

# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №1

---

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

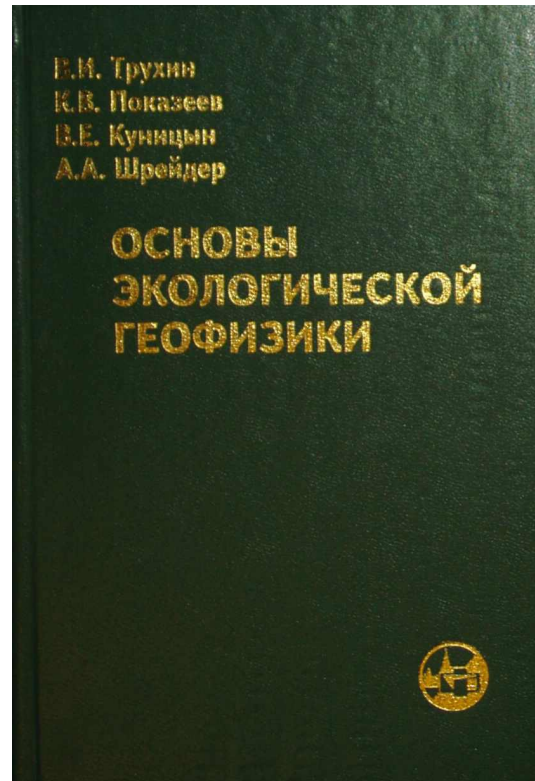
# Разделы курса:

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

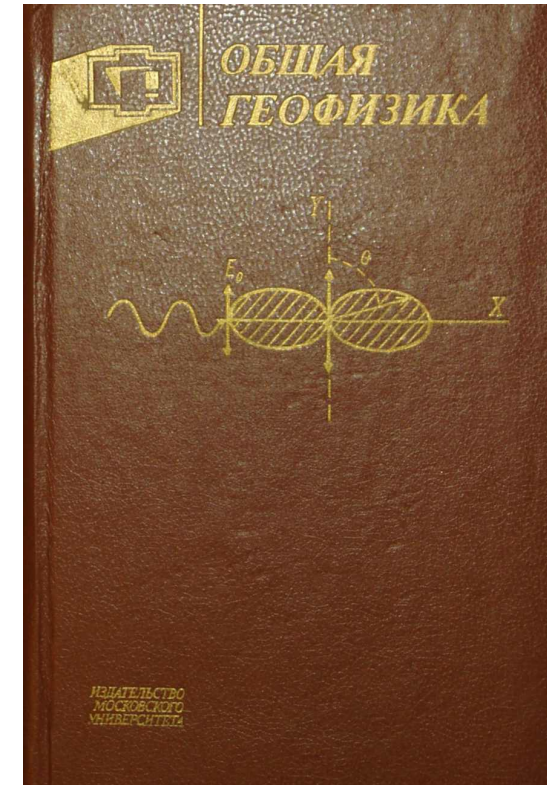
2005



2000



1995



сетевая страница кафедры  
физики моря и вод суши

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

# European Geosciences Union



**EGU General Assembly 2014:**

**12437 scientists from 106 countries,  
of which 27% were students**

**<http://www.egu.eu/>**



# American Geophysical Union

<http://www.agu.org/>



International Union of Geodesy and Geophysics  
Union Géodésique et Géophysique Internationale

# International Union of Geodesy and Geophysics

<http://www.iugg.org/>

# 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**



# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №2

---

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

# Образование Солнечной системы и Земли

# Ранние гипотезы происхождения Земли

## □ конец 18 века. Гипотезы Канта и Лапласа

**1755 г.** И.Кант объясняет образование планет из рассеянного вещества (пылевого облака), которое простиралось до границ современной планетной системы и вращалось вокруг Солнца.

**1796 г.** П.Лаплас выдвинул гипотезу об образовании Солнца и Солнечной системы из сжимающейся газовой туманности. Часть газового вещества отделилась от центрального сгустка под действием возросшей при сжатии центробежной силы (следствие закона сохранения момента количества движения). Это вещество послужило материалом для образования планет.

**Трудности:** невозможность объяснить медленность современного вращения Солнца

# Ранние гипотезы происхождения Земли

□ **конец 19 века.** Гипотеза американских ученых Ф.Мультона и Т.Чемберлена об образовании планет из мелких твердых частиц (планетезимали), которые возникли в результате застывания вещества, выброшенного Солнцем в виде огромных протуберанцев

**Трудность:** такое образование планетезималей противоречит закону сохранения момента количества движения (масса планет менее 1%, но они несут 98 % момента количества движения).

# Ранние гипотезы происхождения Земли

□ **20-30** годы **20** века. Гипотеза Дж.Джинса. Он полагал, что планеты образовались из вещества, вырванного из Солнца притяжением пролетевшей поблизости звезды

**Трудности:** (1) звезда должна была пролететь слишком близко – чрезвычайно редкое событие; (2) вещество и возникшие из него планеты должны были бы кружиться вблизи Солнца; (3) вещество было бы слишком горячим, и оно рассеялось бы в пространстве.

# Ранние гипотезы происхождения Земли

□ **1943 г. Гипотеза О.Ю.Шмидта об аккумуляции планет из роя холодных тел и частиц, захваченного Солнцем**

Земля образовалась из **ХОЛОДНЫХ** тел, а не из сгустков раскаленной материи

# Современная концепция образования 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.

*\*\*\* в метеоритах встречаются следы  
короткоживущих изотопов*

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

# Образование Вселенной ~14 млрд. лет назад в результате «**Большого взрыва**»

излучение

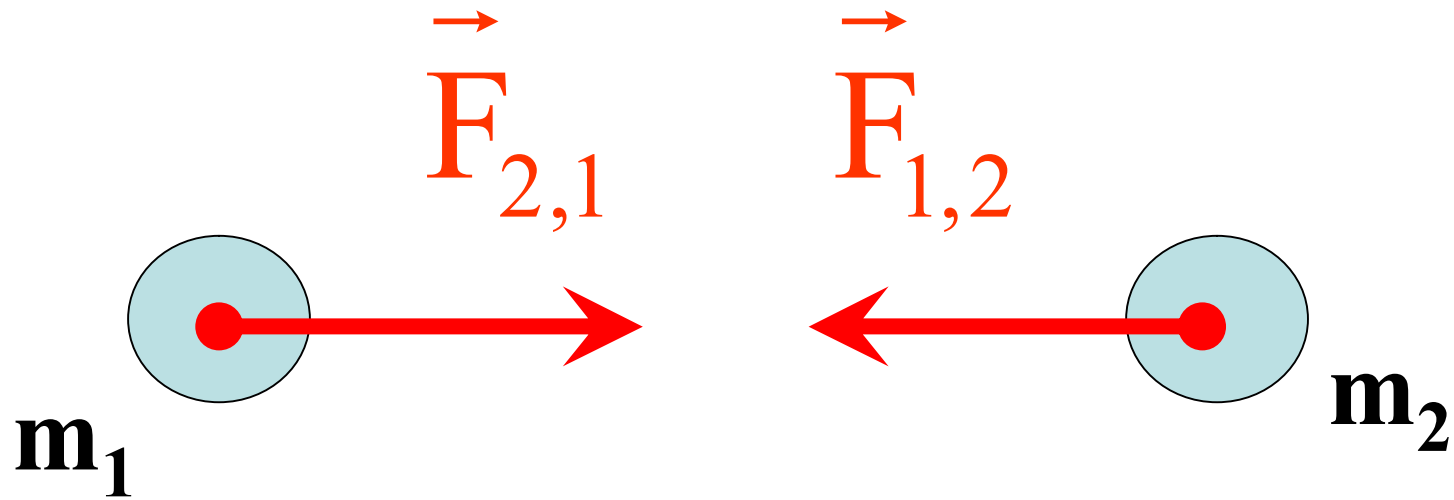


«легкие»  
частицы  
(протоны,  
электроны,  
нейтроны,  
ядра гелия  
и др.)

**Тяжелых  
элементов не  
существовало!**

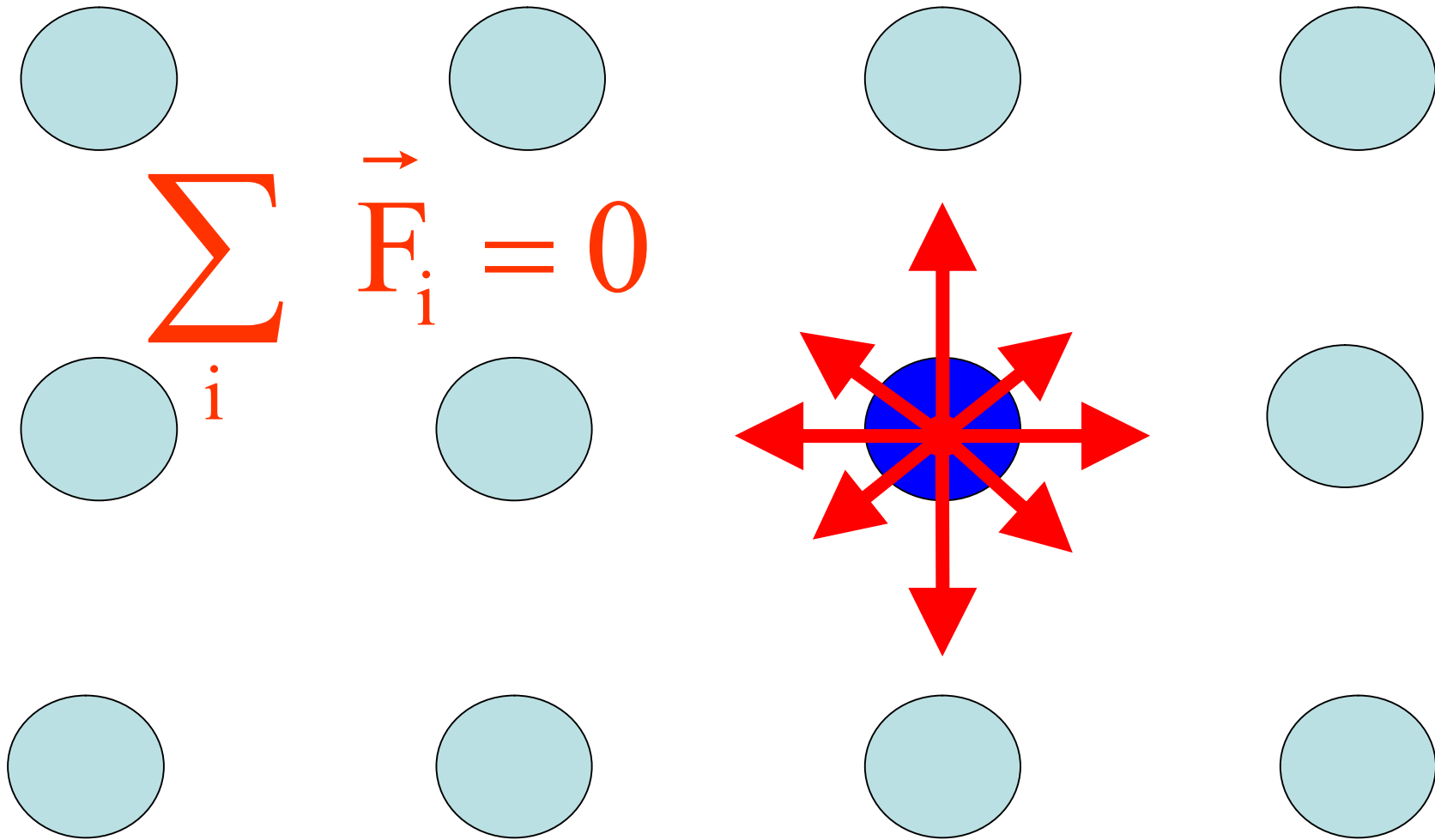


# Закон всемирного тяготения



$$\vec{F}_{1,2} = -G \frac{m_1 m_2}{|\vec{r}_{1,2}|^3} \vec{r}_{1,2}$$

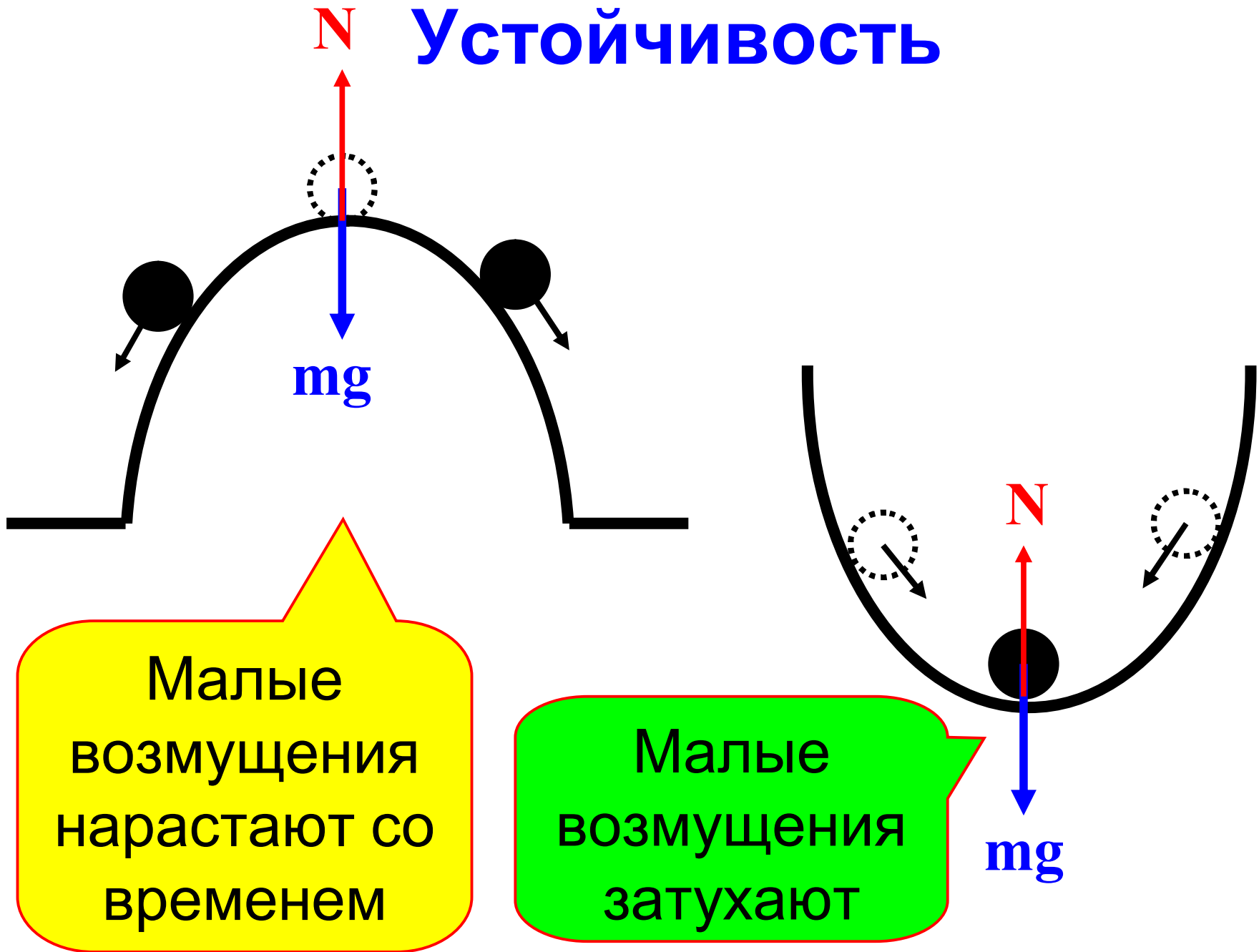
# Гравитационная неустойчивость



При равномерном распределении массы частицы в положении равновесия!

**устойчивое или неустойчивое?**

# N Устойчивость



Малые  
возмущения  
нарастают со  
временем

Малые  
возмущения  
затухают



# Аккреционный диск

(художественный образ)



# 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)**

**Меркурий**

**Земля**

**Венера**

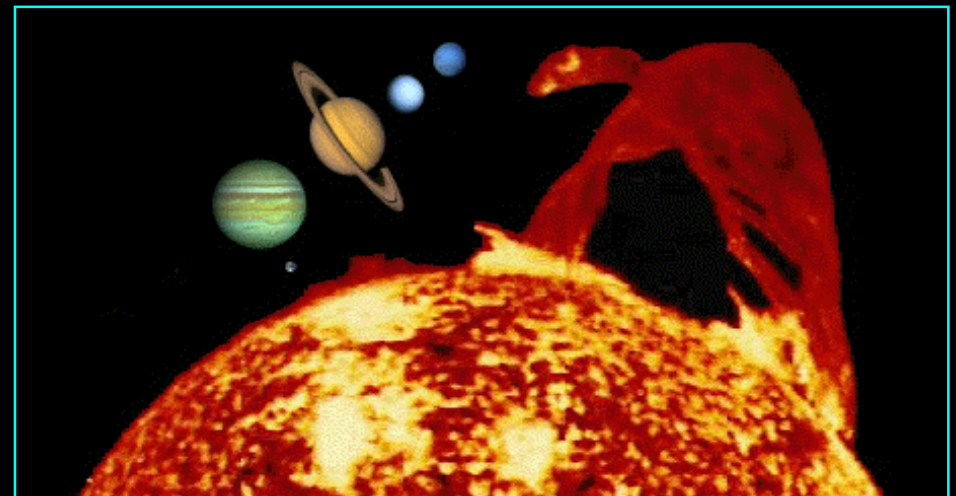
**Марс**

**Юпитер**

**Сатурн**

~~**Плутон**~~

**Уран**  
**Нептун**



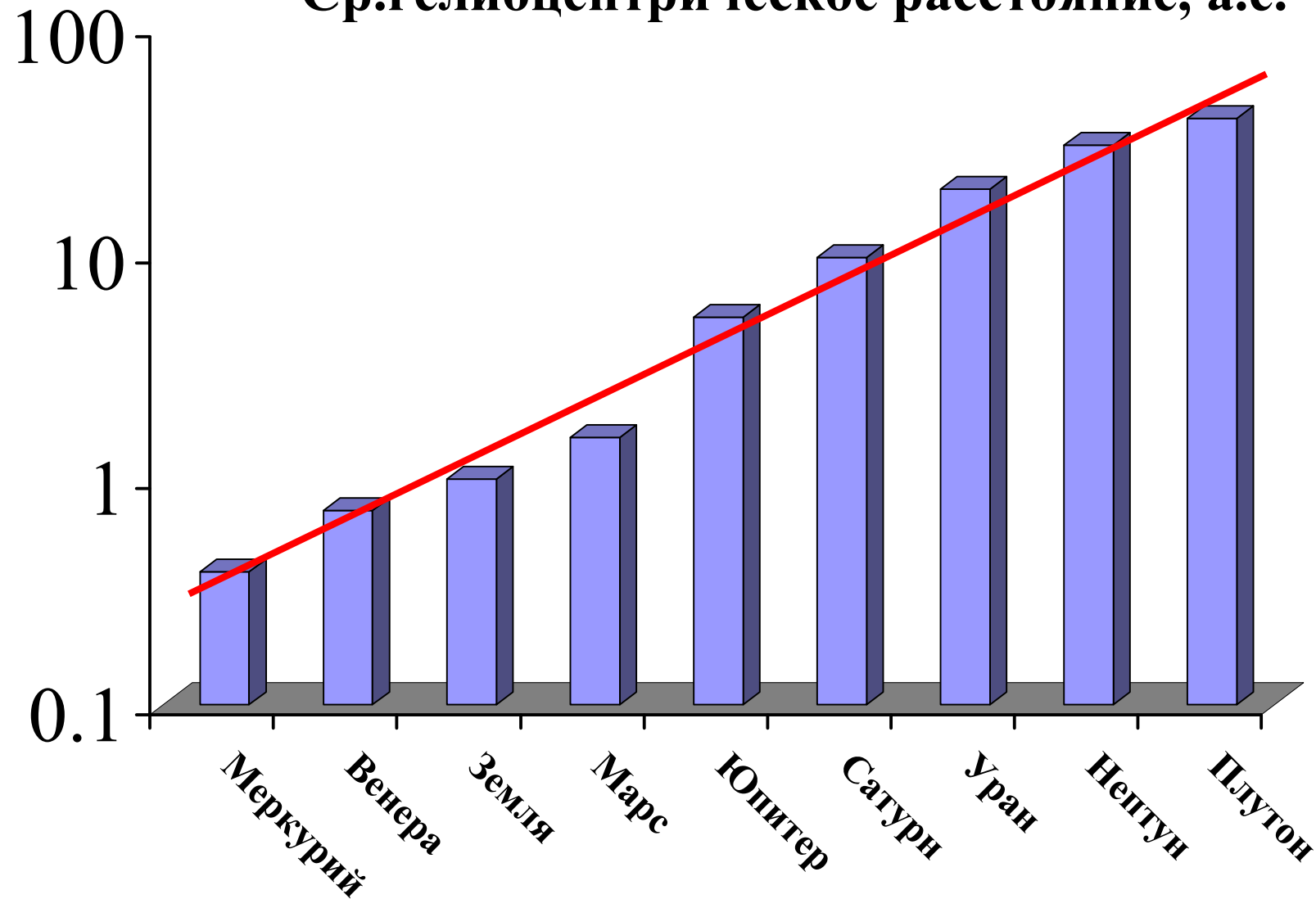
# **Модель образования Солнечной системы должна объяснить следующий набор наблюдаемых фактов:**

- 1. Все планеты движутся по эллиптическим орбитам в одном направлении**
- 2. Орбиты всех планет (кроме Плутона) 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

Ср.гелиоцентрическое расстояние, а.е.



