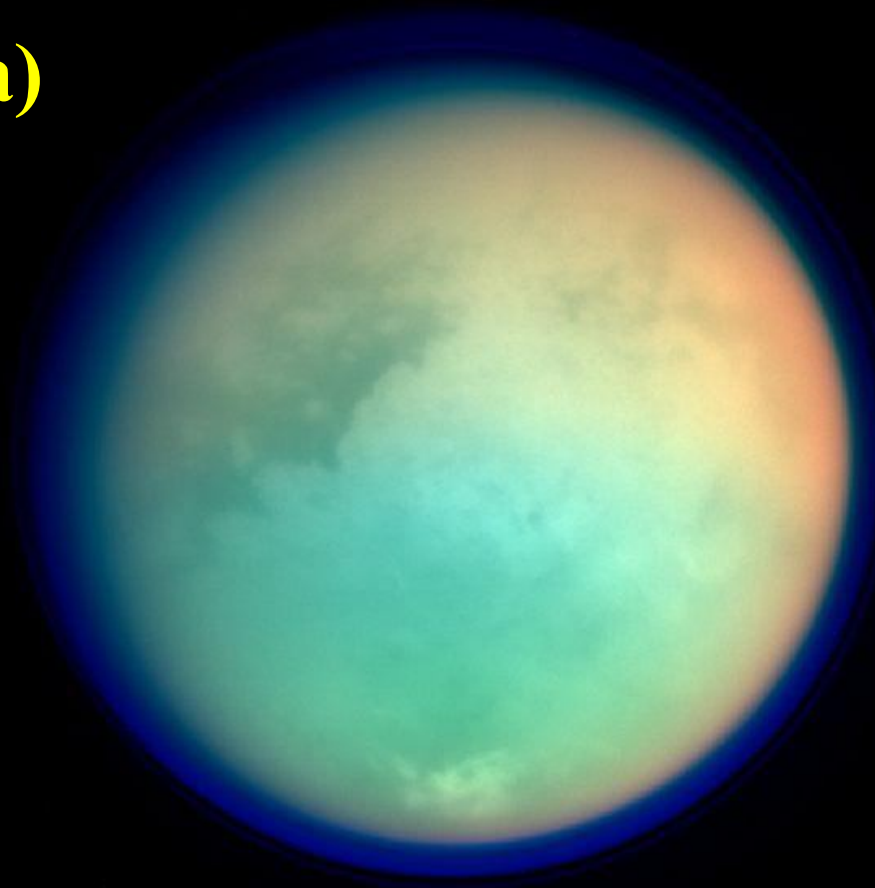
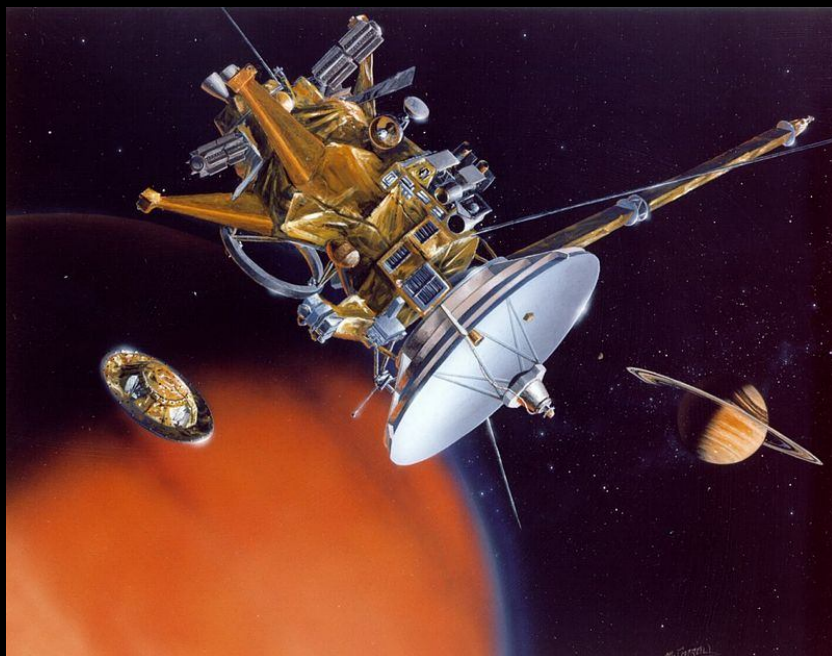
# Фазовая диаграмма воды