# 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%

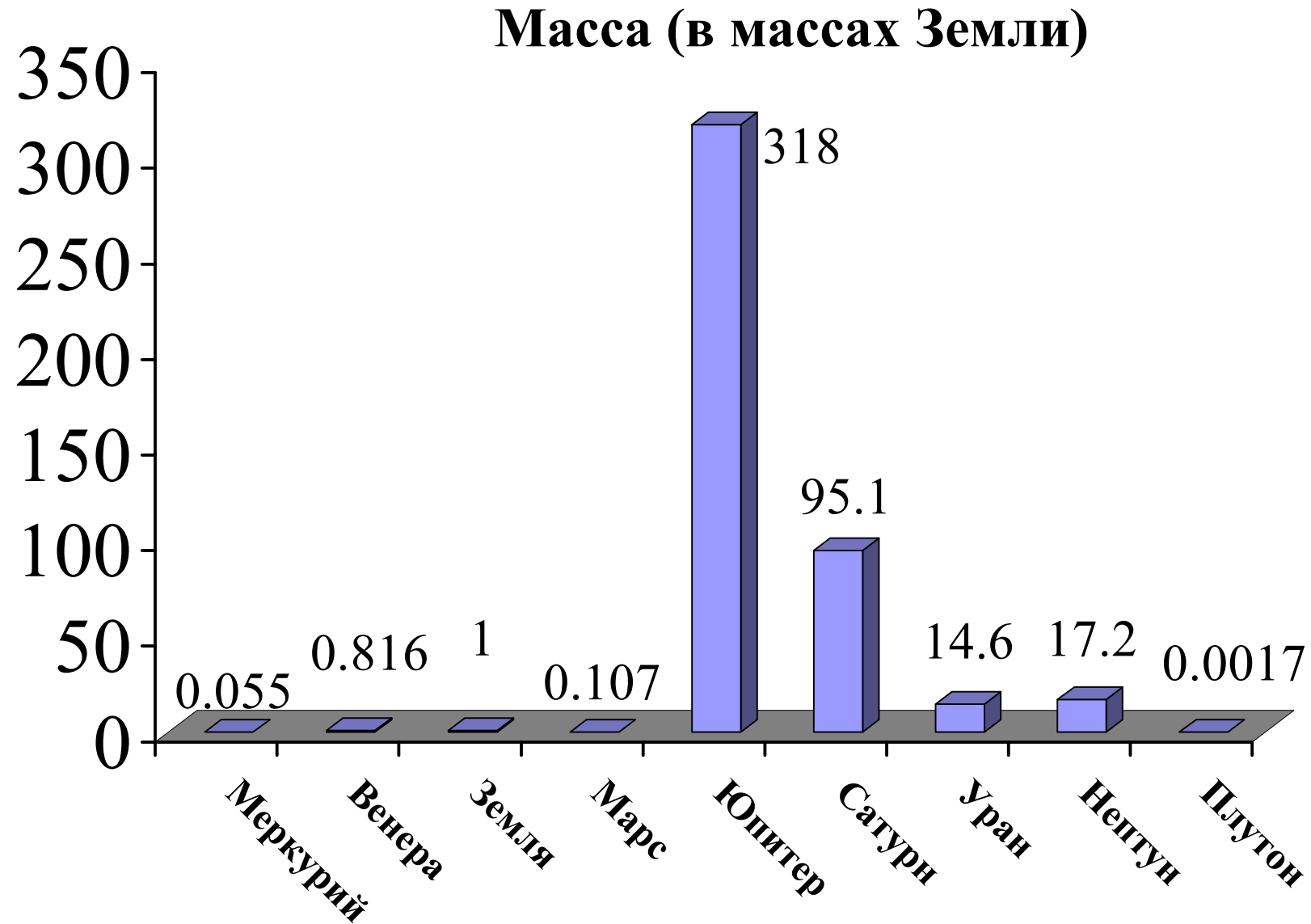
## 5. Закономерное изменение средней плотности



## 6. Закономерное изменение радиуса

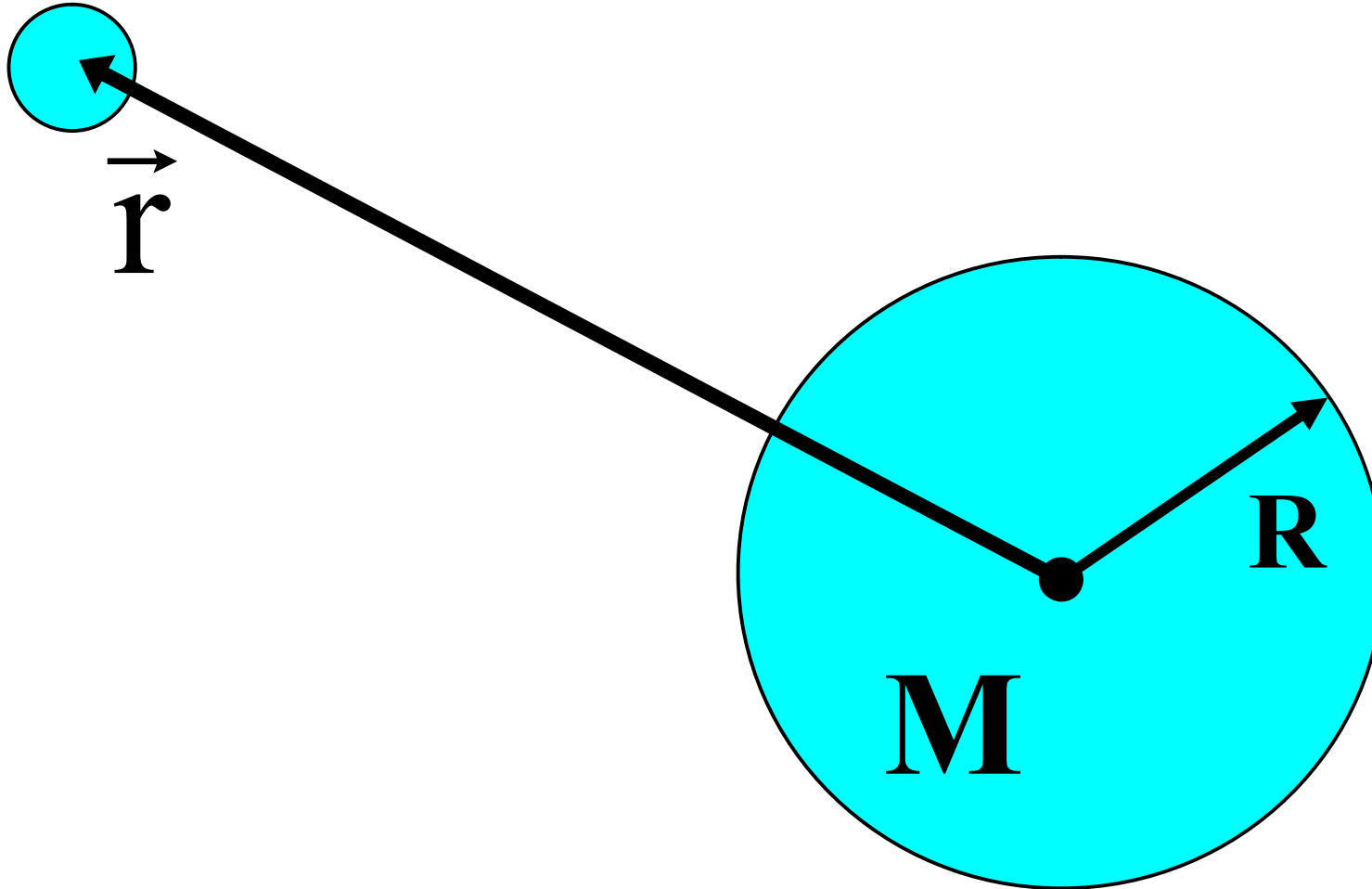


## 7. Закономерное изменение массы



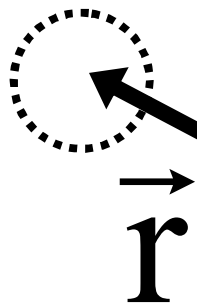
# Энергия аккреции

$dM$

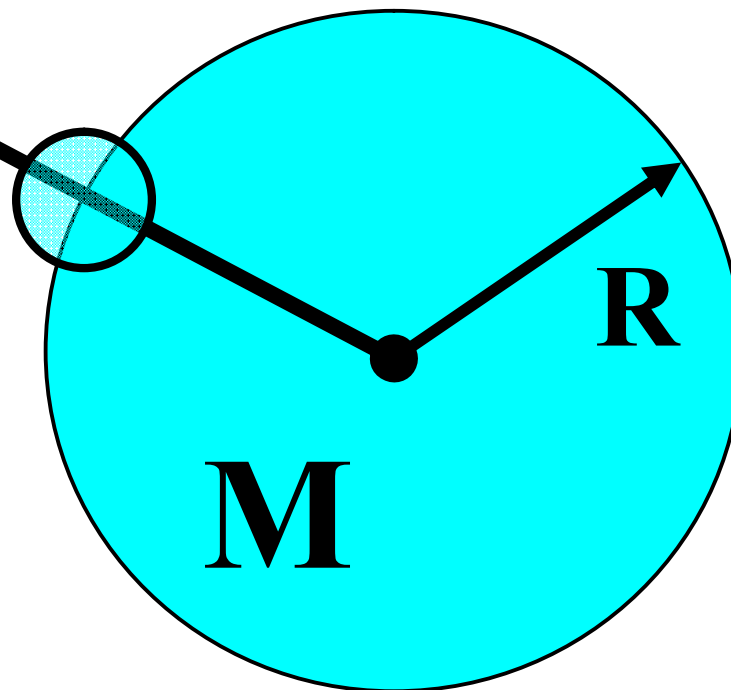


$dM$

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



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



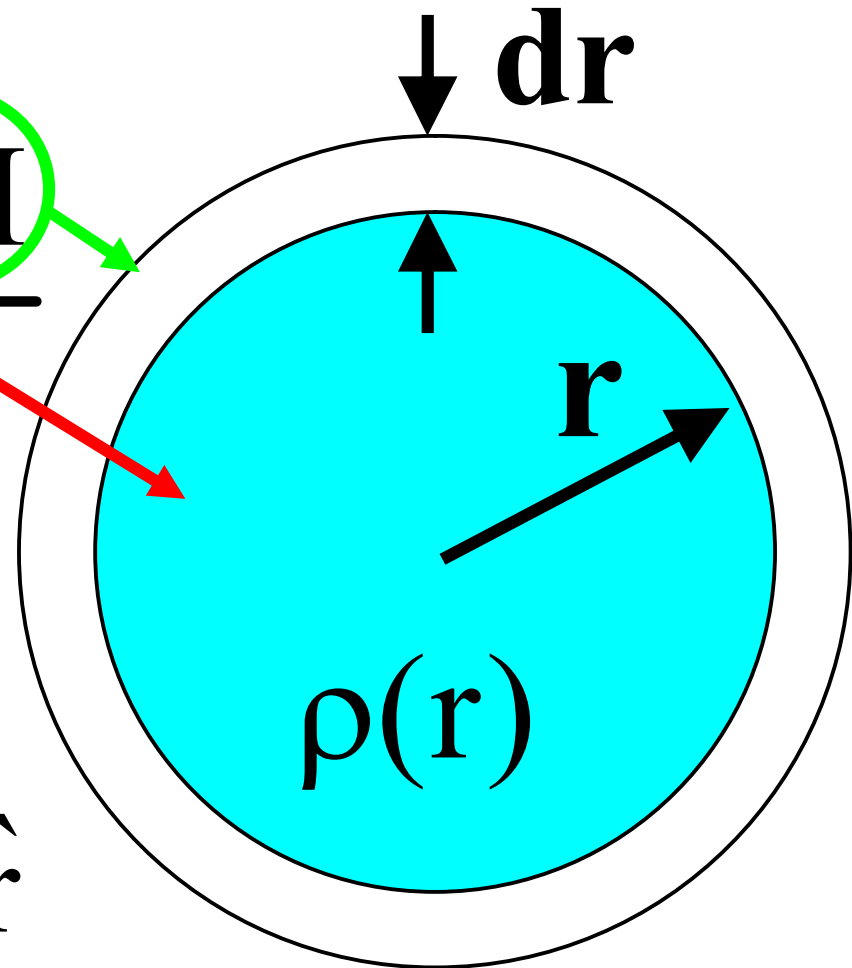
$$dW = -dA$$

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ

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

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

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





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

$$\rho = M_{\oplus} / \left( \frac{4\pi}{3} R_{\oplus}^3 \right) = \text{const} \neq f(r)$$

$$W = -G \frac{16}{15} \pi^2 \rho^2 R_{\oplus}^5 = -\frac{3}{5} \frac{GM_{\oplus}^2}{R_{\oplus}} = -G \left( \frac{4\pi}{3} \rho \right)^{1/3} \frac{3}{5} M_{\oplus}^{5/3} = -A$$

**энергия  
аккреции**

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

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

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

**При аккреции Земли выделилось**

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

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

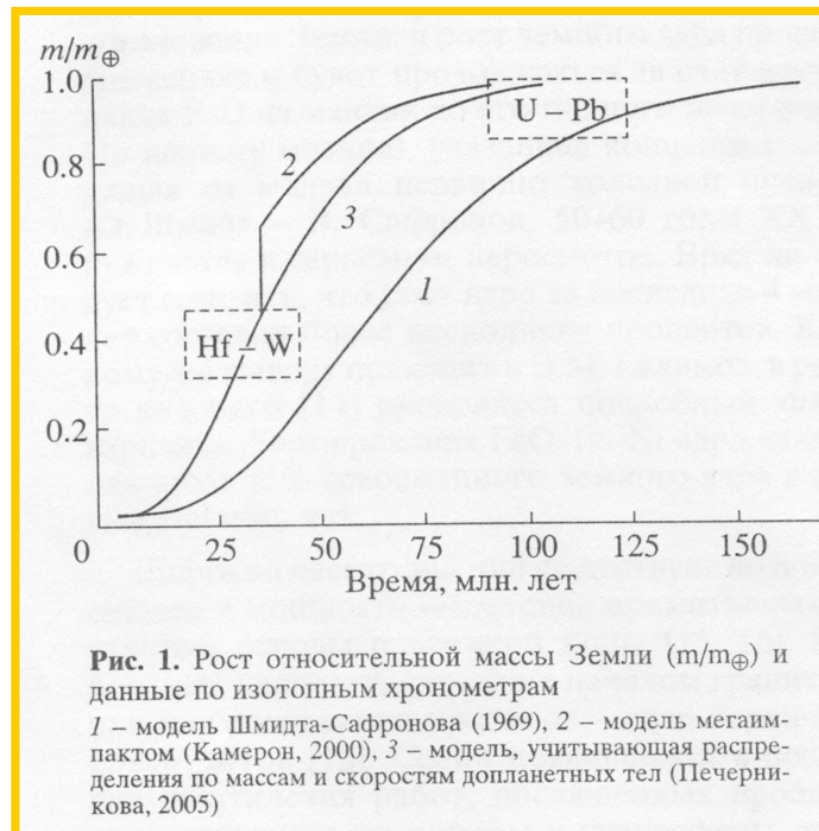
$$A / M_{\oplus} \approx 3.9 \cdot 10^7 \text{ Дж} / \text{кг}$$

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

Солнце → Земля

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

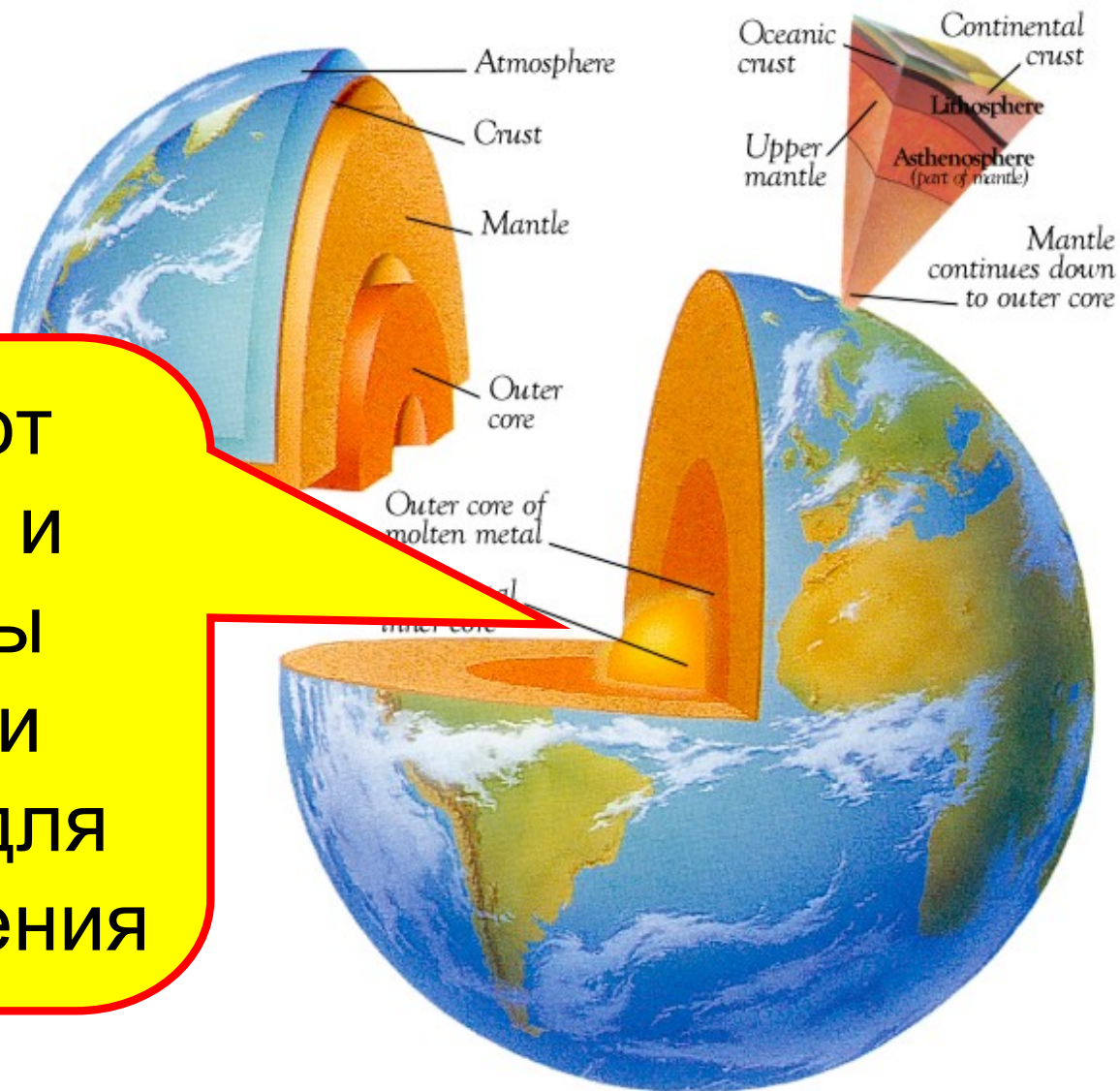
$$T = A / L_{\oplus} \approx 1.3 \cdot 10^{15} \text{ с} \approx 40 \text{ млн. лет}$$



## Общие сведения о планете Земля

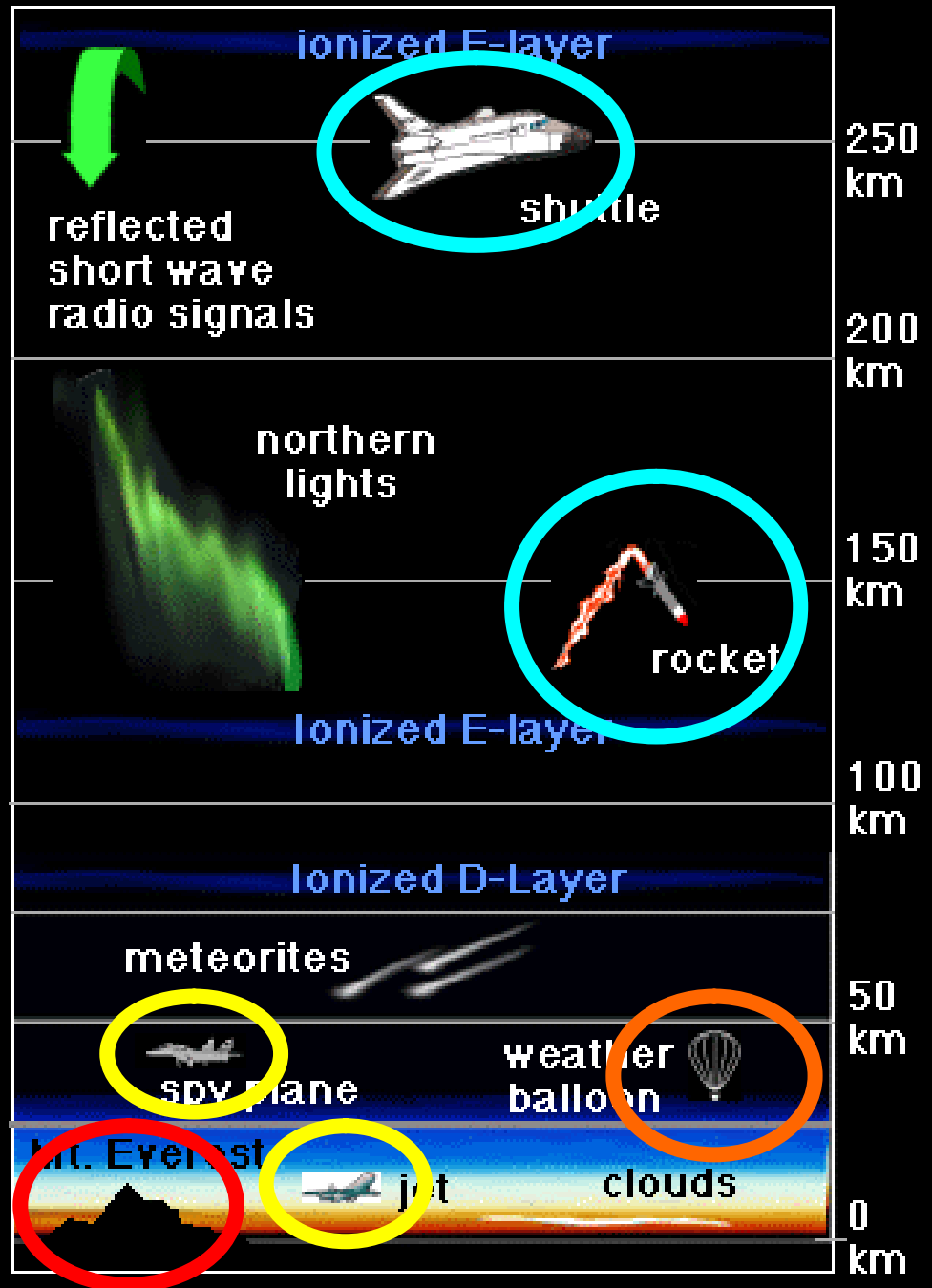
Расстояние до Солнца	149.6 млн. км
Масса	$5.978 \cdot 10^{24}$ кг
Период вращения вокруг оси	23ч. 56мин. 04с.
Средний радиус	6371 км
Средняя плотность	5518 кг/м <sup>3</sup>
Наклон экватора к орбите	23°27'