## Фазовая диаграмма углекислоты

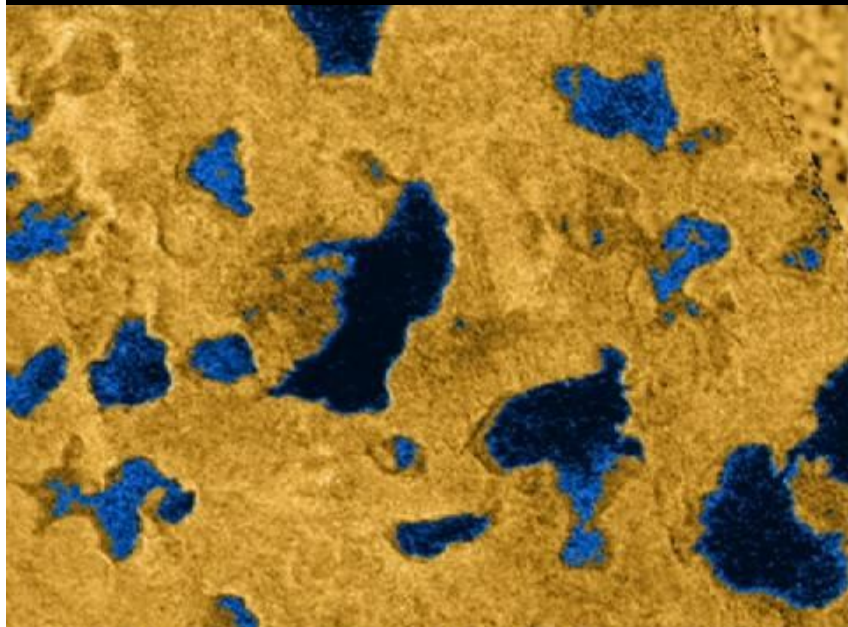


# Титан (спутник Сатурна)



**«Кассини-Гюйгенс»  
(старт 1997 г.)**

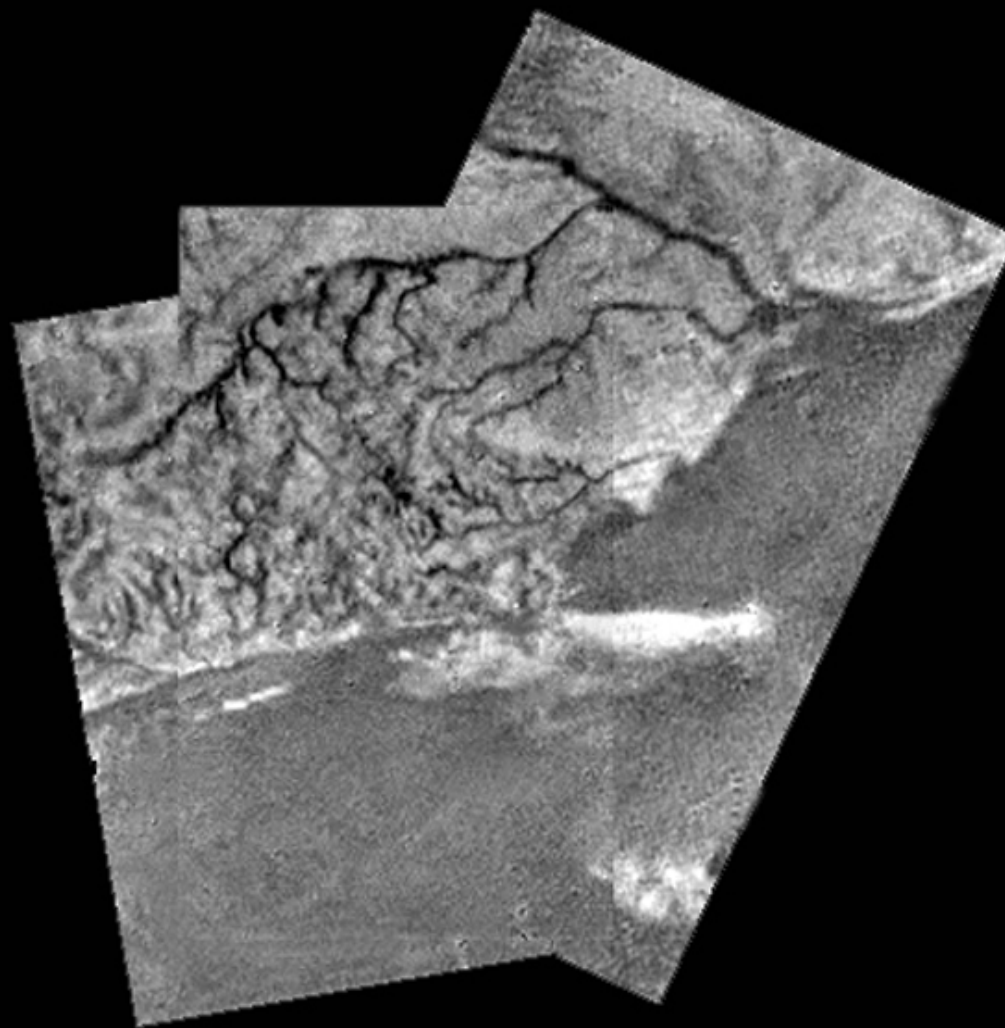
# Титан (спутник Сатурна)