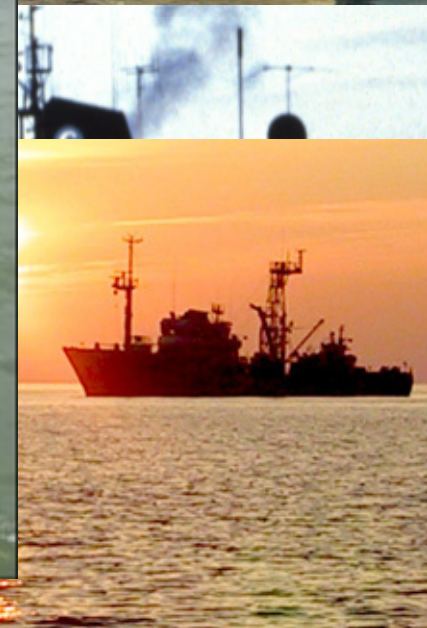
# Внутреннее строение Земли

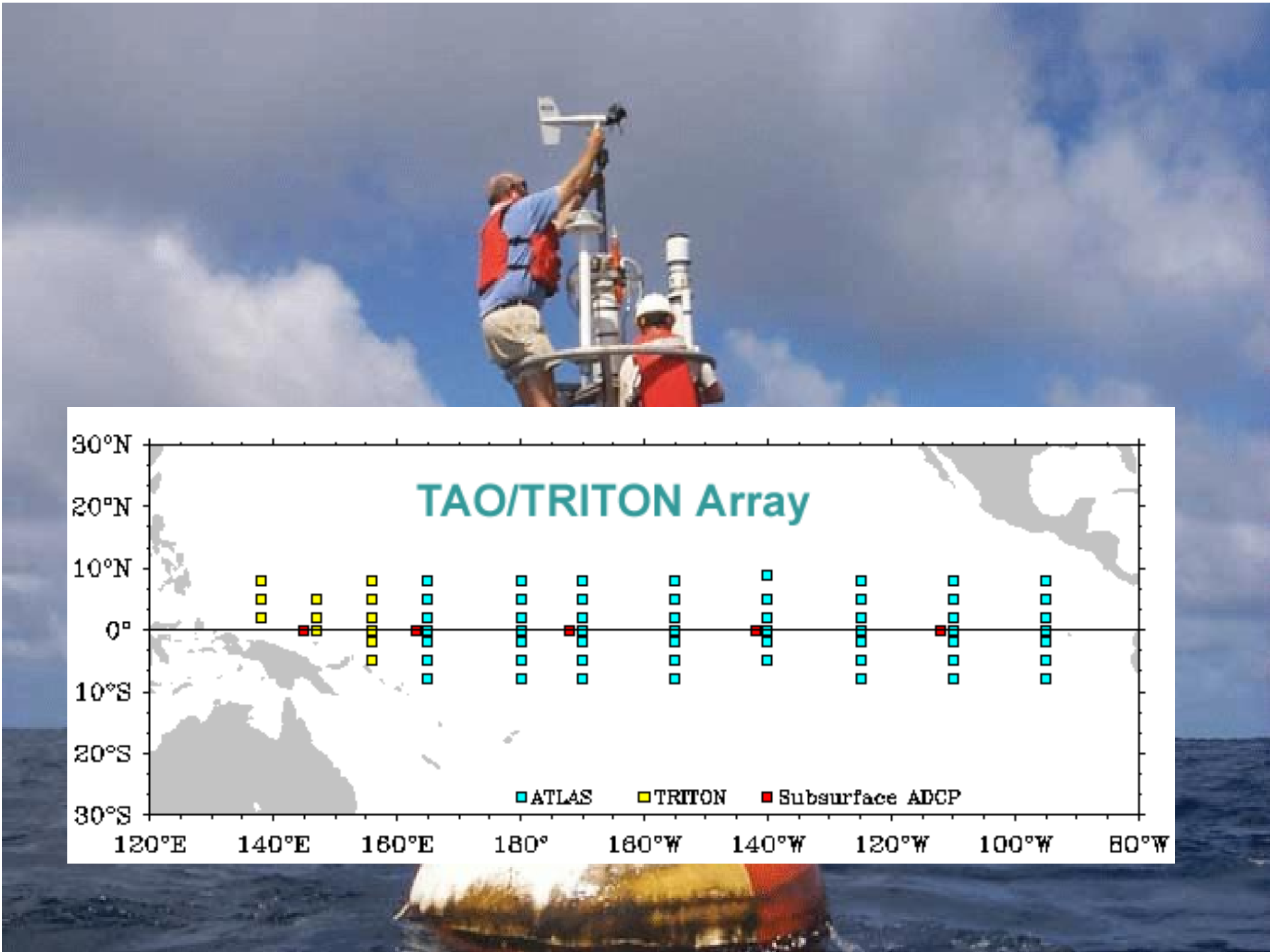


В отличие от атмосферы и гидросферы практически недоступно для прямого изучения

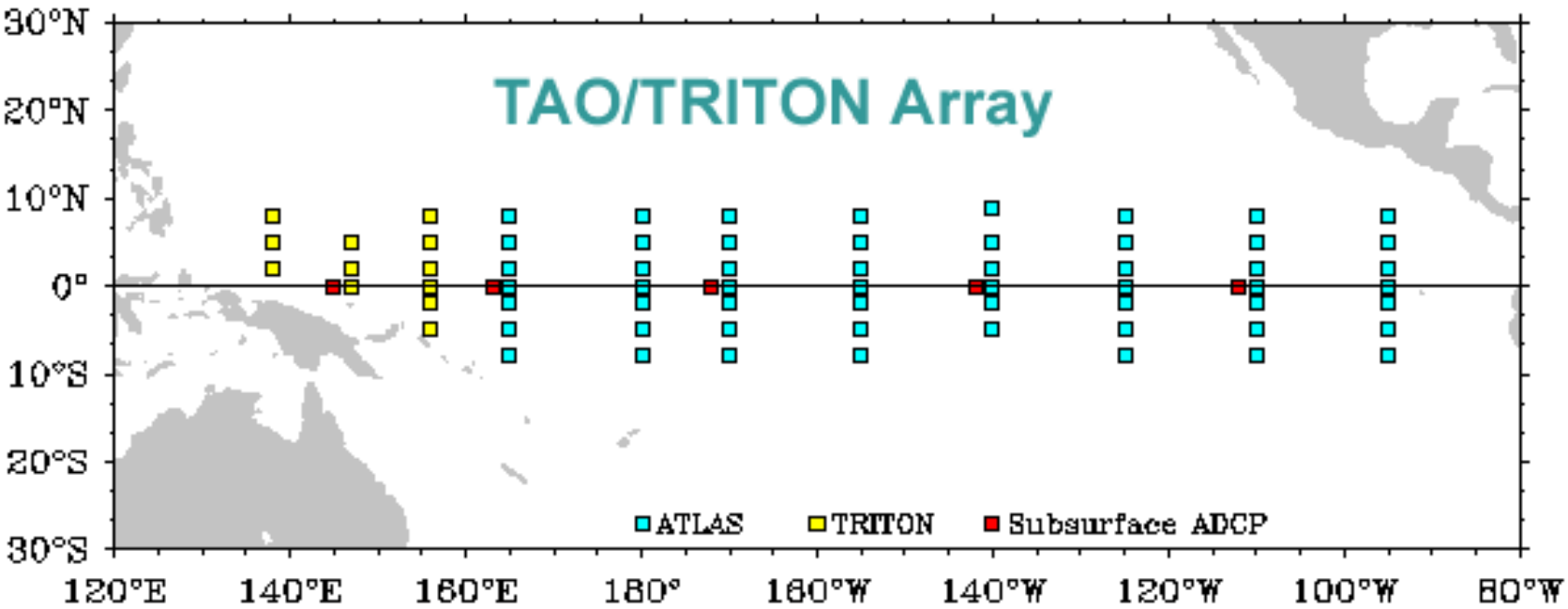
# Сеть метеостанций







# TAO/TRITON Array

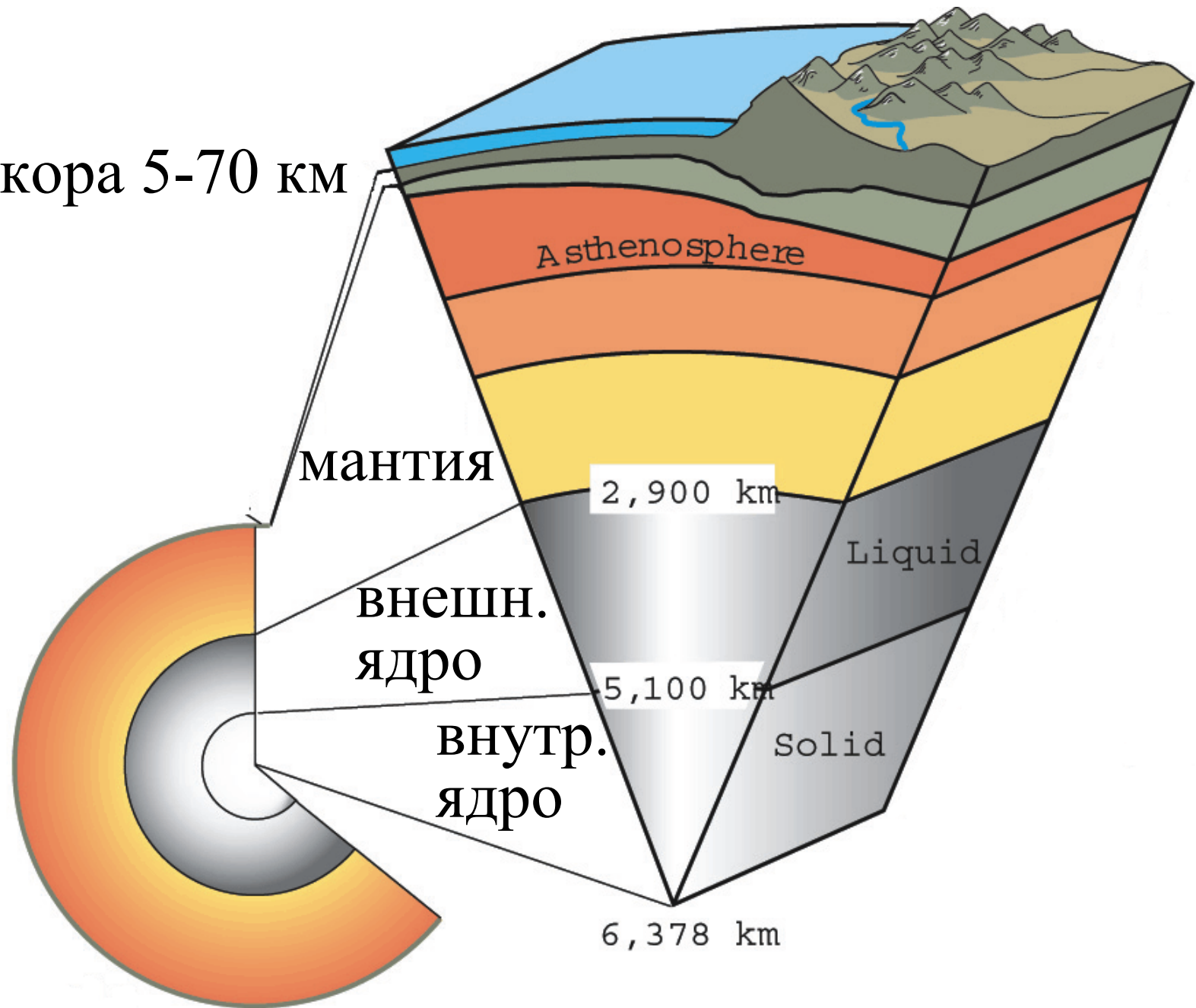




# Источники информации о внутреннем строении Земли:

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

кора 5-70 км



МАНТИЯ

Asthenosphere

2,900 km

ВНЕШН.  
ядро

Liquid

5,100 km

ВНУТР.  
ядро

Solid

6,378 km

# 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,  $^{40}\text{K}$ ,  
 $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$

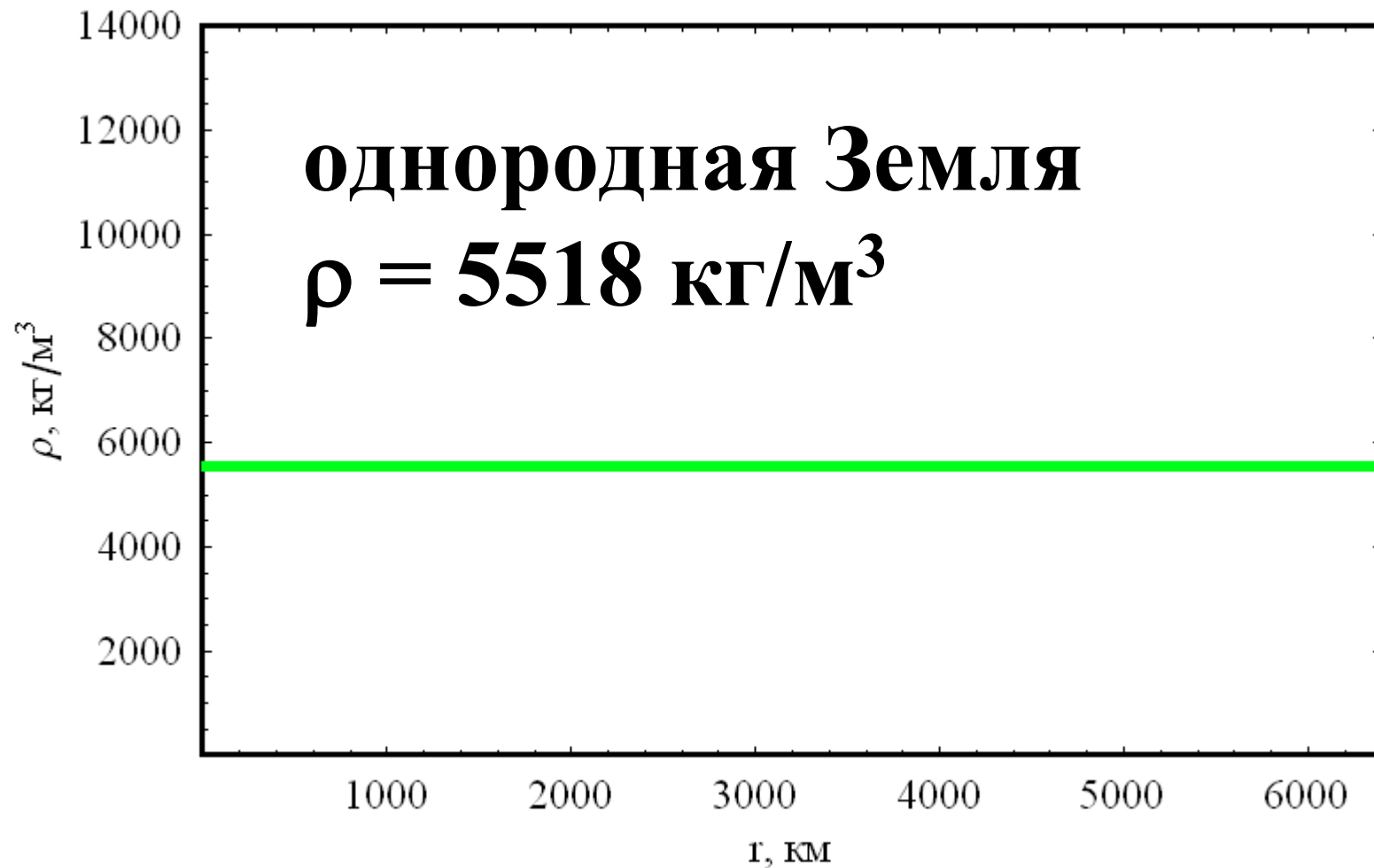
2. Гравитационная дифференциация

3. Приливная диссипация

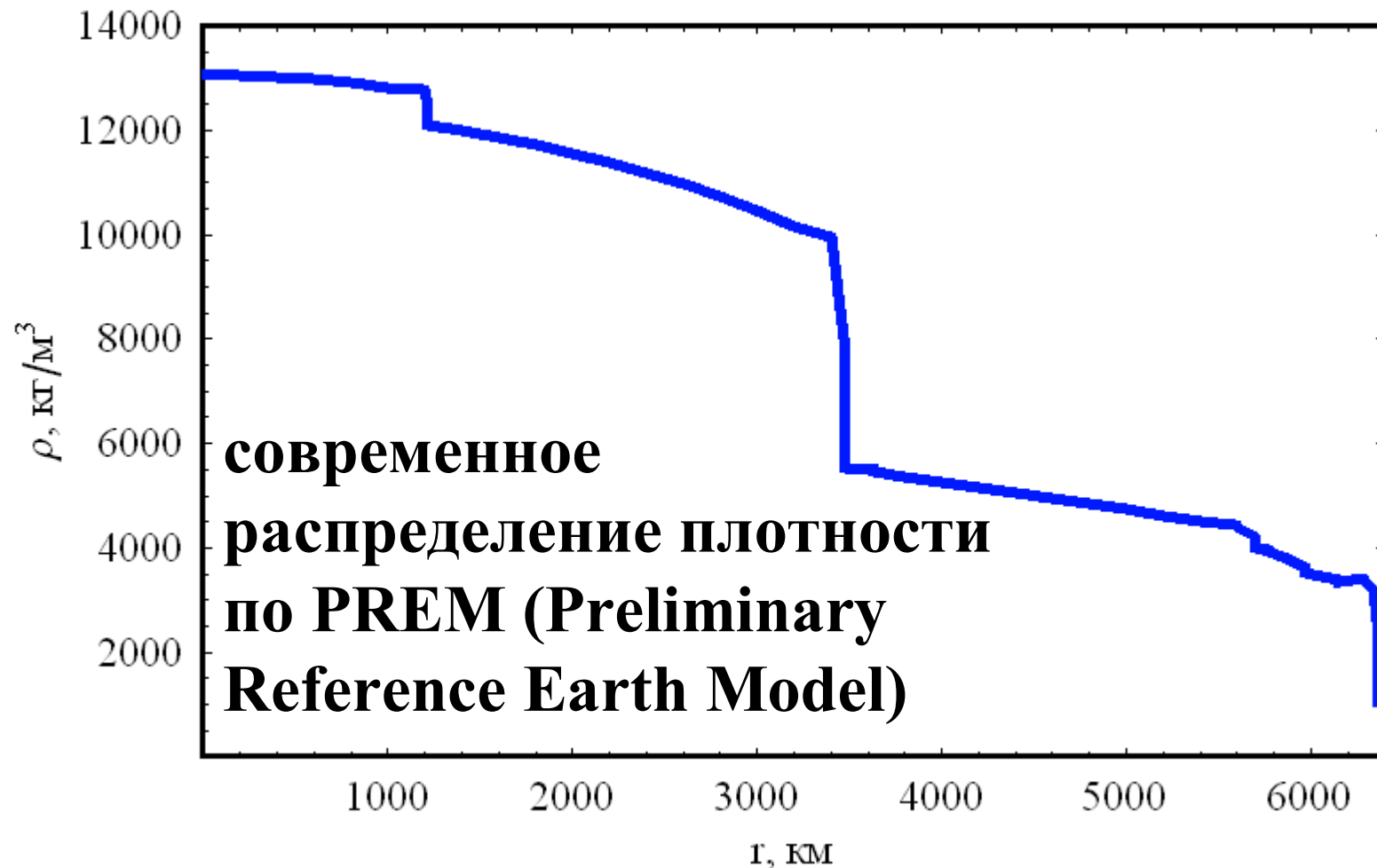
4. Гравитационное сжатие

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

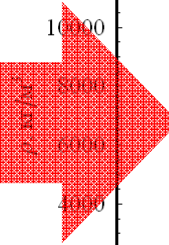
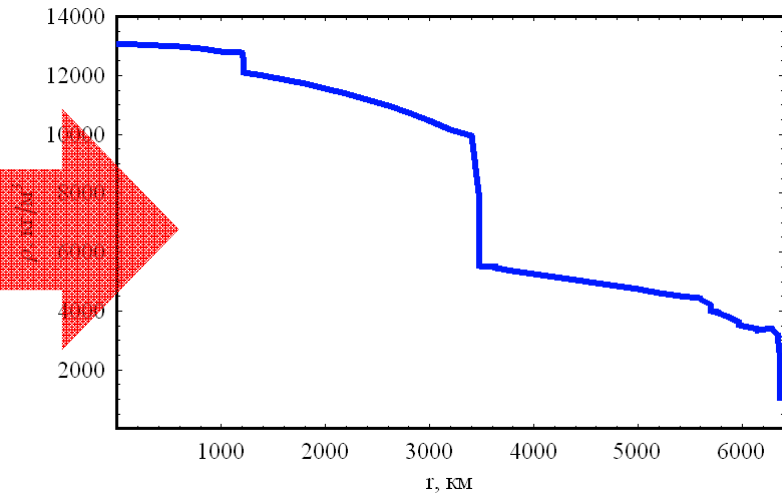
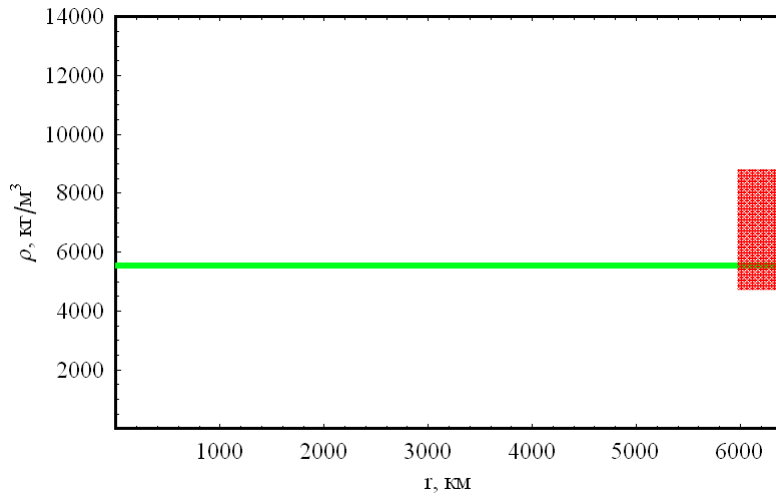
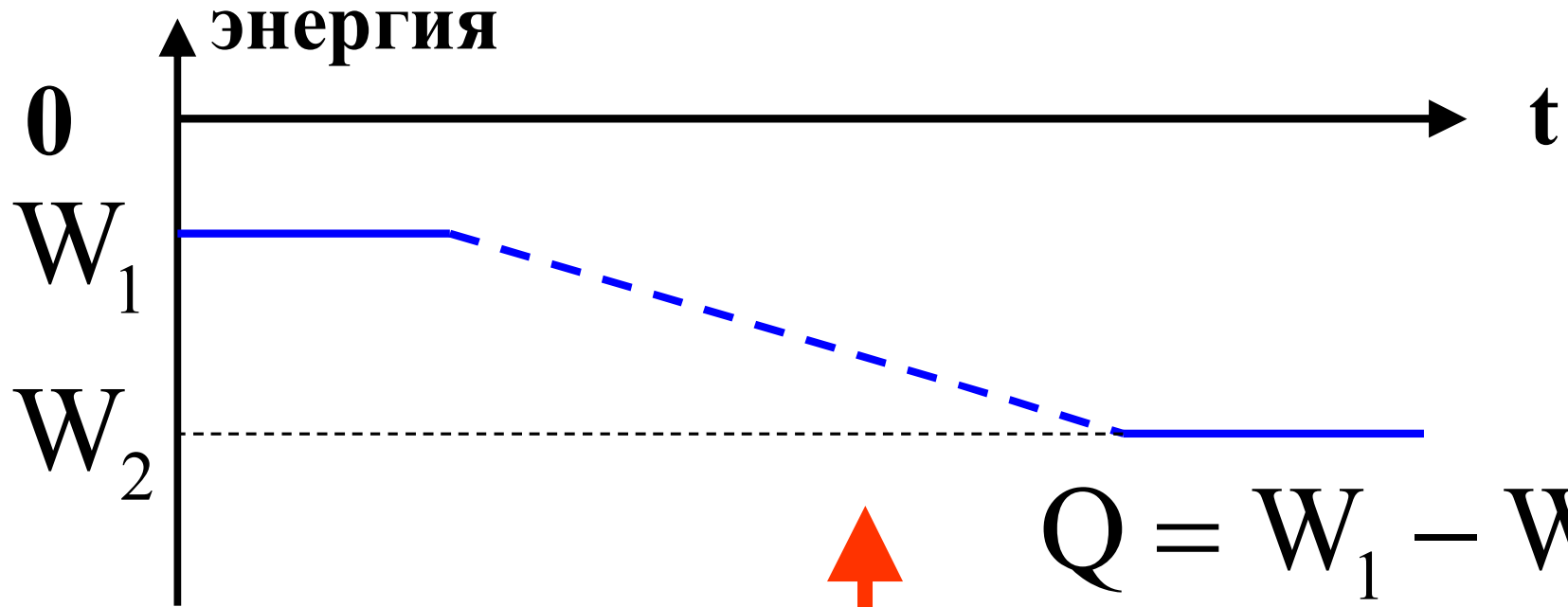
# Энергия гравитационной дифференциации



# Энергия гравитационной дифференциации



# Энергия гравитационной дифференциации



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

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

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

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

**Энергия гравитационной  
дифференциации**



# Время тепловой релаксации шара

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

6 371 000 м

$\chi$

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

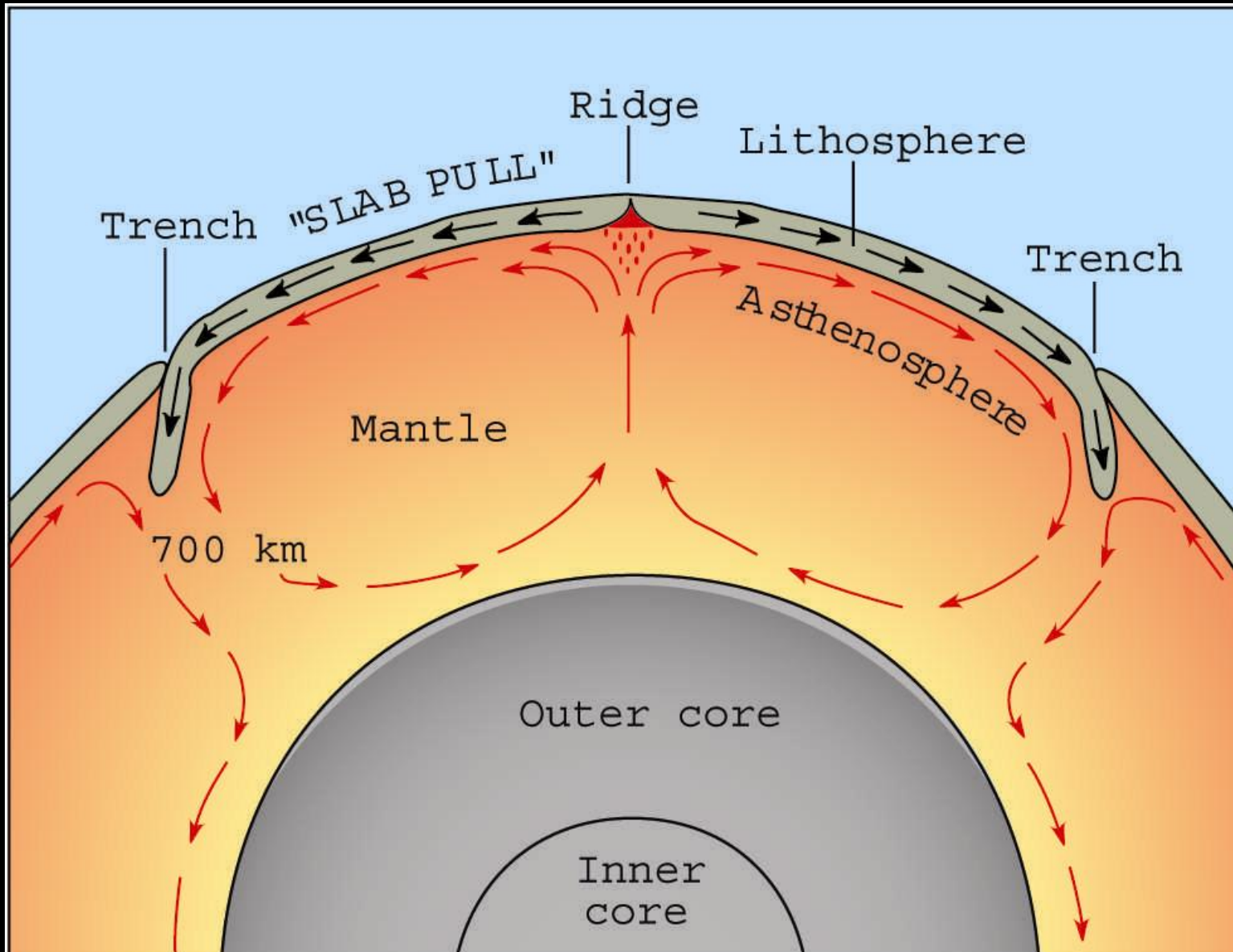
Коэффициент  
температуро-  
проводности  
[м<sup>2</sup>/с]

**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 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  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  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**