Озера (этан,  
пропан, метан)

**T=94 К**

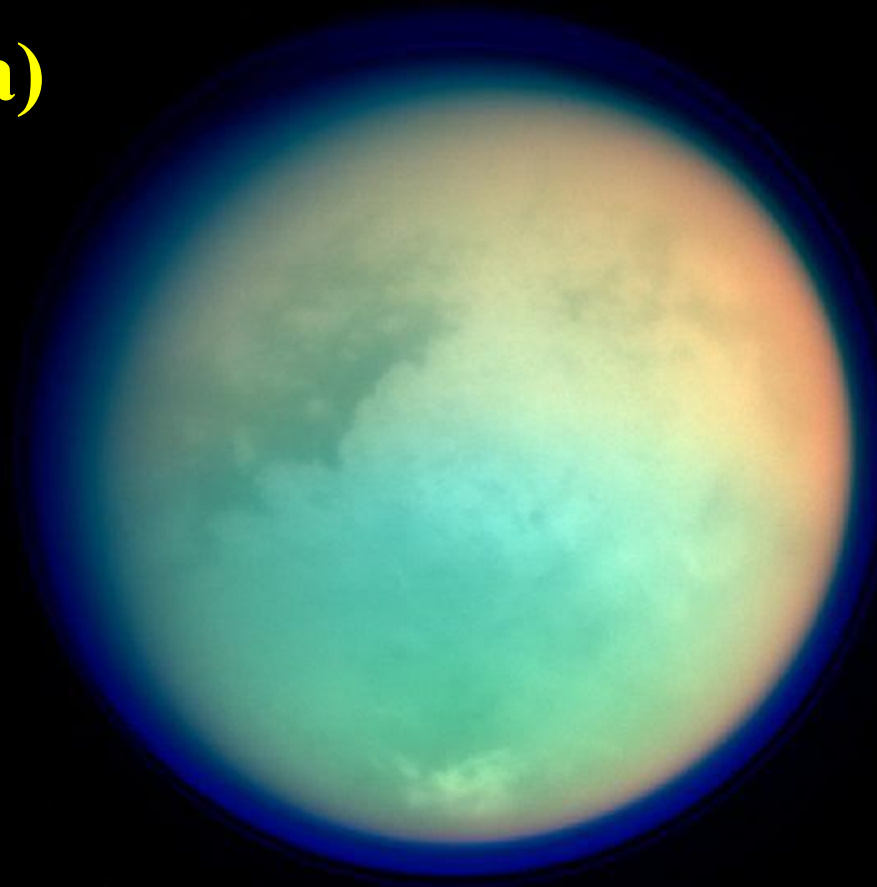
**p=1.45 атм**



Русла рек

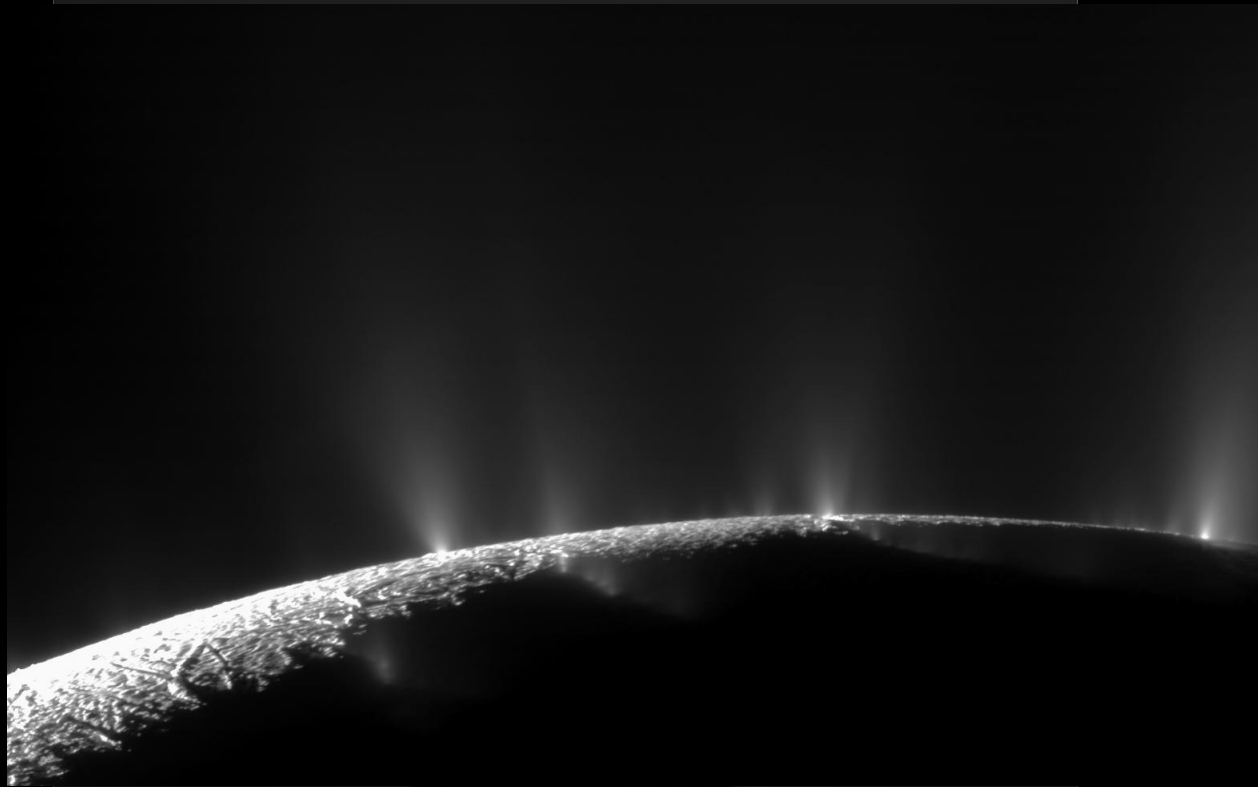
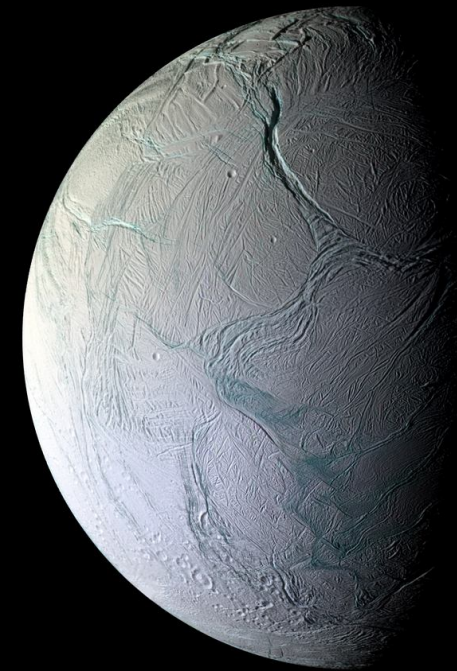