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

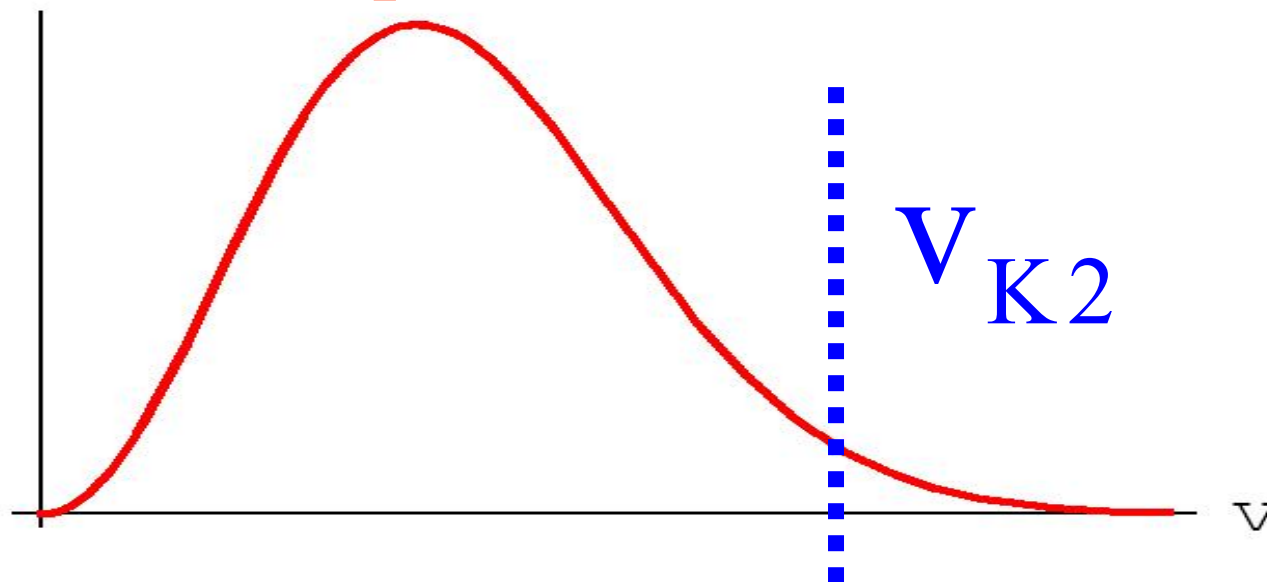
**наиболее вероятная тепловая скорость**

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

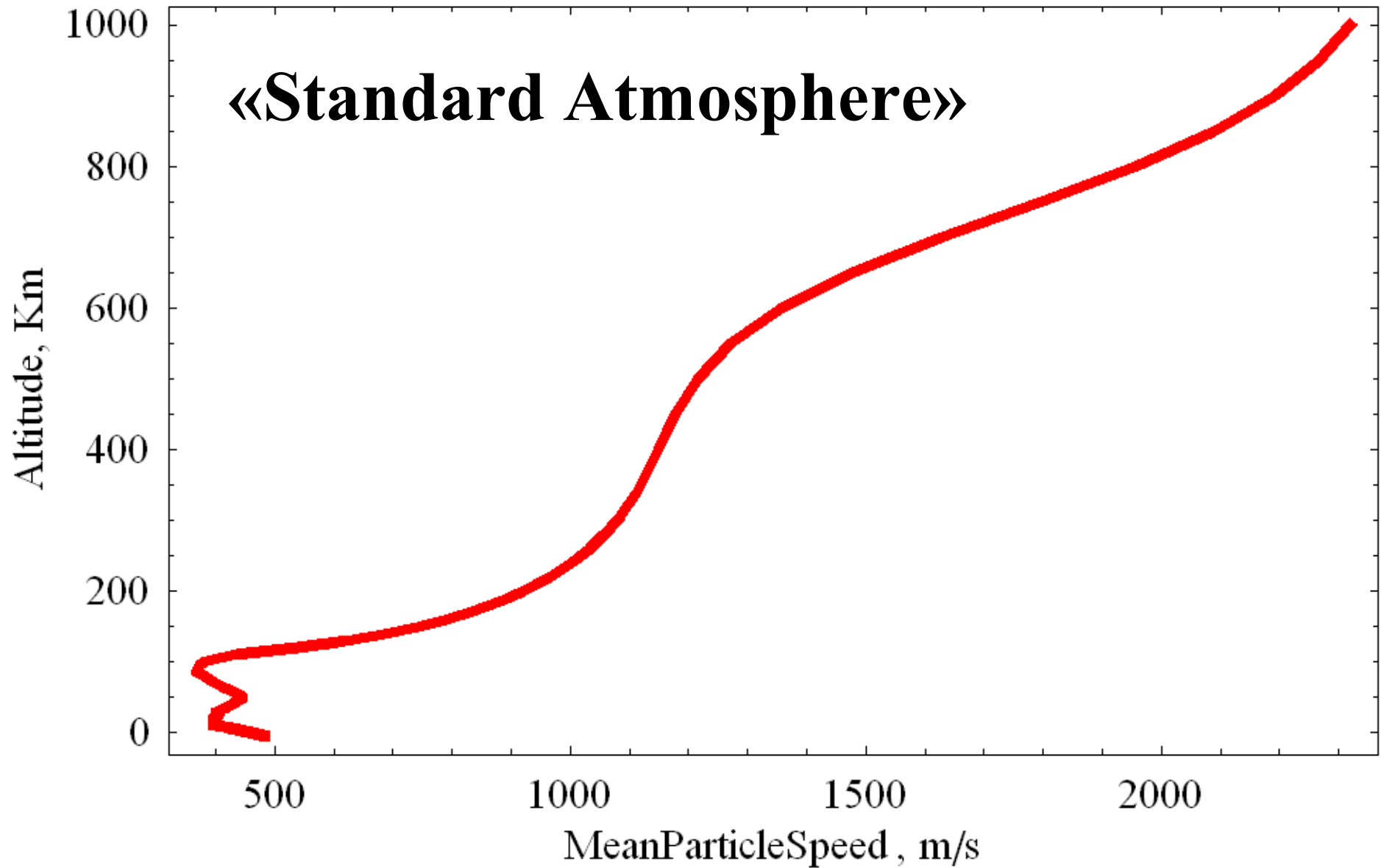
при  $T = 300 \text{ K}$

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

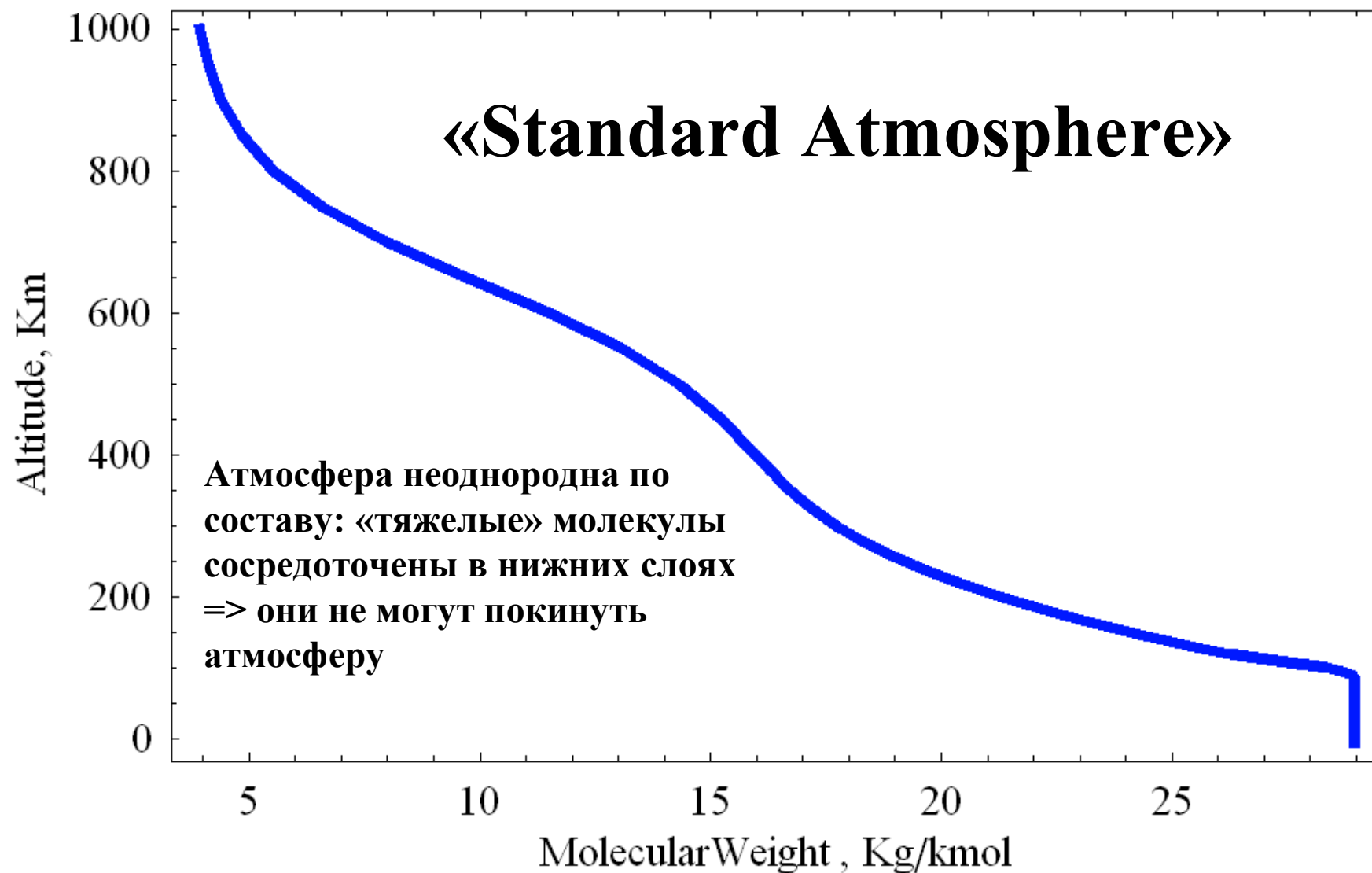
$f(v)$  **Распределение Максвелла**



# 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  $\exists$  источники этих газов**

# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №3

---

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

Структура и  
состав  
современной  
атмосферы



**Масса атмосферы**

$\sim 5 \cdot 10^{18}$  кг

**Масса Земли**

$\sim 6 \cdot 10^{24}$  кг

## **Ингредиенты Солнечной системы**

*металлы*

*и*

**0.6%**

**силикаты**

*легкие газы*

*и*

**99.4%**

**льды**

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

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

**Радиус Земли**

**6371 км**

# 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>

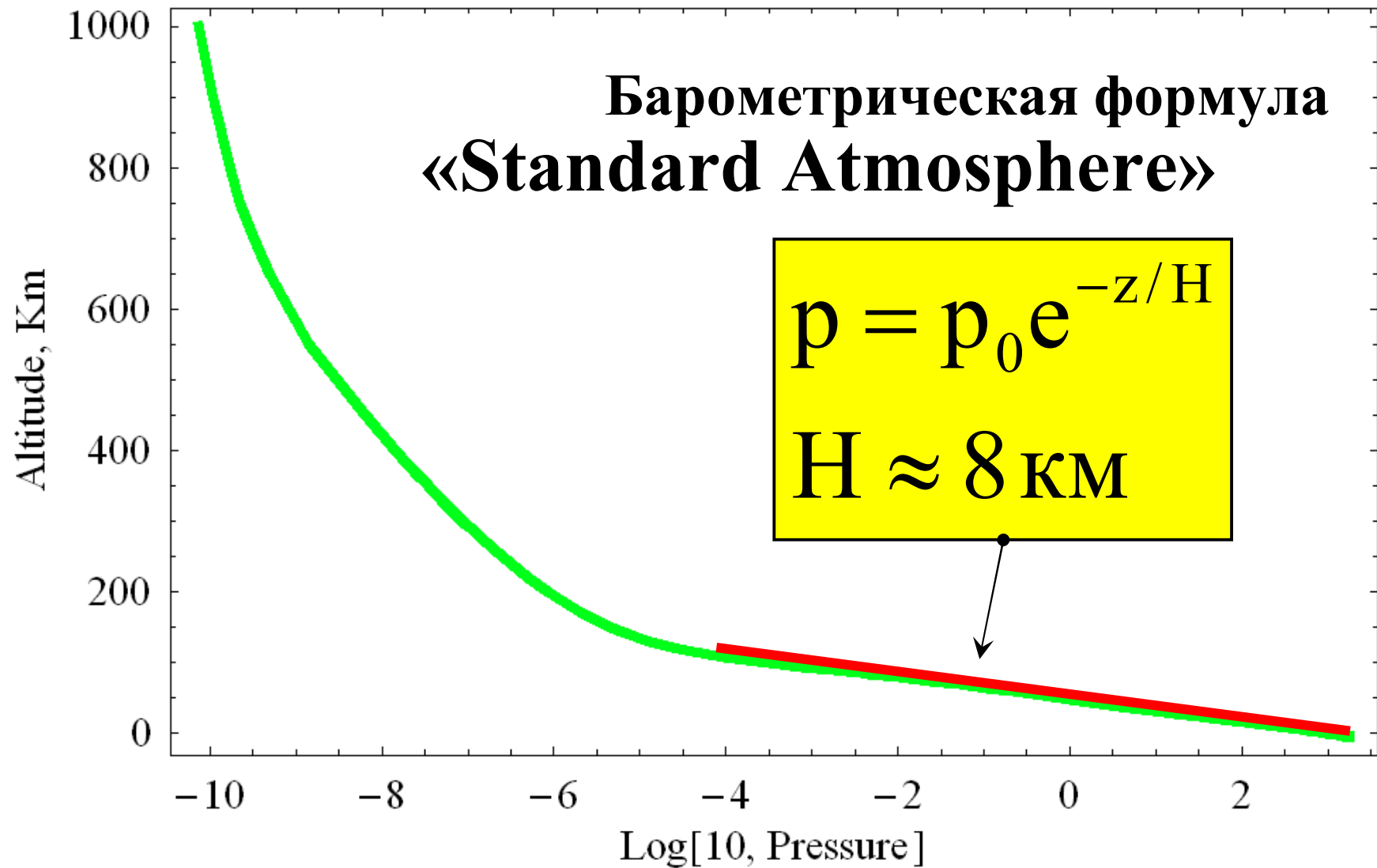
## Постоянные компоненты воздуха

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

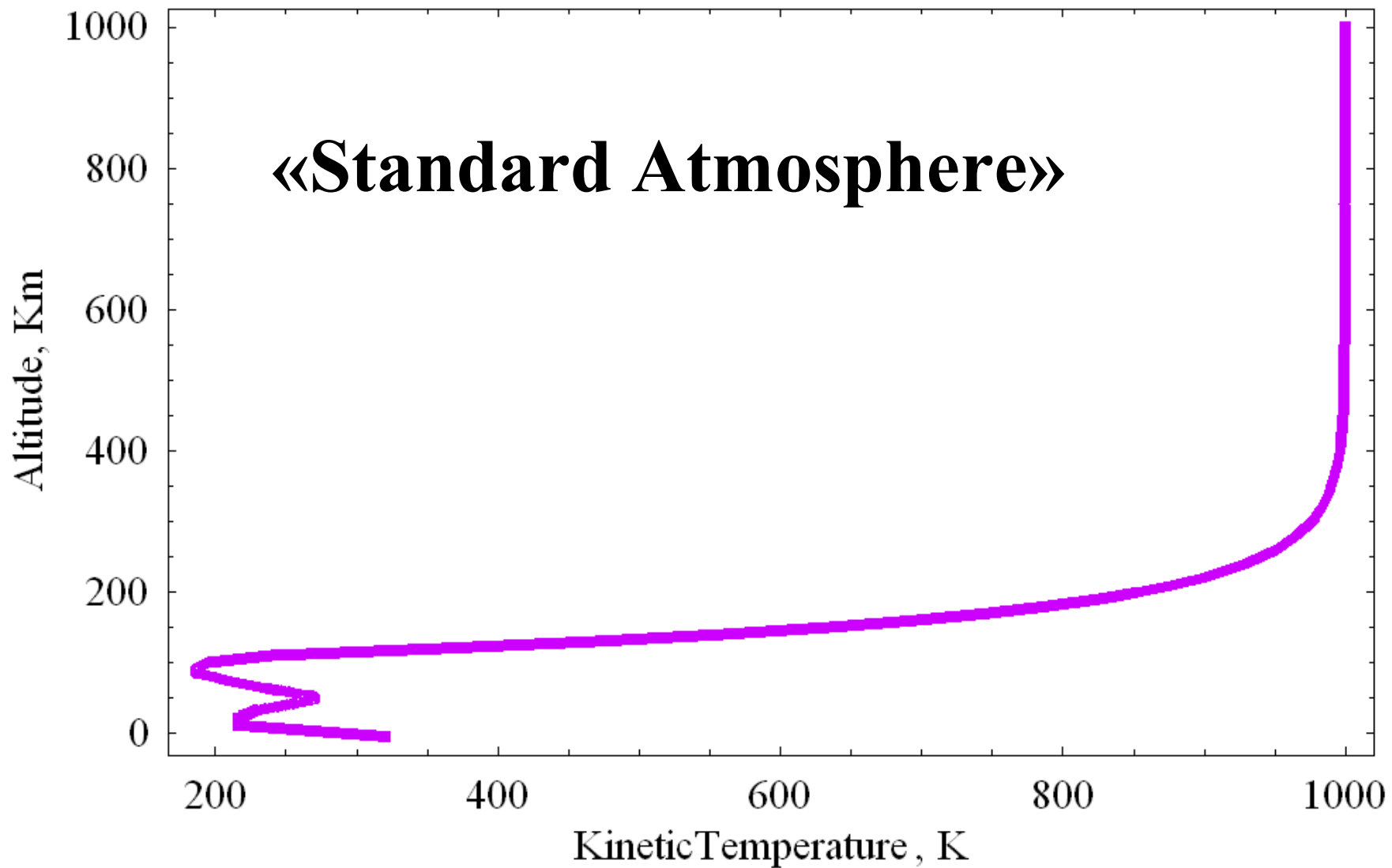
## Переменные компоненты воздуха

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

# Зависимость давления воздуха от высоты

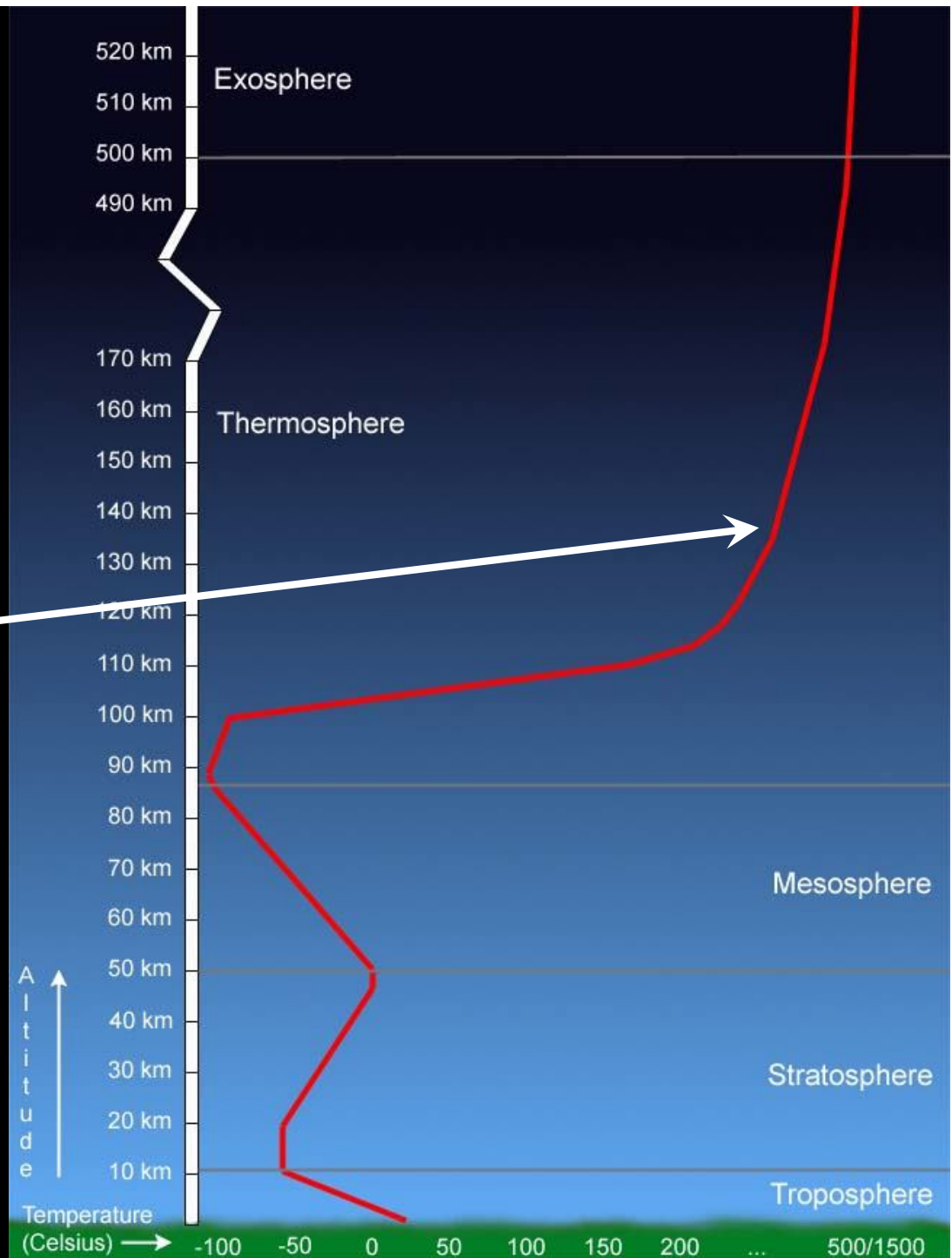


# Зависимость температуры воздуха от высоты



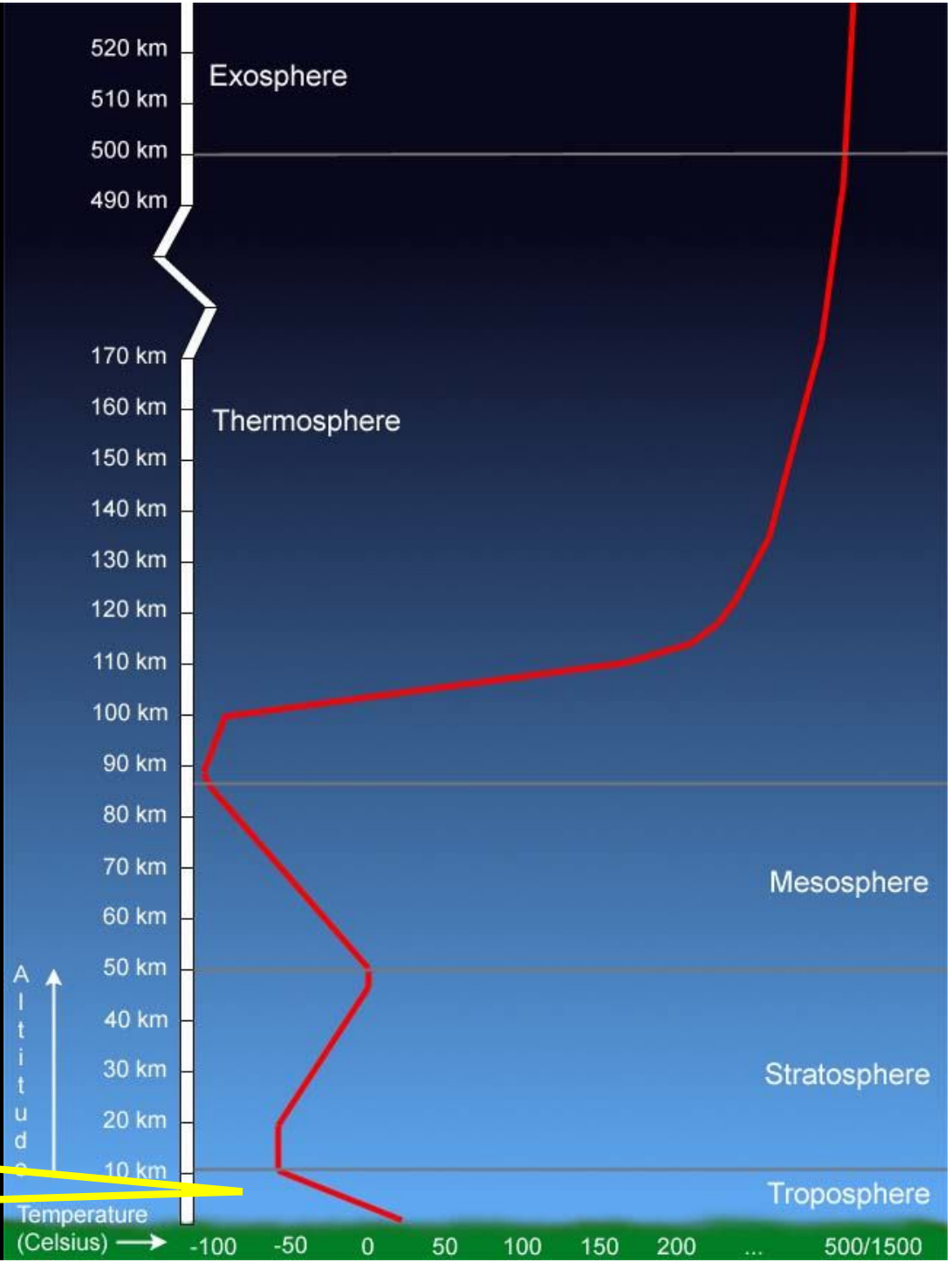
# Вертикальная структура атмосферы

(классификация по изменению температуры с высотой)



от гр. **tropos** –  
поворот, изменение

**тропосфера**





□ Температура убывает с высотой ~6.5 К/км

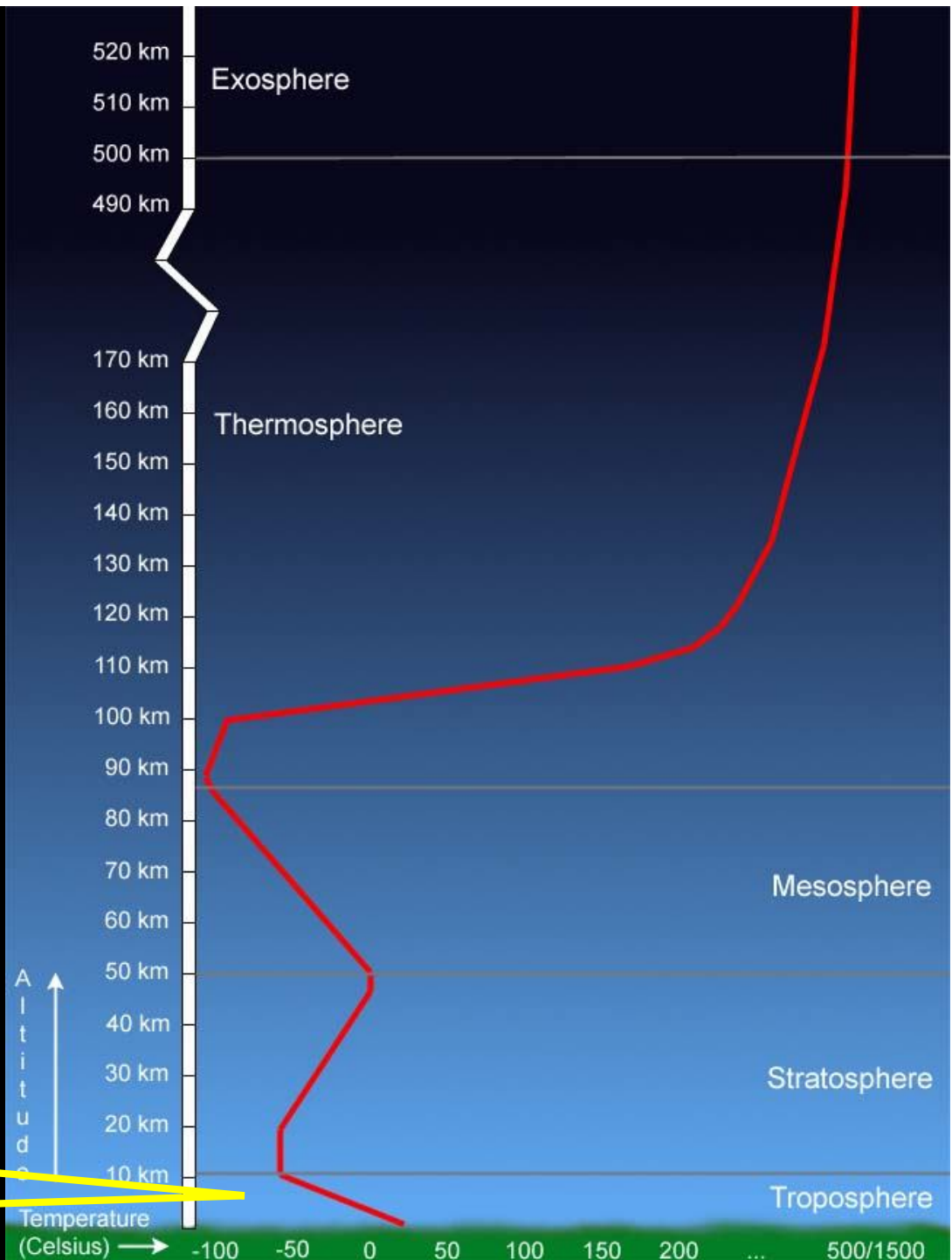
□ экватор:  $T_{\min} = -62^{\circ}\text{C}$ ,  
полюса:  $T_{\min} = -45^{\circ}\text{C}$

□ Высота от 7-8 км в полярных областях до 15-16 км в районе экватора

□ Неустойчива, охвачена сильными горизонтальными и вертикальными движениями

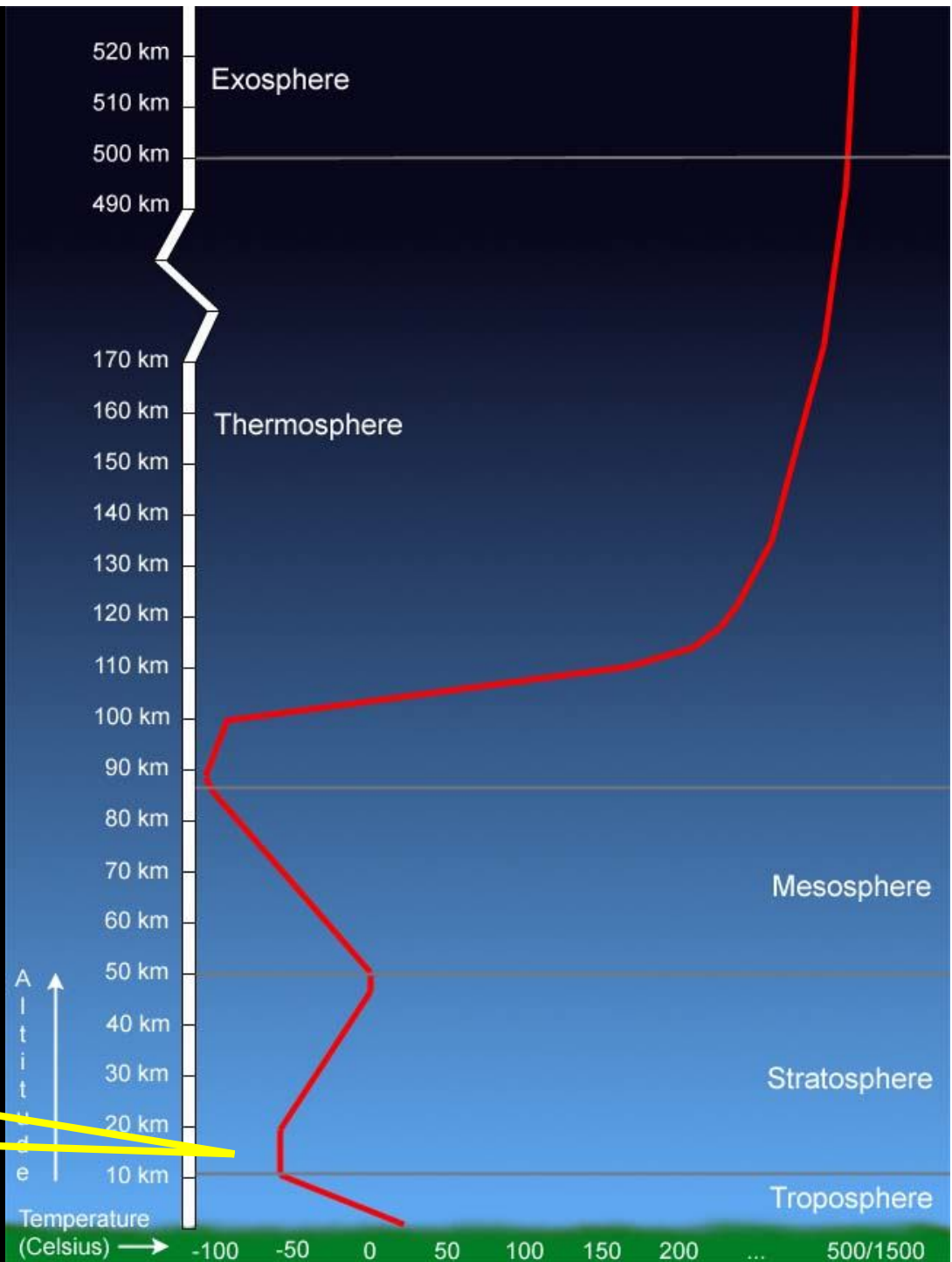
□ Погода, климат, облака, осадки

тропофера



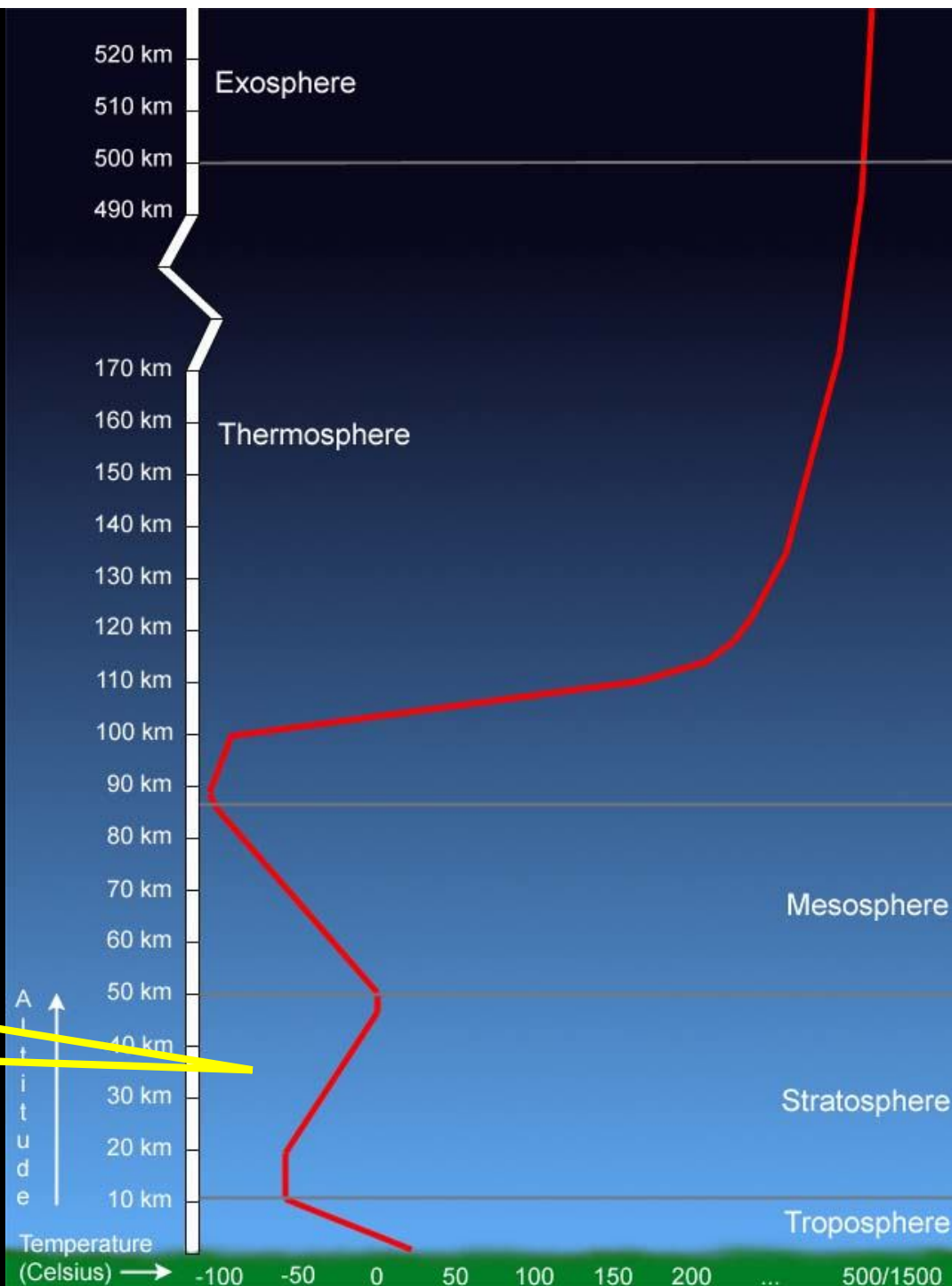
**Переходный  
слой, в котором  
наблюдается  
минимум  
температуры  
(открыт в 1899 г)**

**тропопауза**



от лат. **stratum** –  
настил, слой

стратосфера

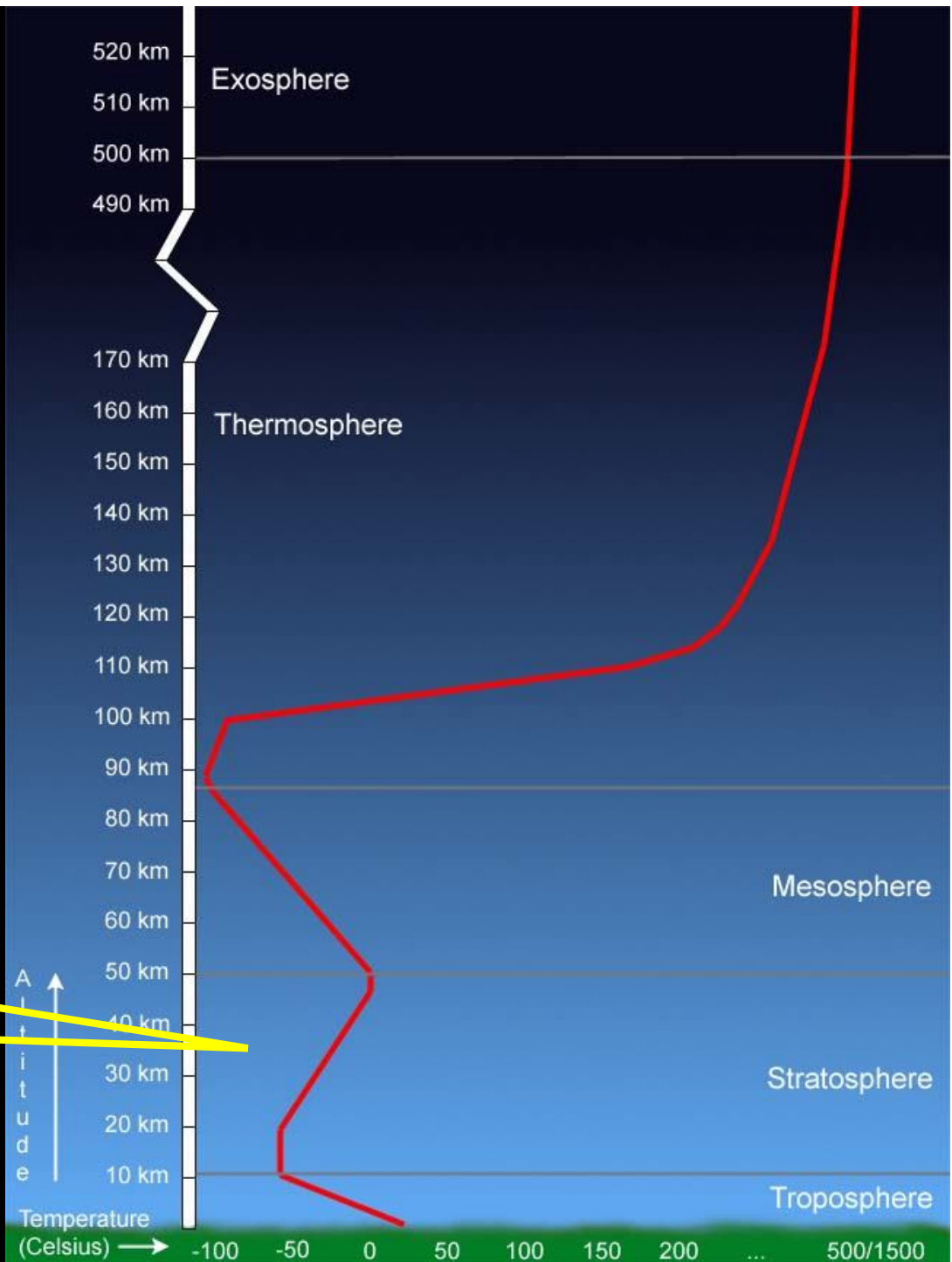


□ Простирается до высот ~50 км

□ Ограничивает высоту образования облаков

□ Незначительное повышение температуры объясняется поглощением солнечной УФ радиации озоном

стратосфера

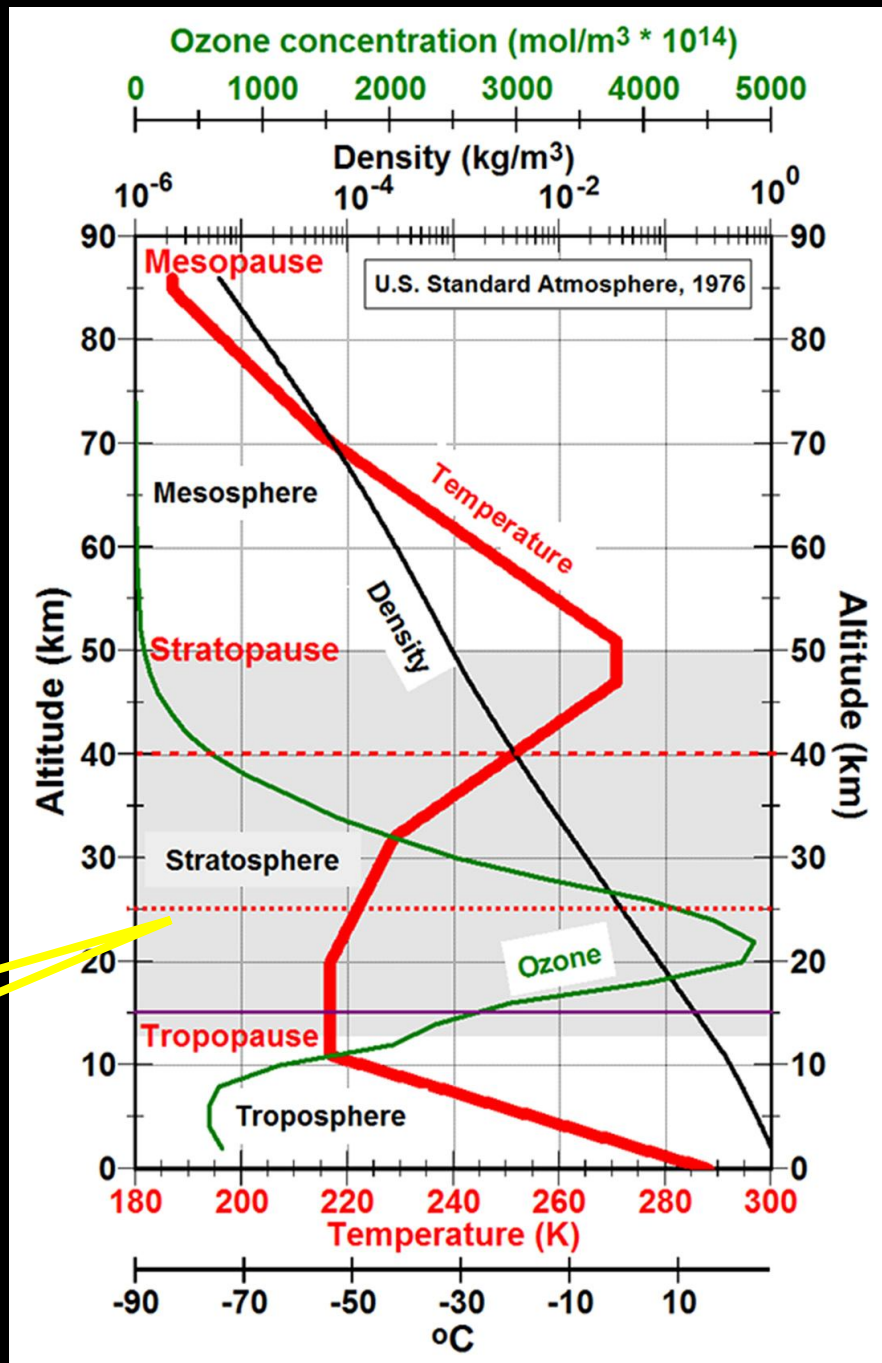


□ Простирается до высот ~50 км

□ Ограничивает высоту образования облаков

□ Незначительное повышение температуры объясняется поглощением солнечной УФ радиации озоном

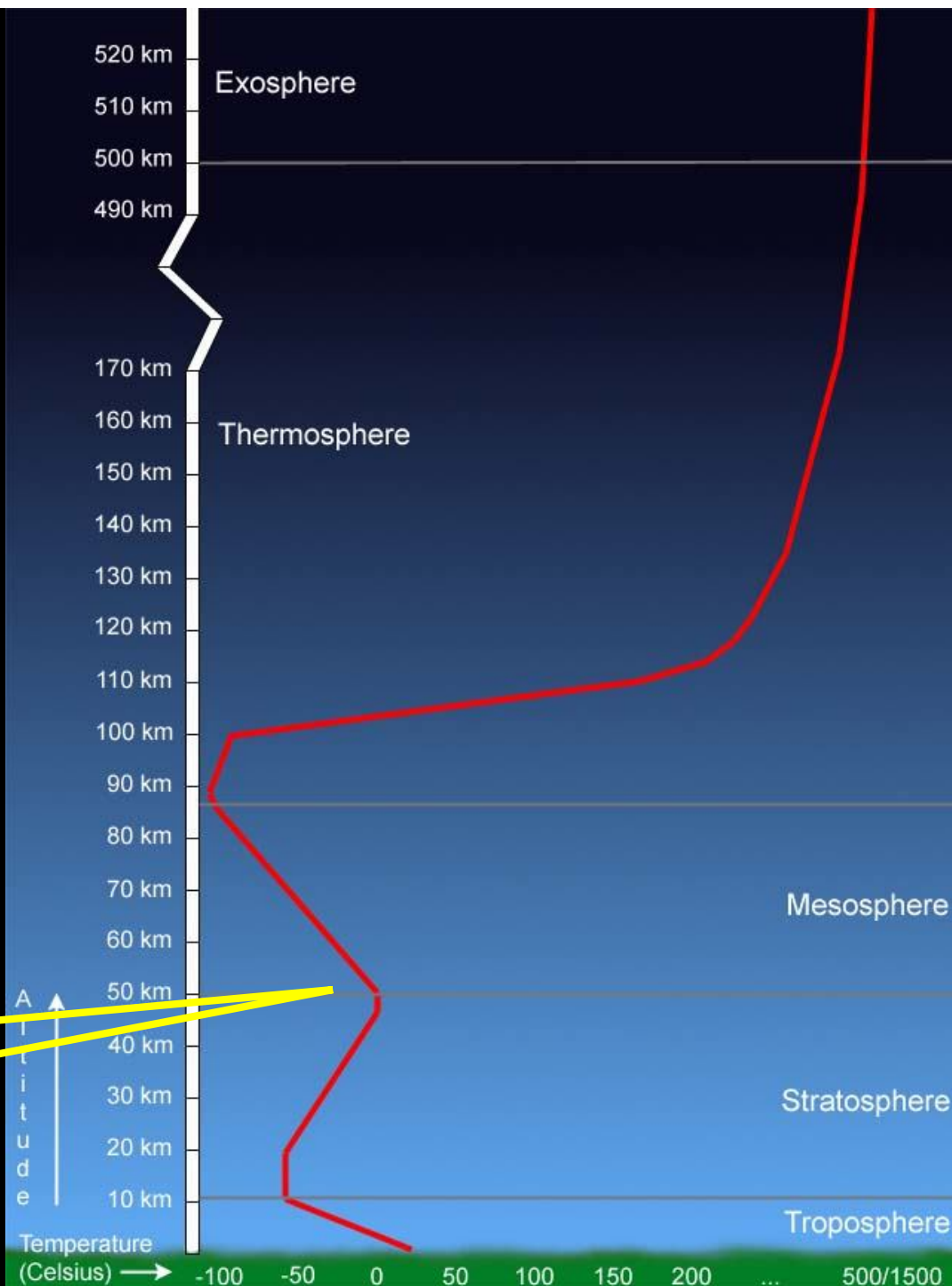
стратосфера



□ **Переходный слой на высоте ~50 км, что значительно выше уровня максимальной концентрации озона**