## Титан (спутник Сатурна)



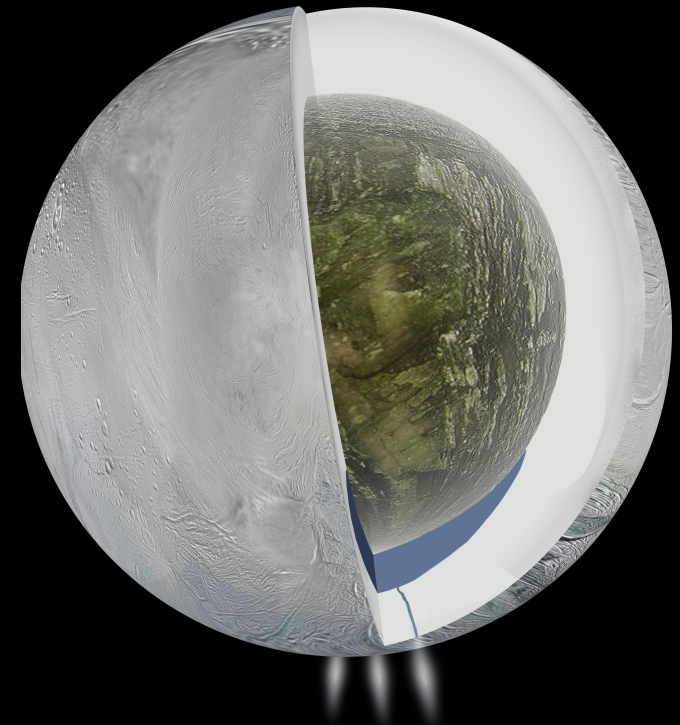
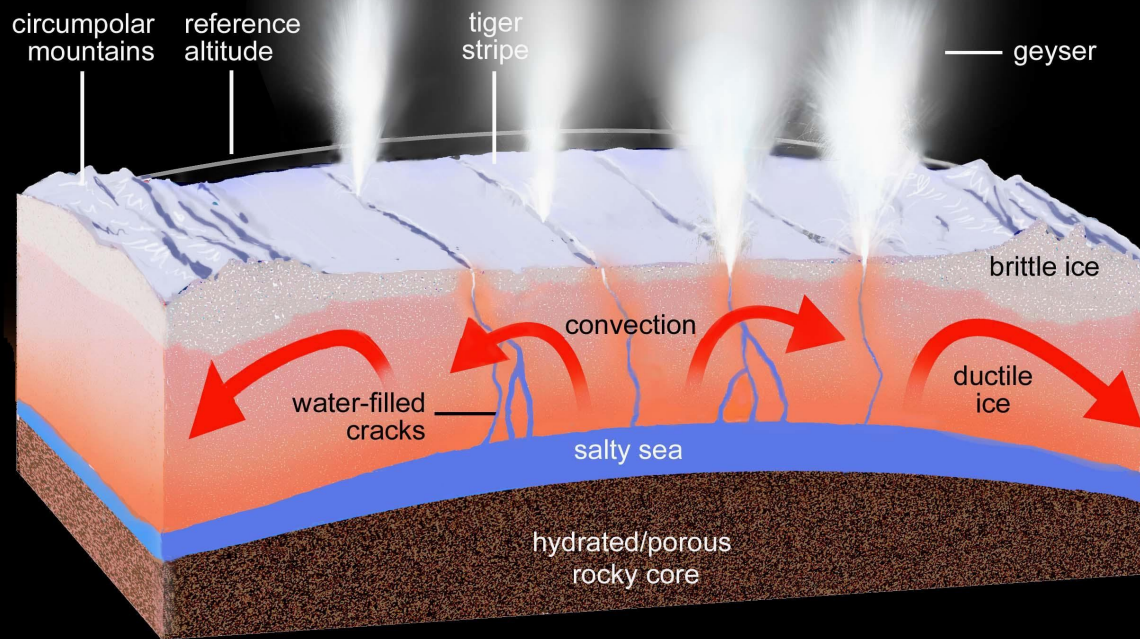
**Ландшафт Титана в месте посадки зонда «Гюйгенс» (2005 г.). Камни округлой формы могли образоваться при воздействии жидкости.**