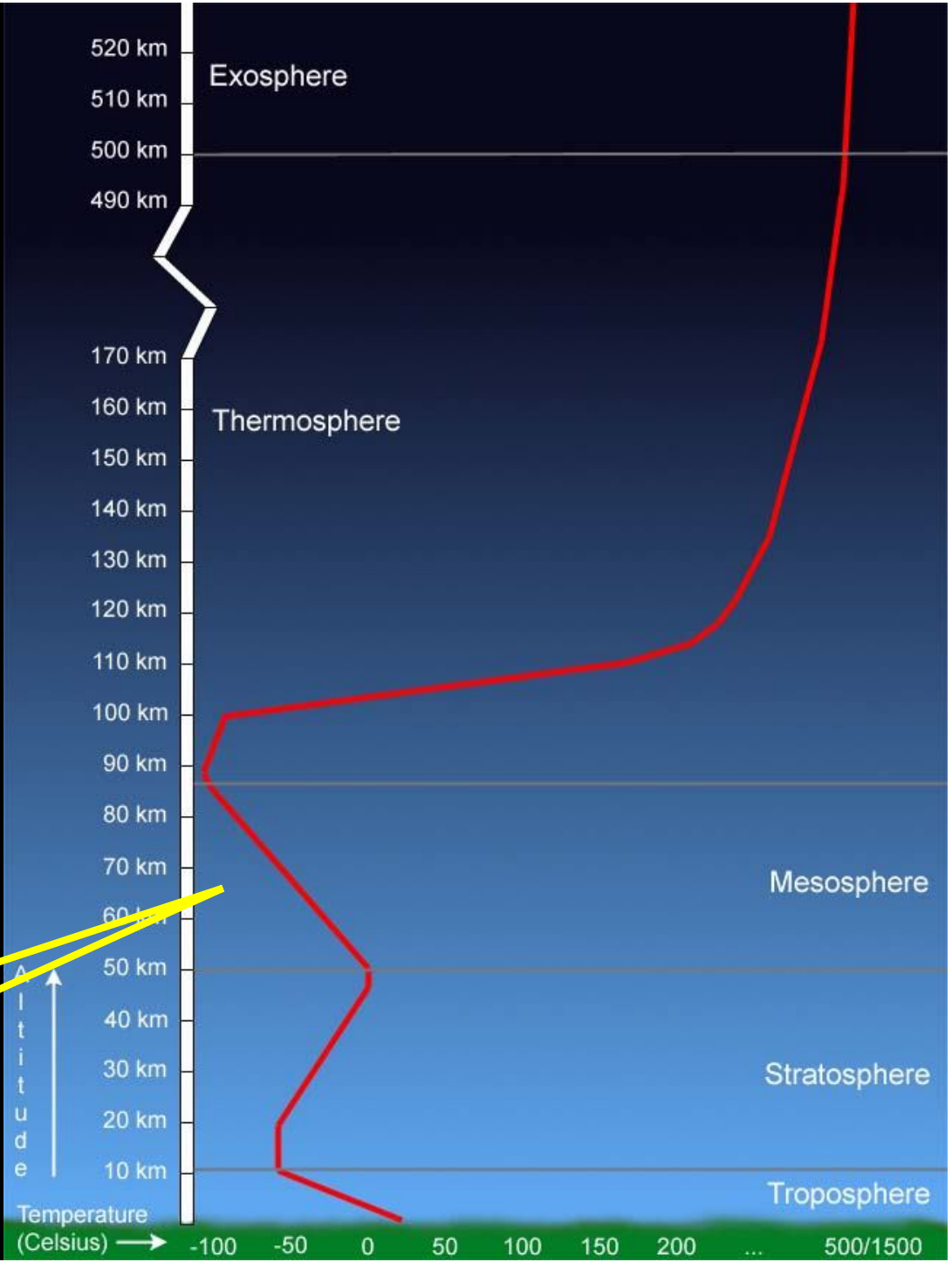
□ **Температура достигает 0°C**

**стратопауза**



от гр. **mesos** –  
средний,  
промежуточный

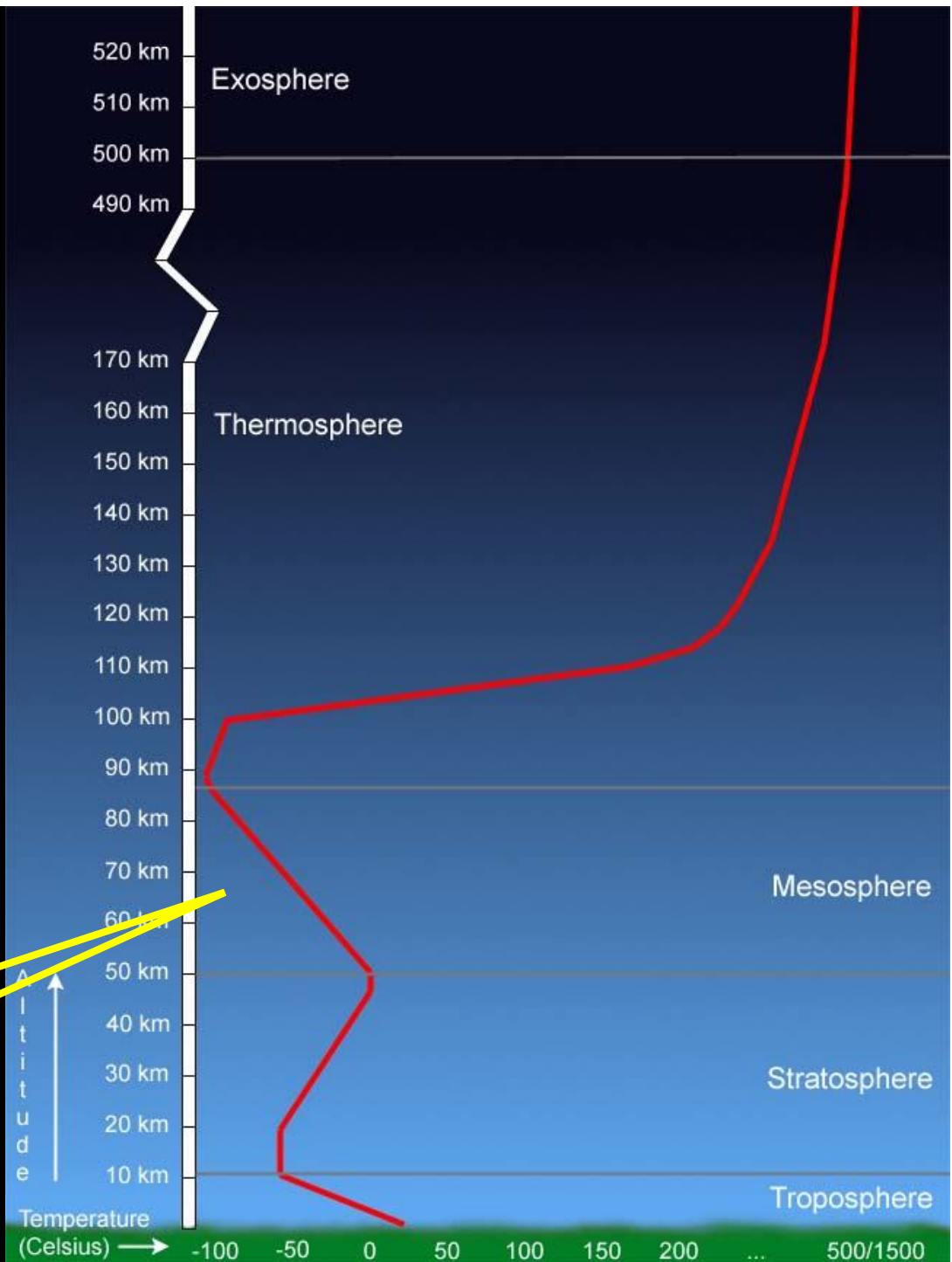
мезосфера



□ На высотах от 50 до 80 км

□ Температура воздуха понижается

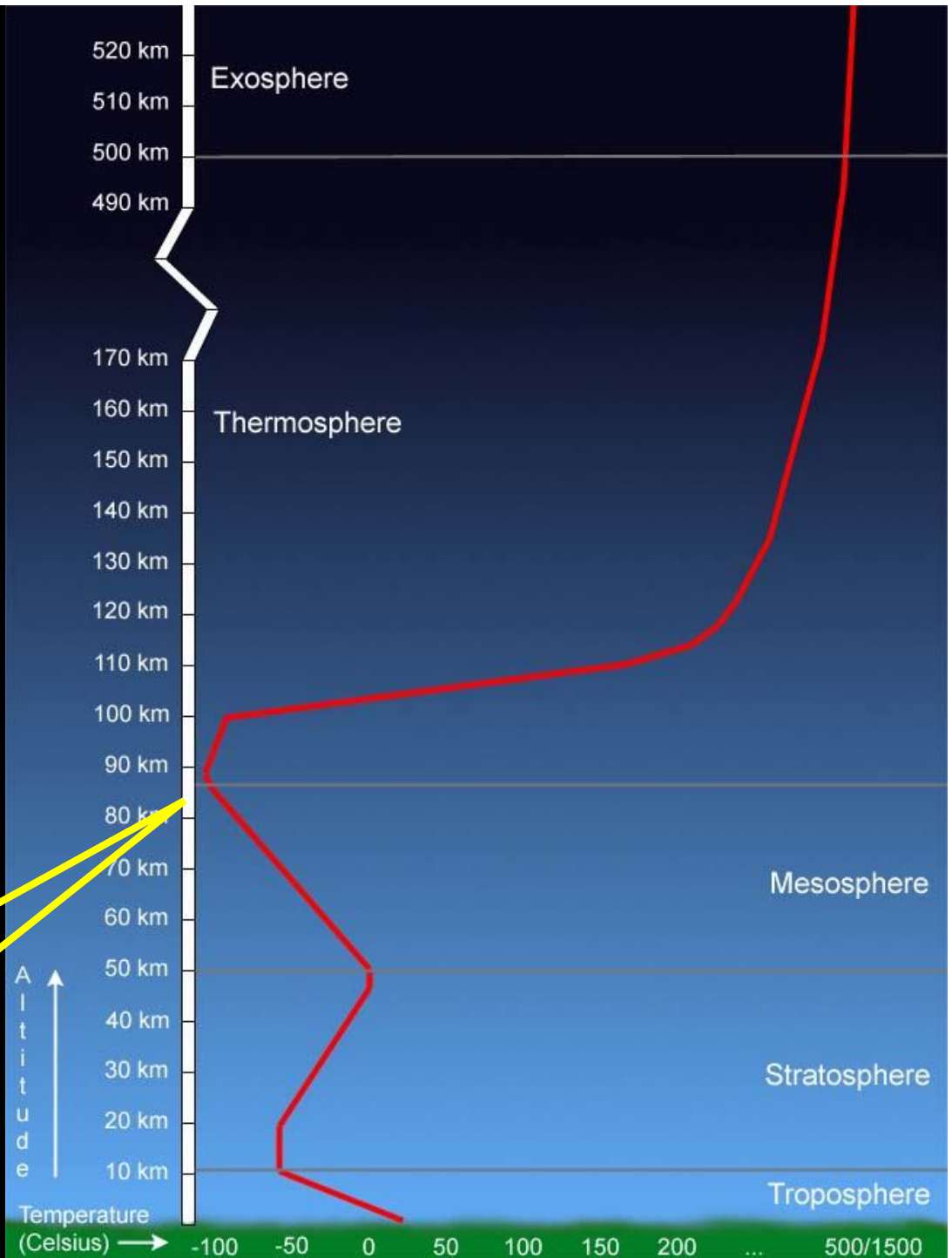
мезосфера





Переходный слой  
на высотах ~ 80 км

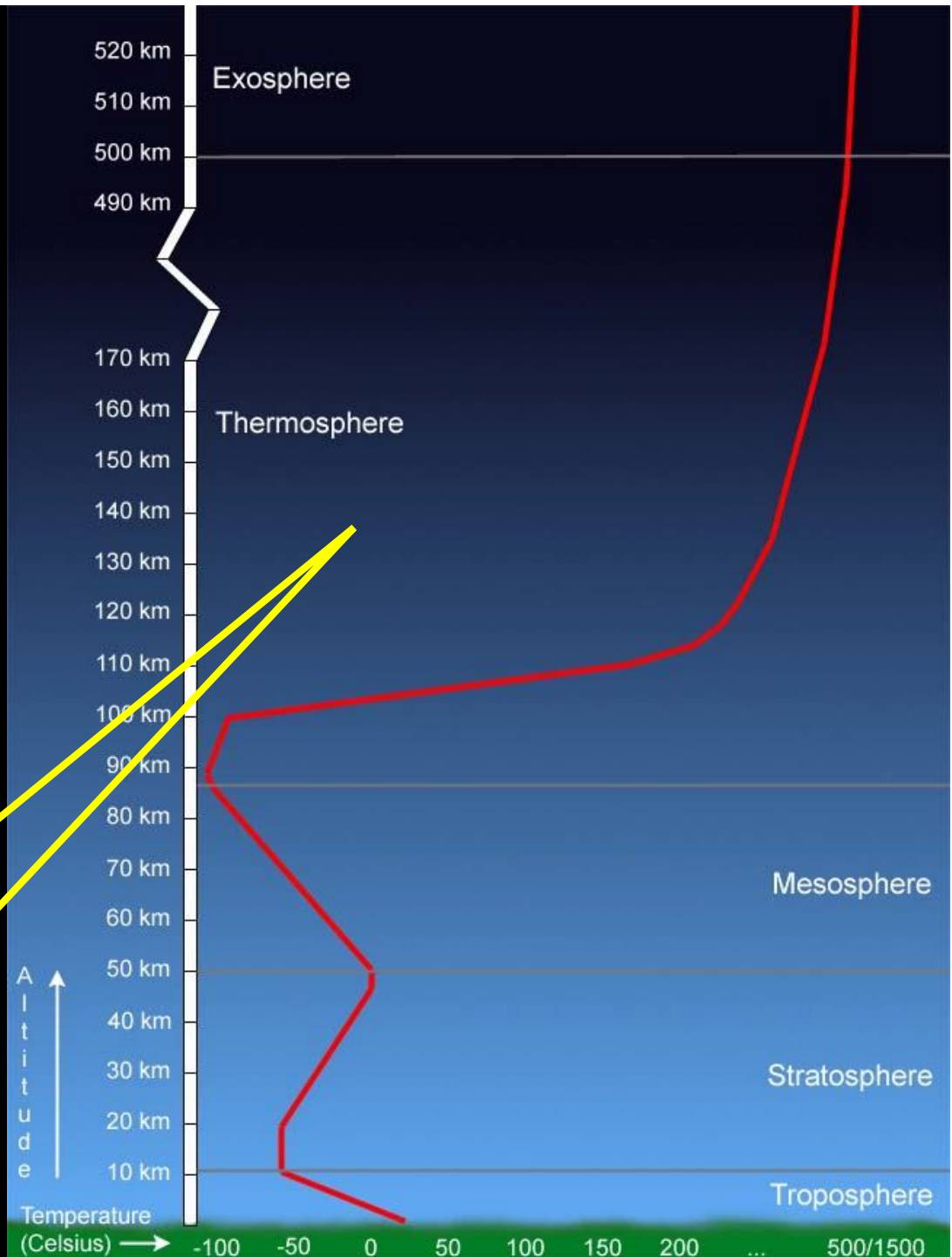
мезопауза



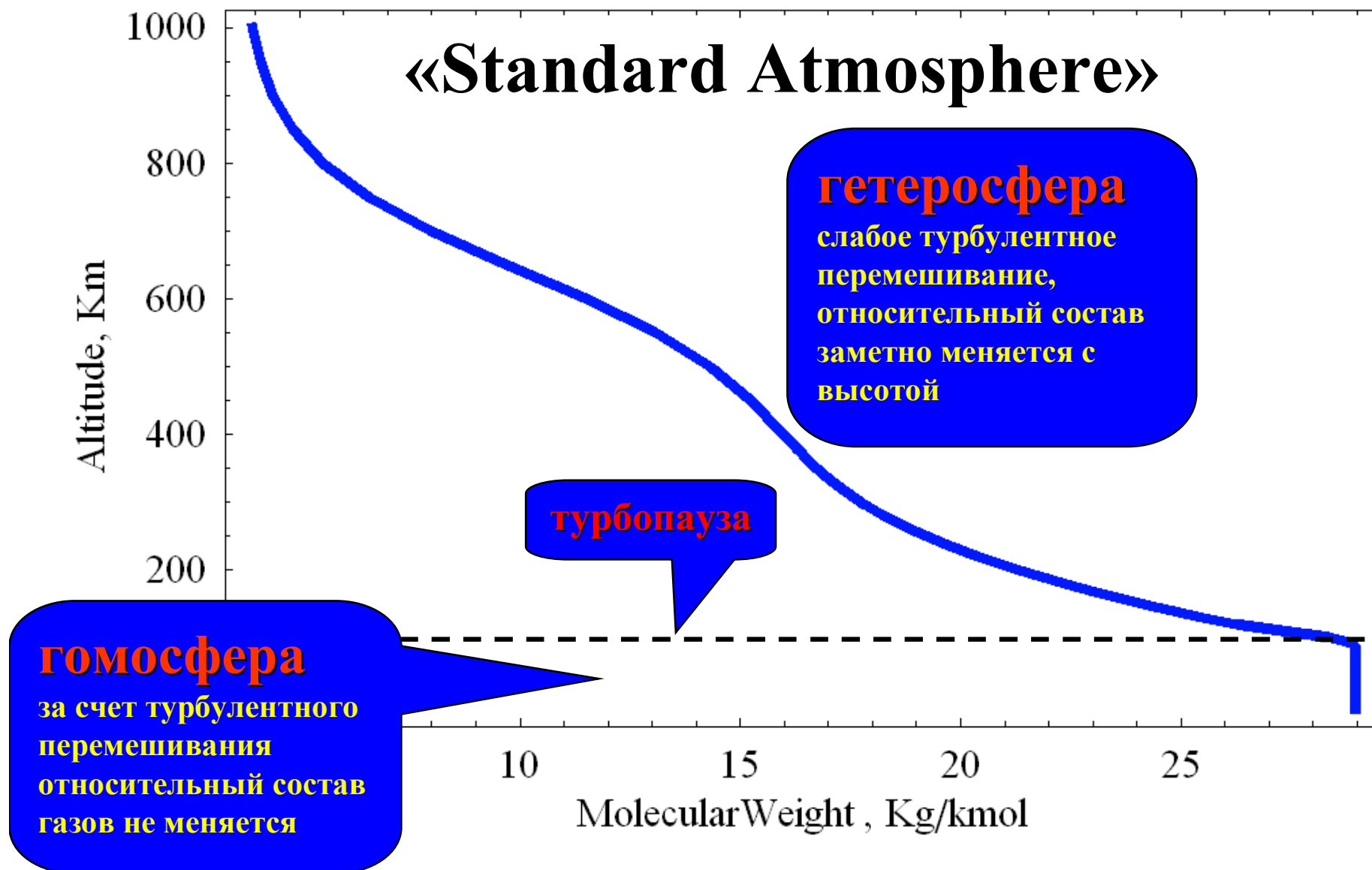
□ Температура увеличивается до ~1000°C за счет поглощения коротковолновой части солнечной радиации

□ Высокая степень ионизации атмосферных газов

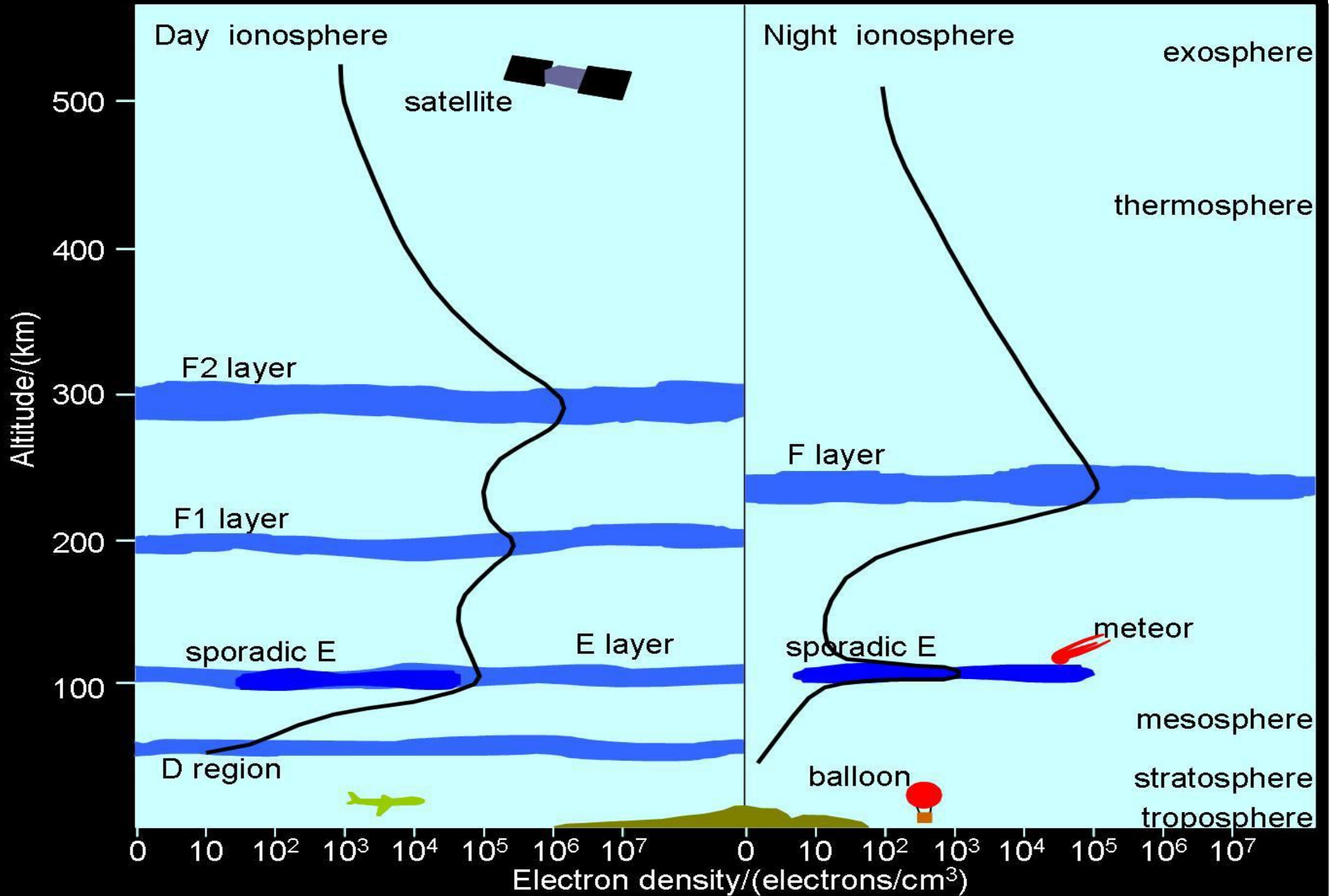
термосфера



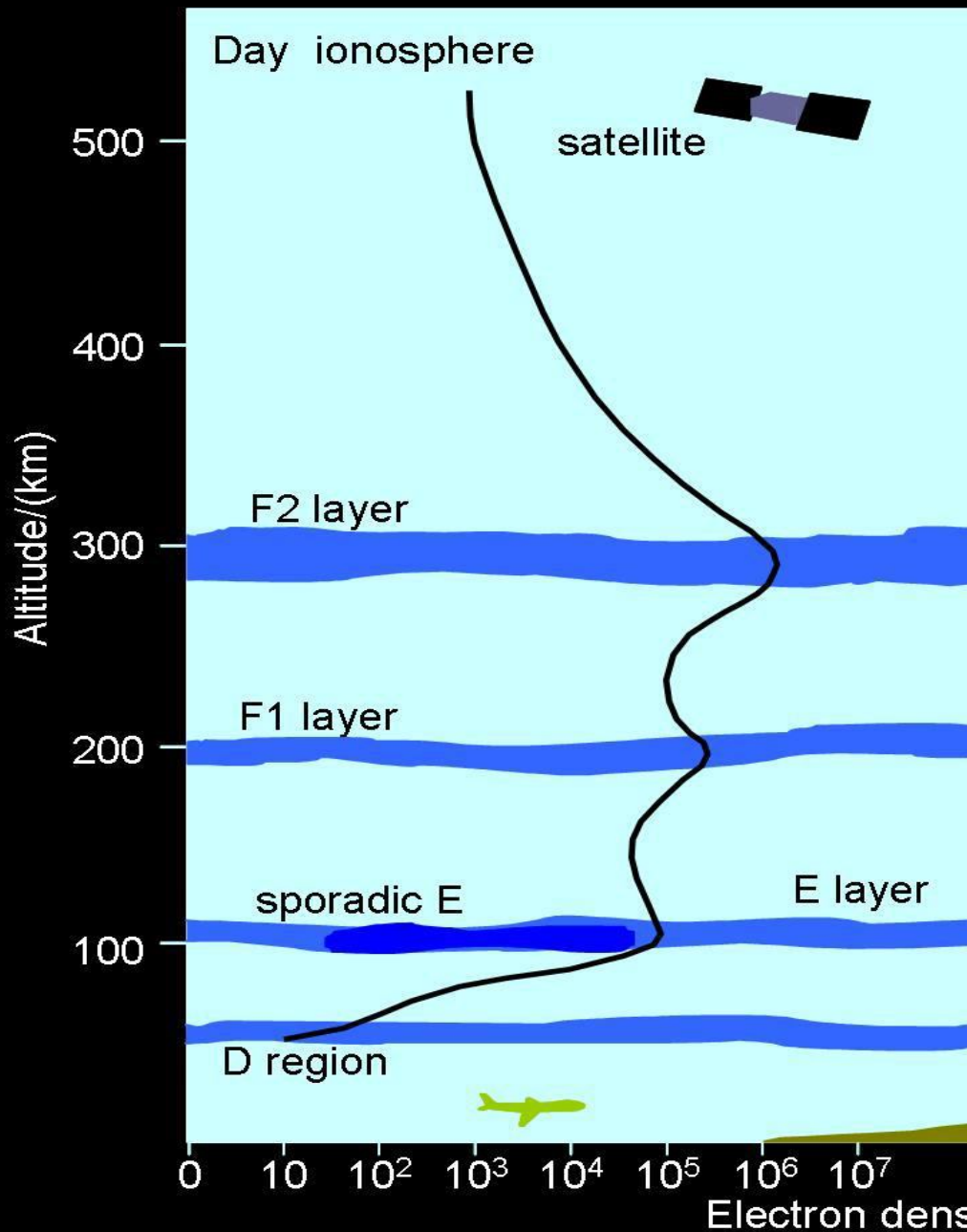
# Зависимость среднего молекулярного веса от высоты



# Ионосфера



# Ионосфера



Night io



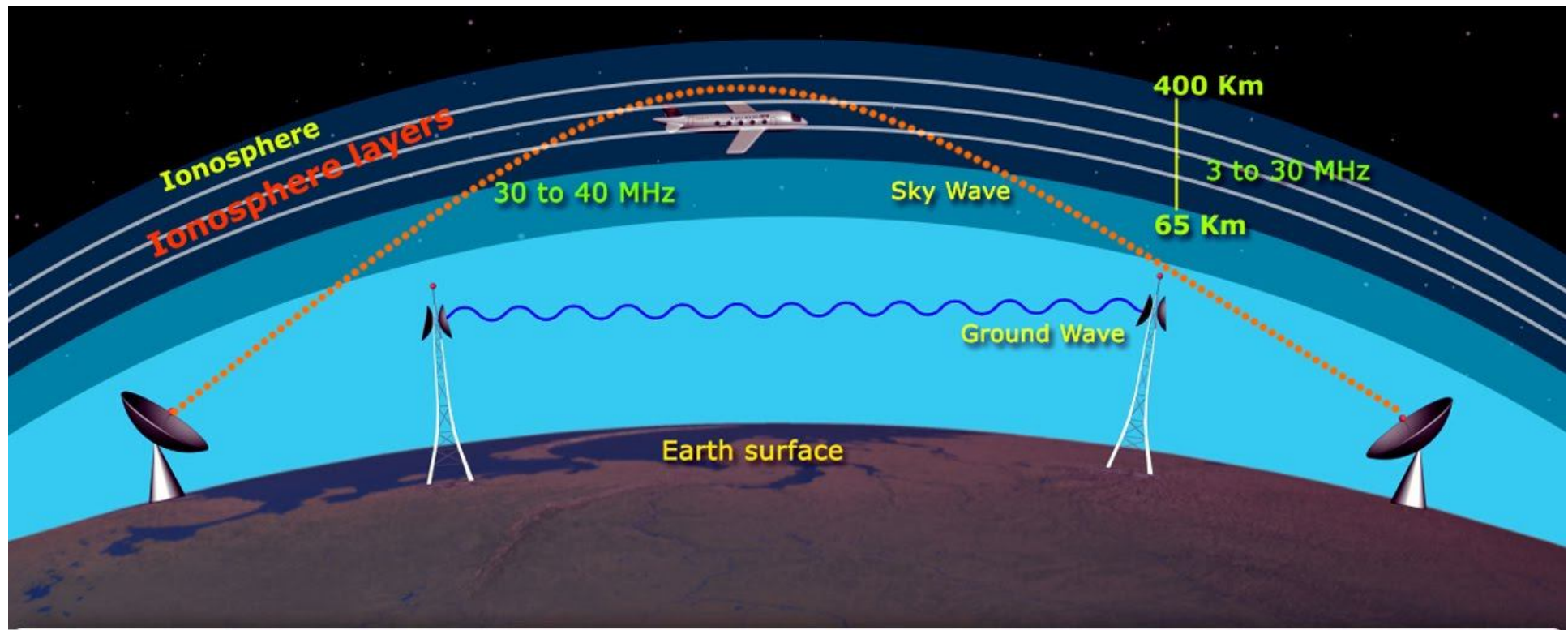
xosphere

nosphere

**Sir Edward Victor  
Appleton (1892-1965)**

**Нобелевская премия по  
физике 1947 г.**

За исследования физики  
верхних слоев атмосферы,  
в особенности за открытие  
«слоя Эплтона» (слой F)



# PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES

# Гидросфера Земли:

- условия существования
- происхождение
- состав
- элементы структуры

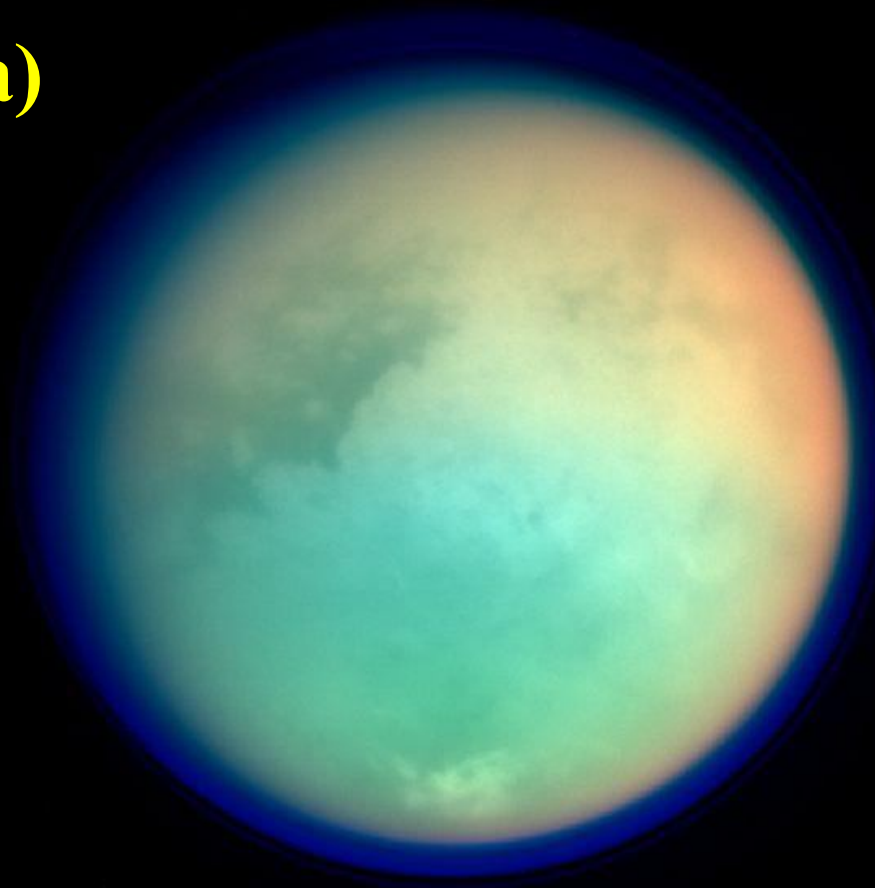
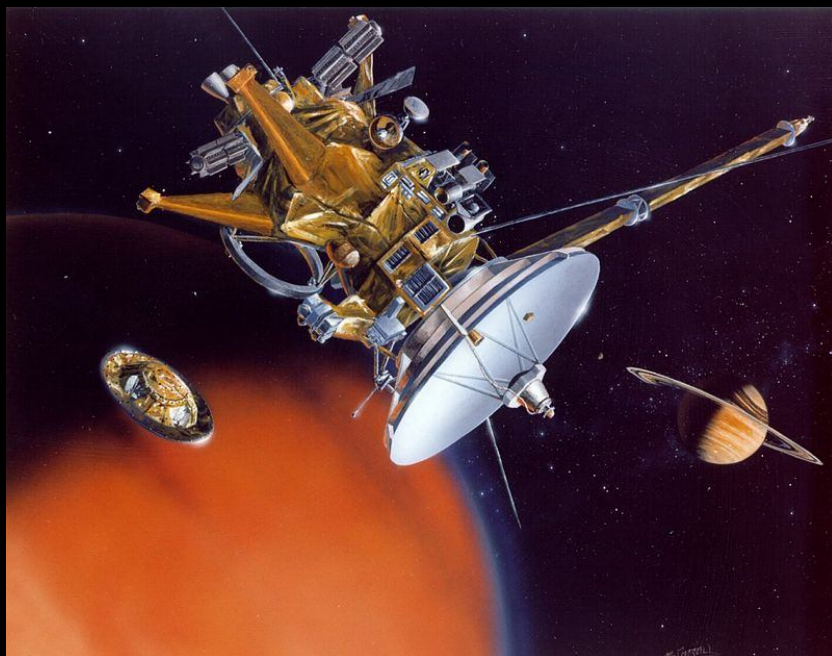
# Условия существования гидросферы (океана)

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 поперхн. натяжение

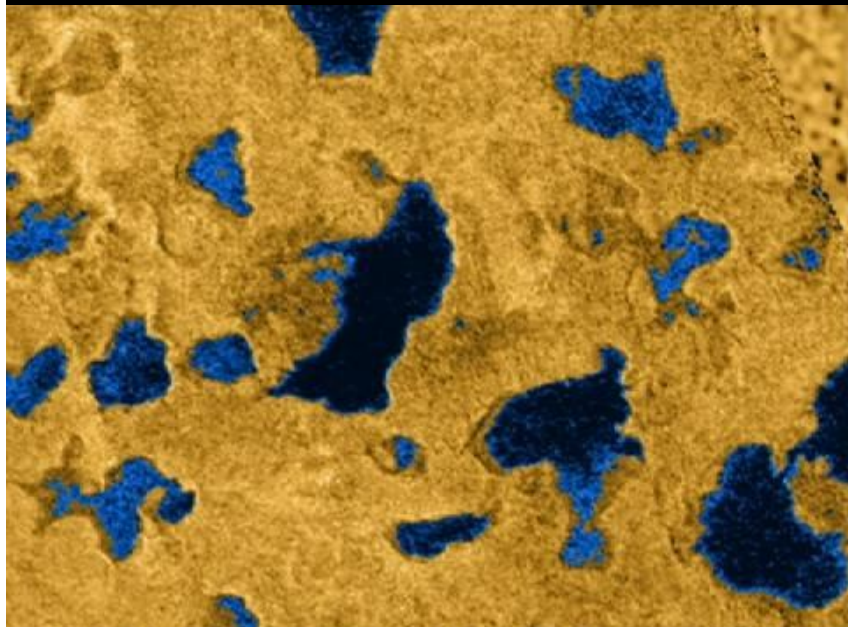


# Титан (спутник Сатурна)

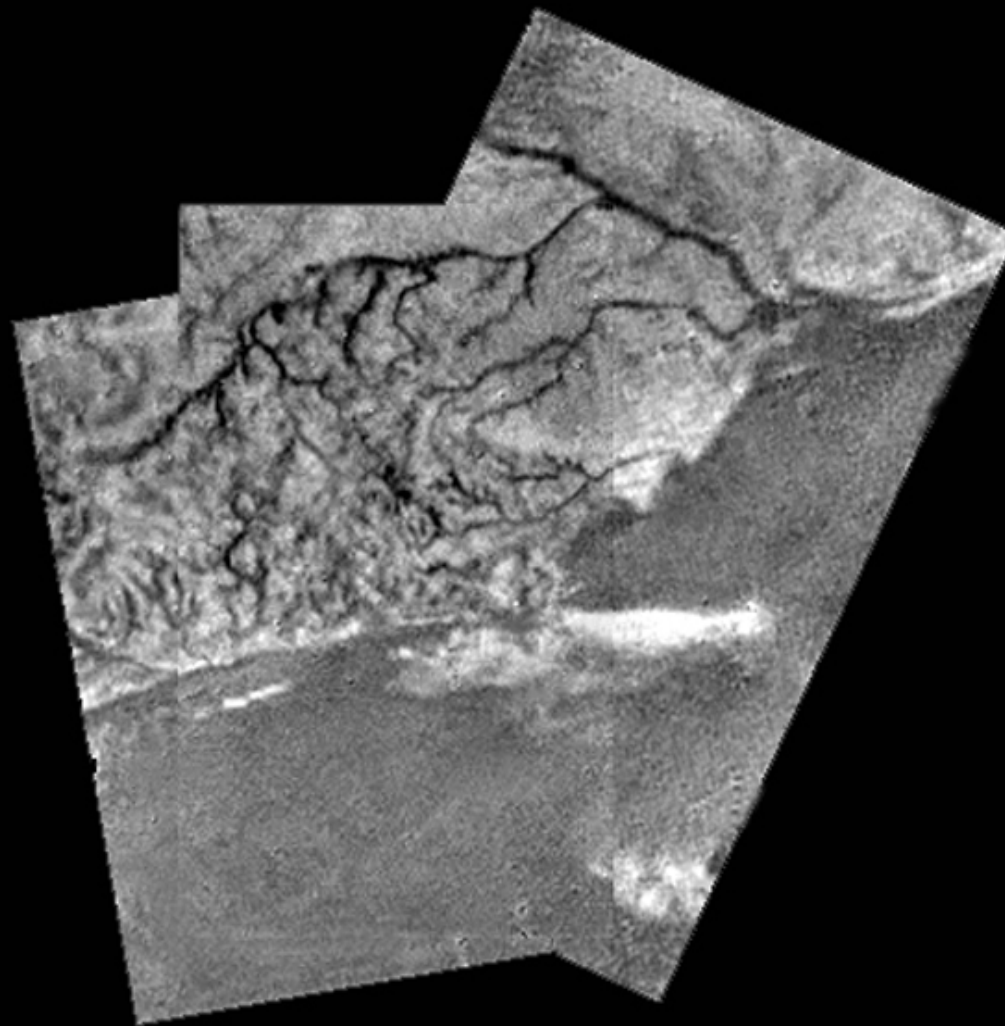


**«Кассини-Гюйгенс»  
(старт 1997 г.)**

# Титан (спутник Сатурна)

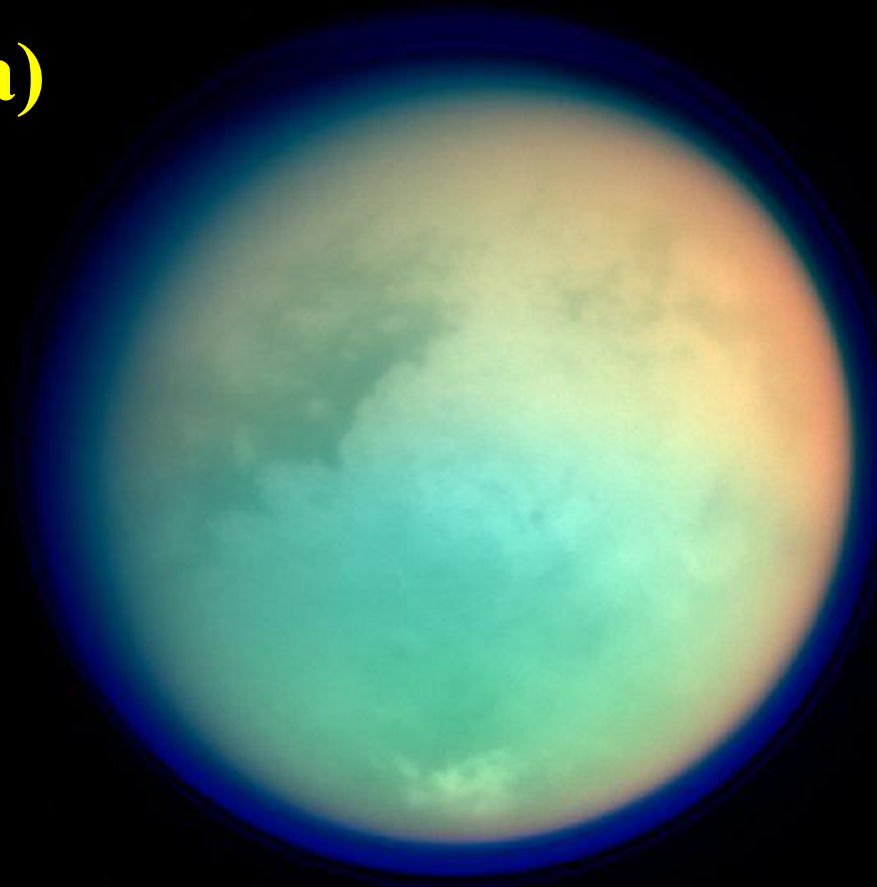


Озера (этан,  
пропан, метан)



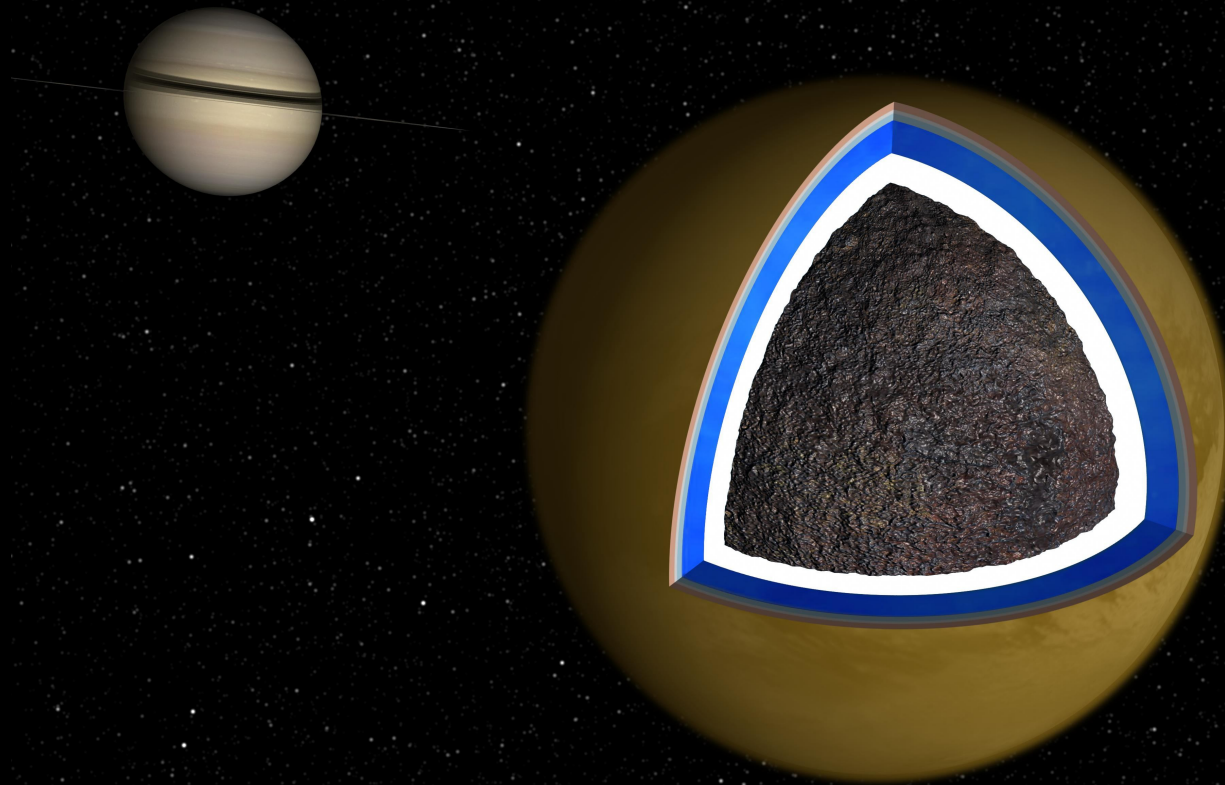
Русла рек

## Титан (спутник Сатурна)



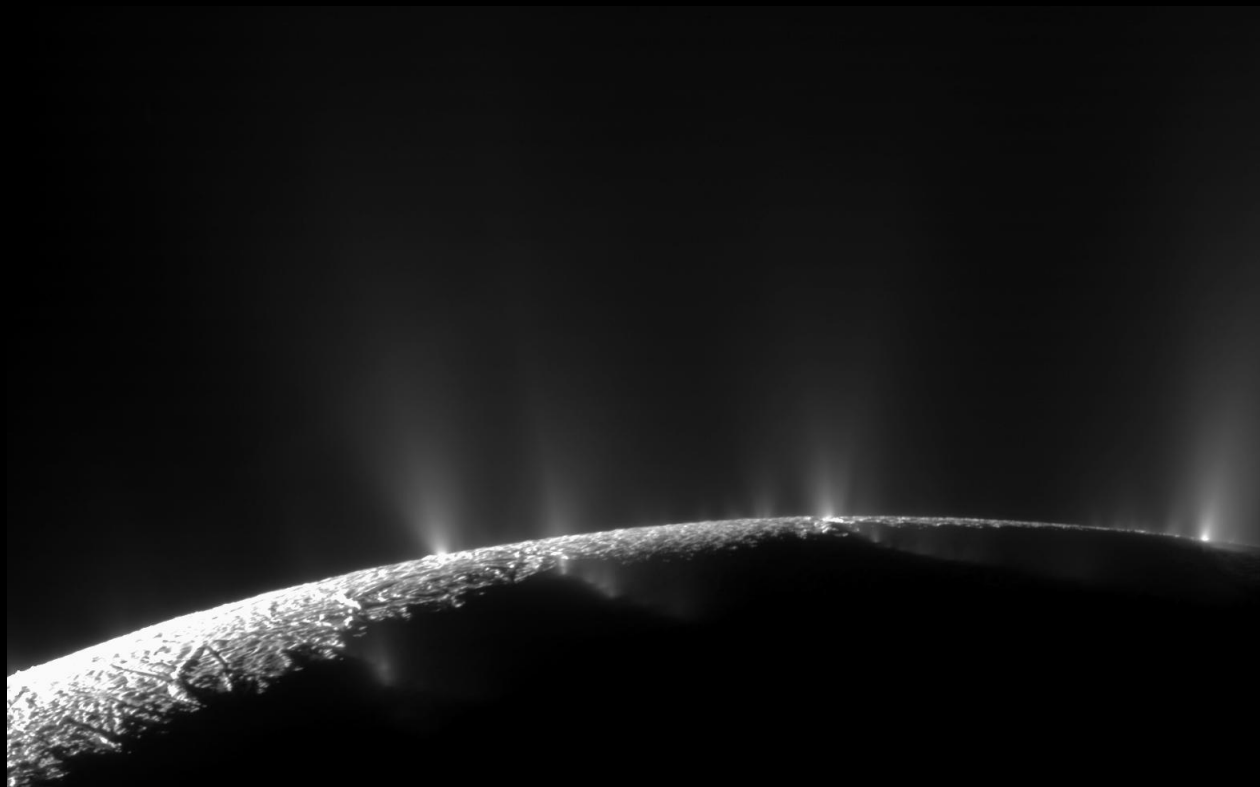
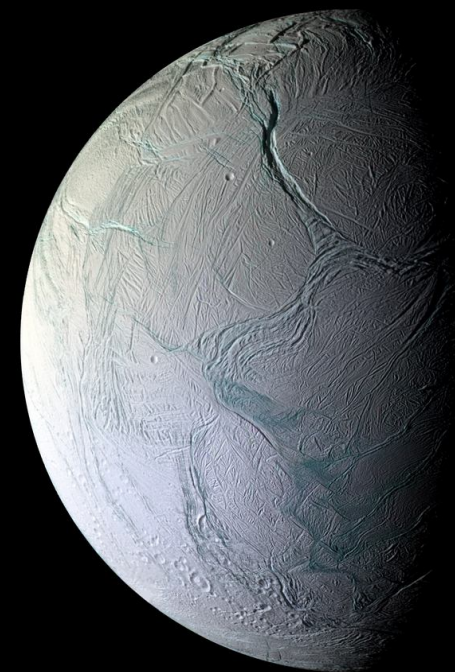
**Ландшафт Титана в месте посадки зонда «Гюйгенс» (2005 г.). Камни округлой формы могли образоваться при воздействии жидкости.**