# Энцелад (спутник Сатурна)



Гейзеры на южном полюсе

# Энцелад (спутник Сатурна)



**Гейзеры на южном полюсе**

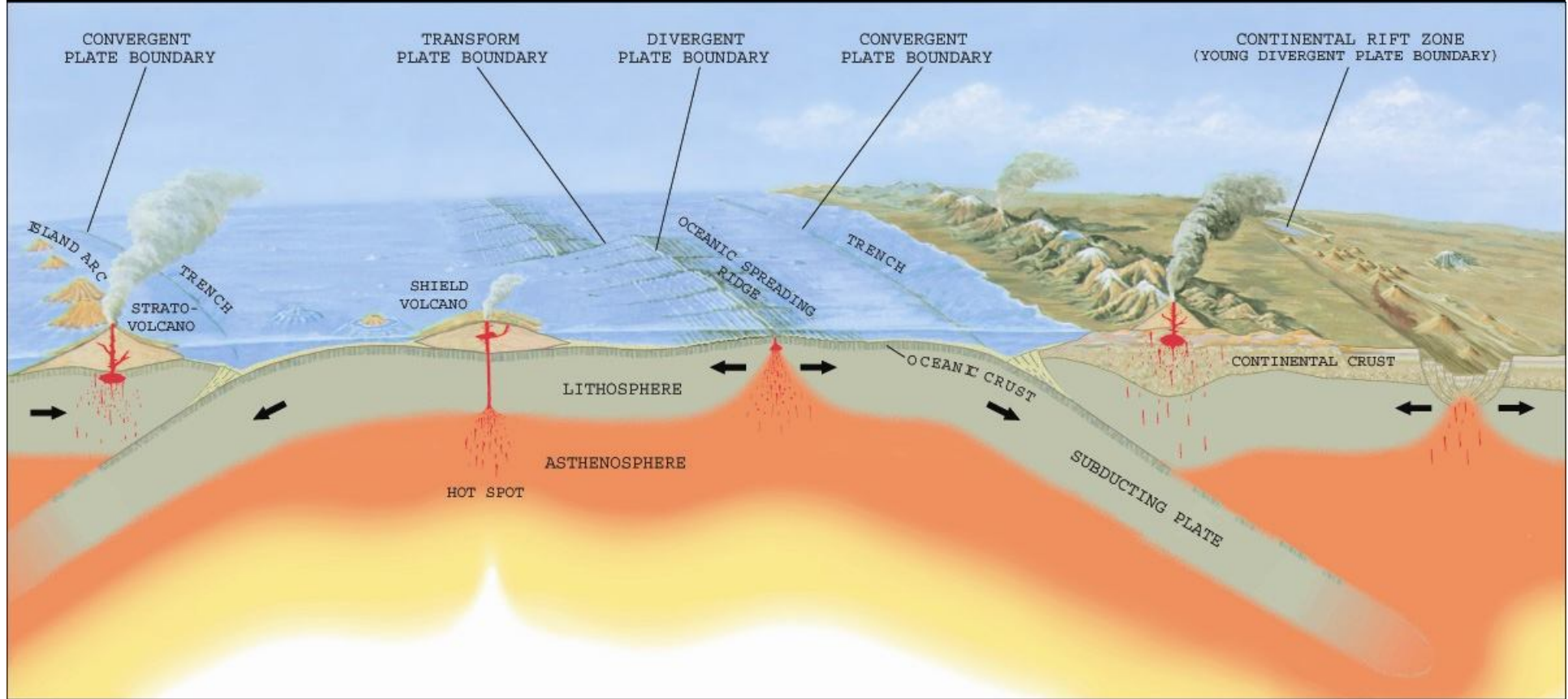
- ❑ Вода (водяной пар) появилась на поверхности Земли 4 млрд.лет назад как следствие дегазации мантии при тектономагматической активности**
- ❑ Гидросфера (океан) возникла на Земле 3 млрд. лет назад**
- ❑ Современные океанские котловины сформировались значительно позднее (в последние 250 млн. лет)**



**Мировой океан занимает  
71% поверхности Земли  
(361 млн.кв.км)**



# Формирование рельефа дна





# Топография океанического дна