# Титан (спутник Сатурна)



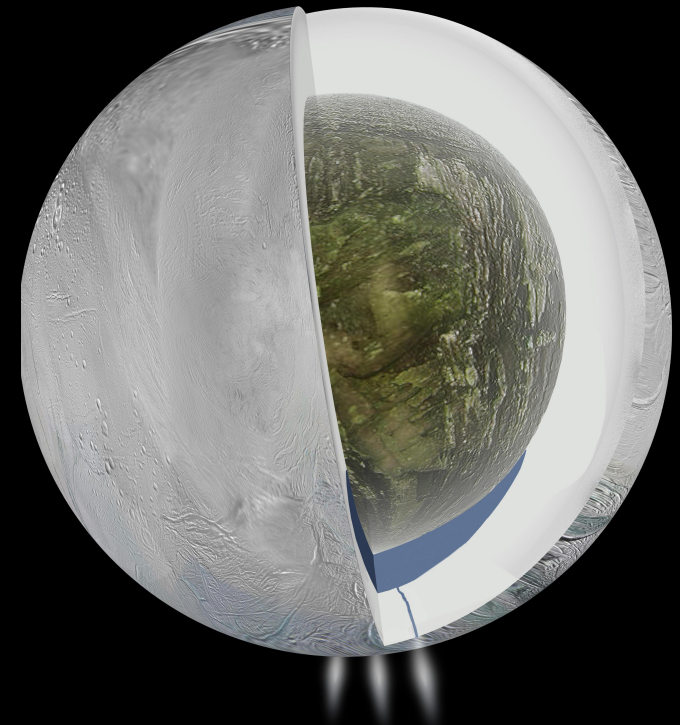
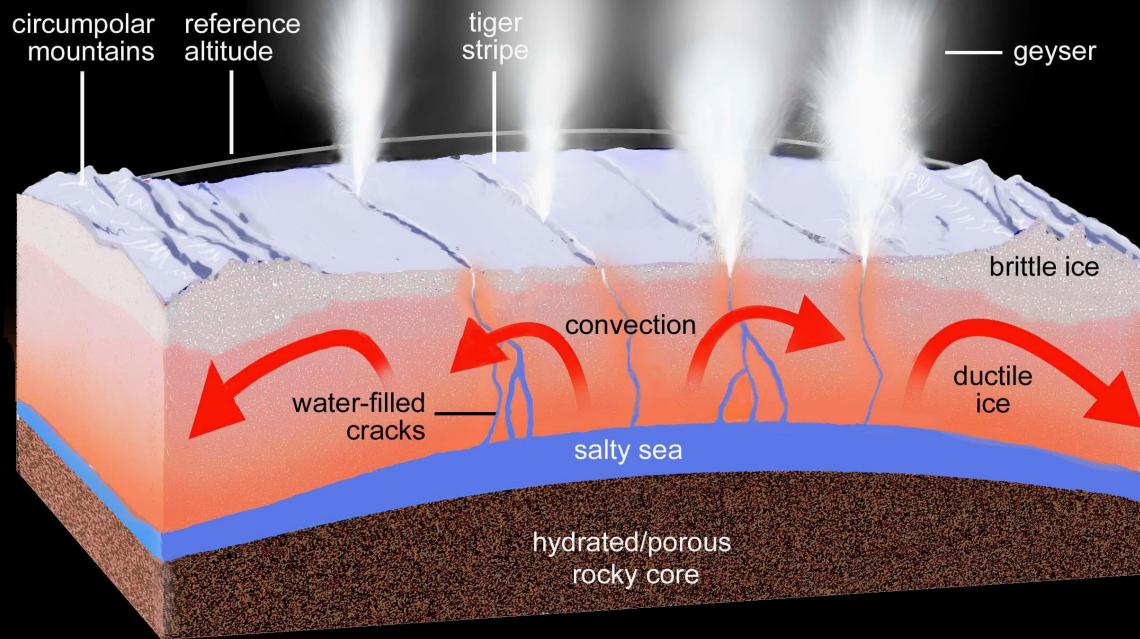
**Гипотетический подповерхностный океан**

# Энцелад (спутник Сатурна)



Гейзеры на южном полюсе

# Энцелад (спутник Сатурна)



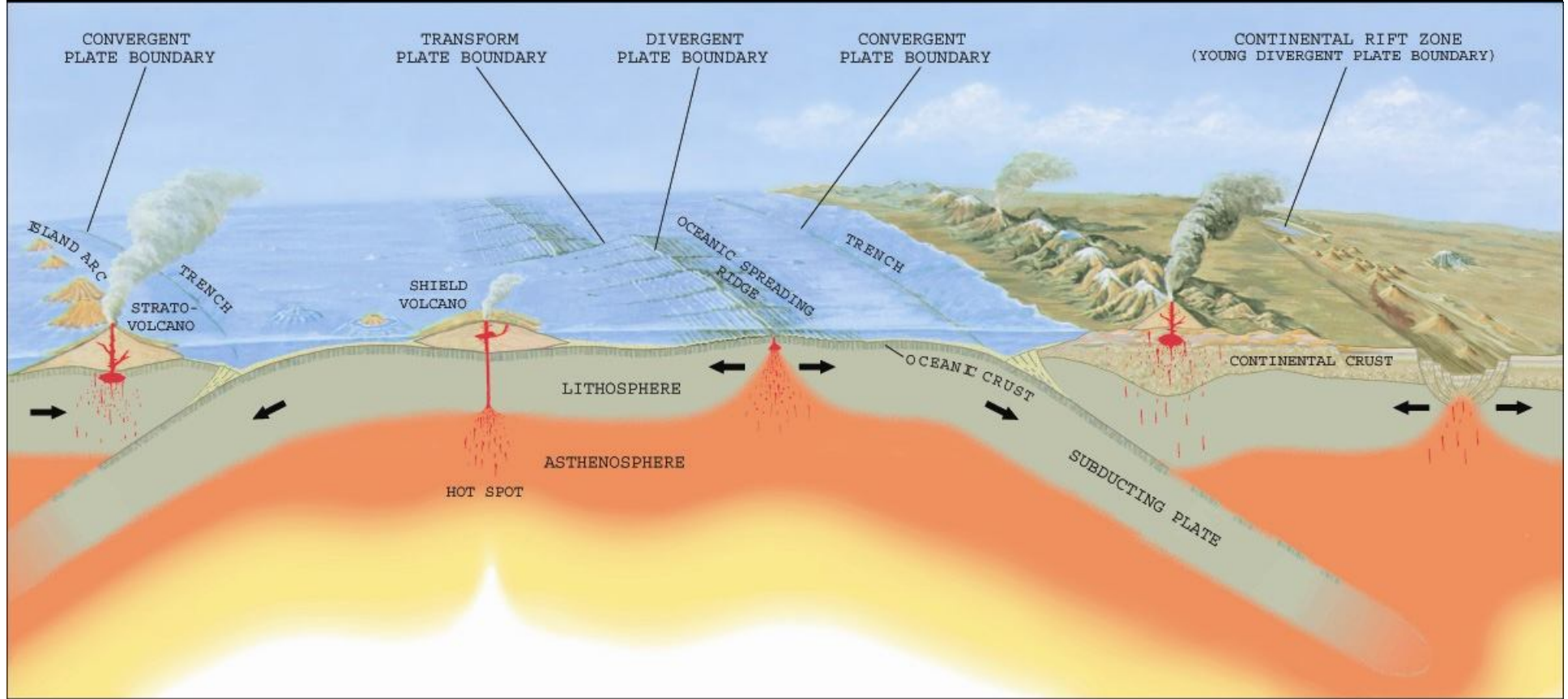
Гейзеры на южном полюсе

- ❑ 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)**

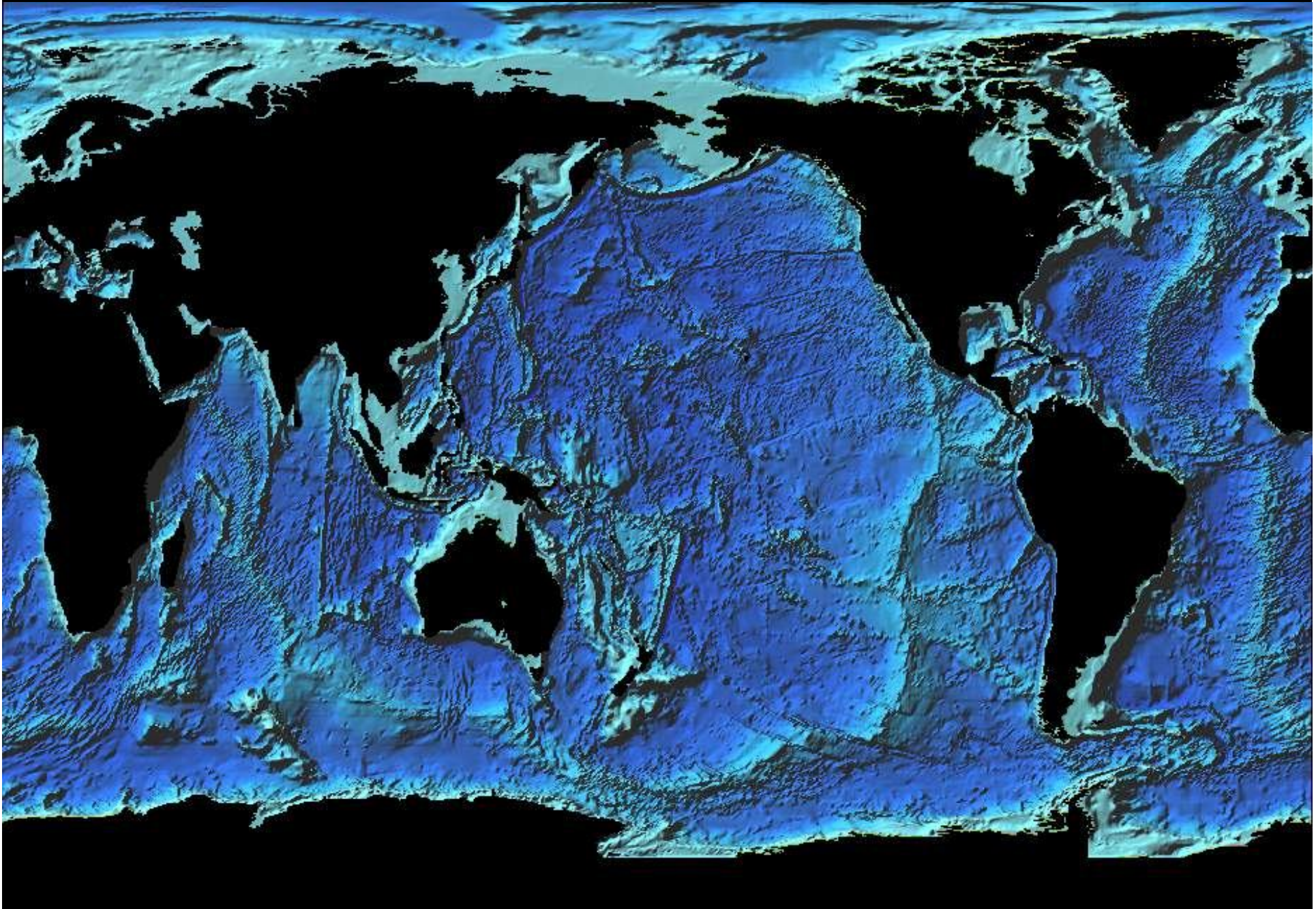
**Мировой океан занимает  
71% поверхности Земли  
(361 млн.кв.км)**





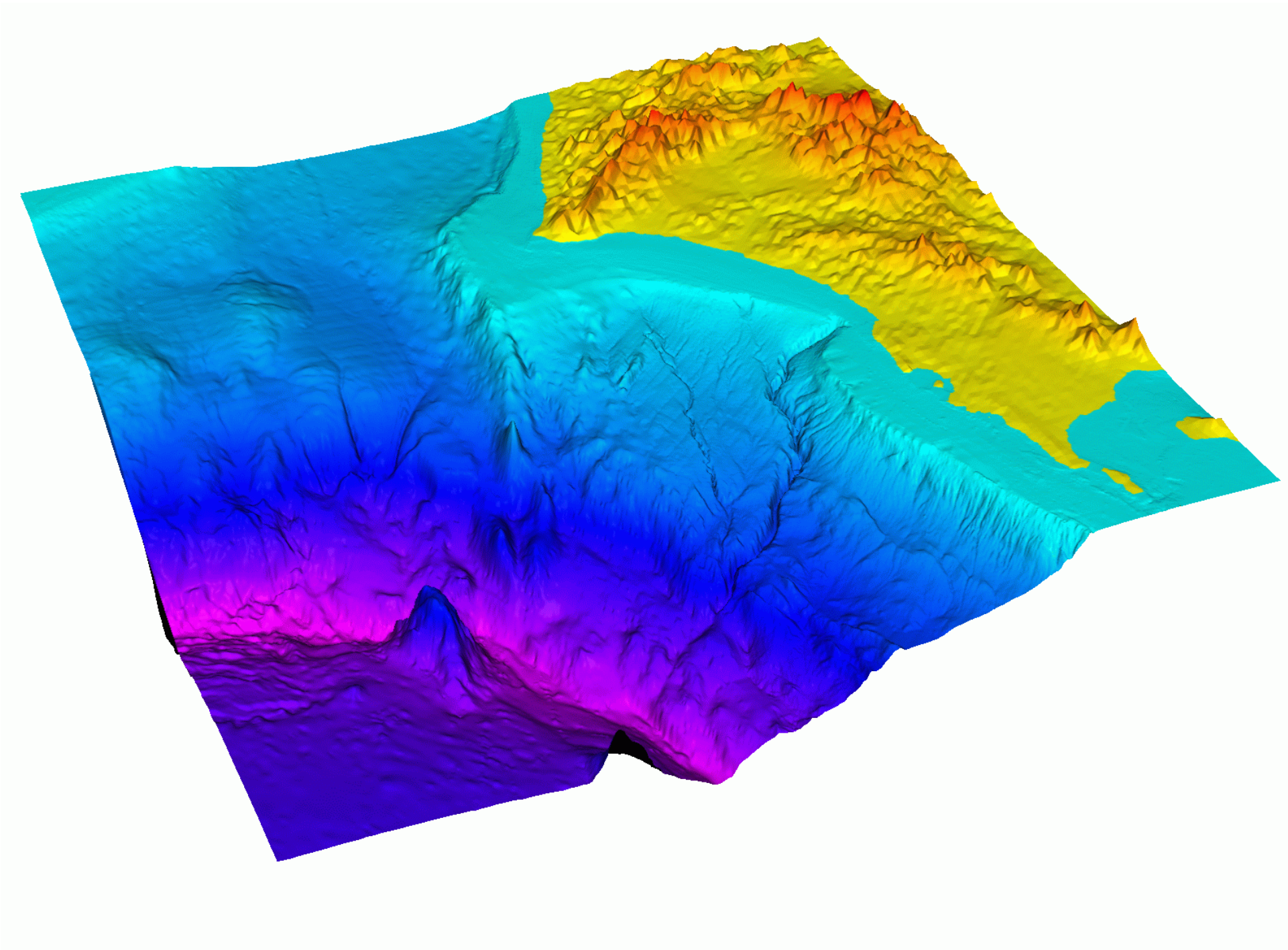


# Топография океанического дна



## Основные крупномасштабные формы рельефа дна

<i>Форма</i>	<i>Глубины, м</i>	<i>Уклон</i>
<b>Шельф</b>	<b>0-200</b>	<b>0.002 (ср.)</b>
<b>Материковый склон</b>	<b>200-3000</b>	<b>~0.01-0.1</b>
<b>Материковое подножие</b>	<b>3000-4000</b>	<b>~0.001-0.01</b>
<b>Ложе океана, Океанические котловины</b>	<b>4000-6000</b>	
<b>Срединно-океанические хребты</b>	<b>2500-4000</b>	<b>~0.005</b>
<b>Глубоководные желоба</b>	<b>&gt;6000</b>	<b>~0.1</b>



**Известны следующие изотопы водорода и кислорода:**

**H<sup>1</sup>, H<sup>2</sup>, H<sup>3</sup>, H<sup>4</sup>**

**O<sup>15</sup>, O<sup>16</sup>, O<sup>17</sup>, O<sup>18</sup>, O<sup>19</sup>**

**существуют в природе**

**в природе не найдены**

## Виды молекул воды, встречающиеся в природе

Молекулы воды	% содержание
$\text{H}^1_2\text{O}^{16}$	<b>99.73</b>
$\text{H}^1_2\text{O}^{18}$	<b>0.20</b>
$\text{H}^1_2\text{O}^{17}$	<b>0.04</b>
$\text{H}^1\text{H}^2\text{O}^{16}$	<b>0.02</b>
$\text{H}^1\text{H}^2\text{O}^{18}$	<b>0.00006</b>
$\text{H}^1\text{H}^2\text{O}^{17}$	<b>0.00001</b>
$\text{H}^2_2\text{O}^{16}$	<b>0.000003</b>
$\text{H}^2_2\text{O}^{18}$	<b>0.000000006</b>
$\text{H}^2_2\text{O}^{17}$	<b>0.000000001</b>

**тритиевой воды в Мировом океане 800 гр.**

# Соленость морской воды

$$S = \frac{m_{\text{примеси}}}{m_{\text{примеси}} + m_{\text{чистой воды}}} \left[ \text{‰ промилле} \right]$$

**Соленость** – масса в граммах твердых веществ, растворенных в 1 кг воды, при условии, что карбонаты превращены в оксиды, галогены (Br, I) заменены хлором, и все органические вещества сожжены при температуре 480 °C

Точное определение  $m_{\text{примеси}}$  в результате испарения, высушивания и взвешивания на практике очень сложно, т.к. некоторые вещества улетучиваются (например, хлористые соединения)

# Соленость морской воды

$$S = \frac{m_{\text{примеси}}}{m_{\text{примеси}} + m_{\text{чистой воды}}} \left[ \text{‰ промилле} \right]$$

**На практике пользуются закономерностью постоянства солевого состава морской воды**

*\*\*\*Закономерность может нарушаться в полностью изолированных морях (Каспийское, Аральское), в морях с ограниченным водообменом, вблизи устьев рек.*

**Точное определение  $m_{\text{примеси}}$  в результате испарения, высушивания и взвешивания на практике очень сложно, т.к. некоторые вещества улетучиваются (например, хлористые соединения)**



**Мертвое море  
250-300 ‰**

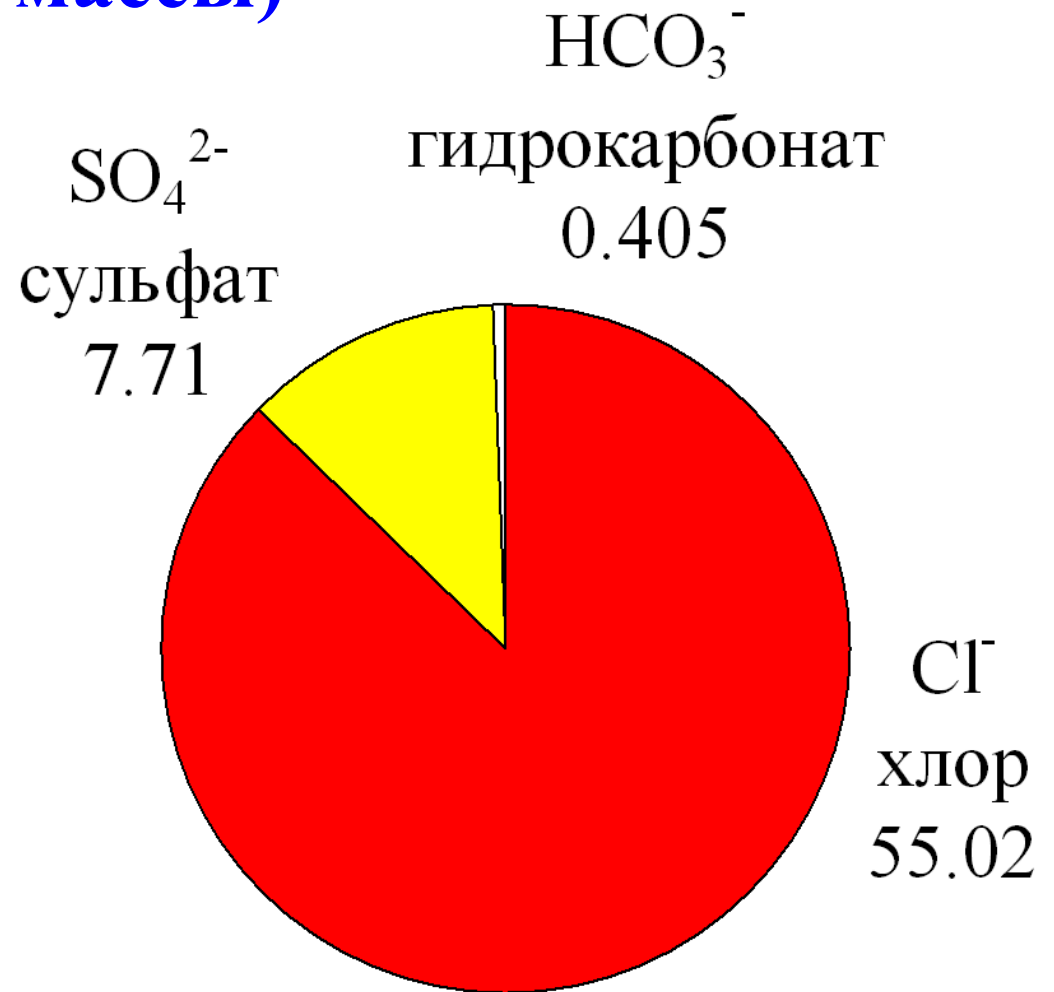
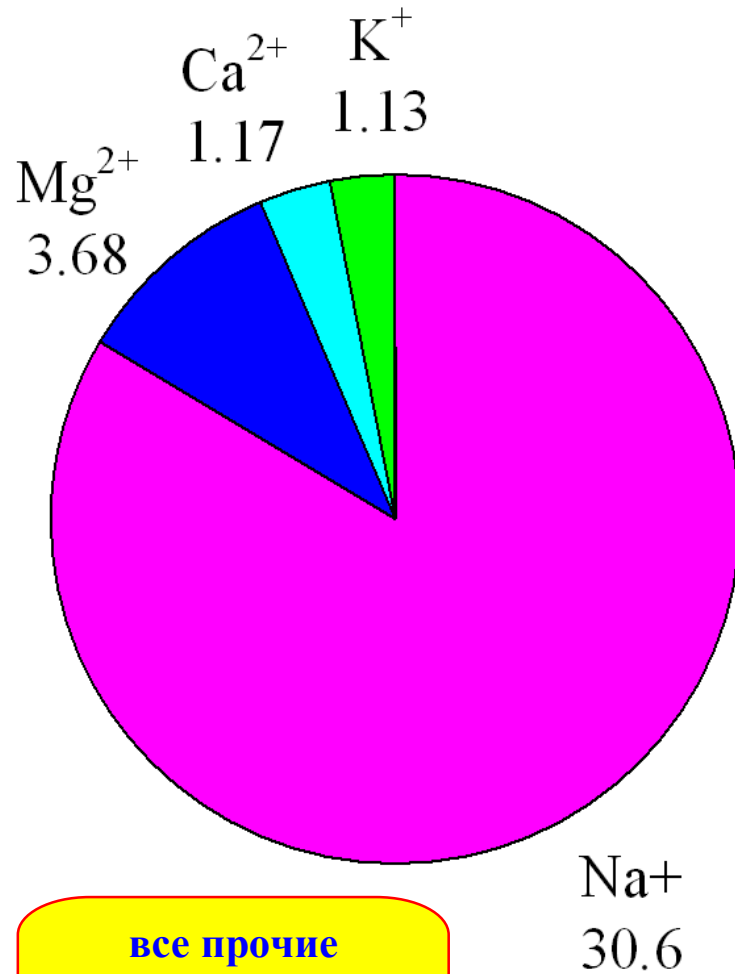
**Общее количество  
соли в Мировом  
океане  $\sim 4.9 \cdot 10^{19}$  кг**

**На порядок  
больше массы  
атмосферы!!!**

**Соль Мирового океана способна покрыть поверхность суши слоем  $\sim 150$  м**



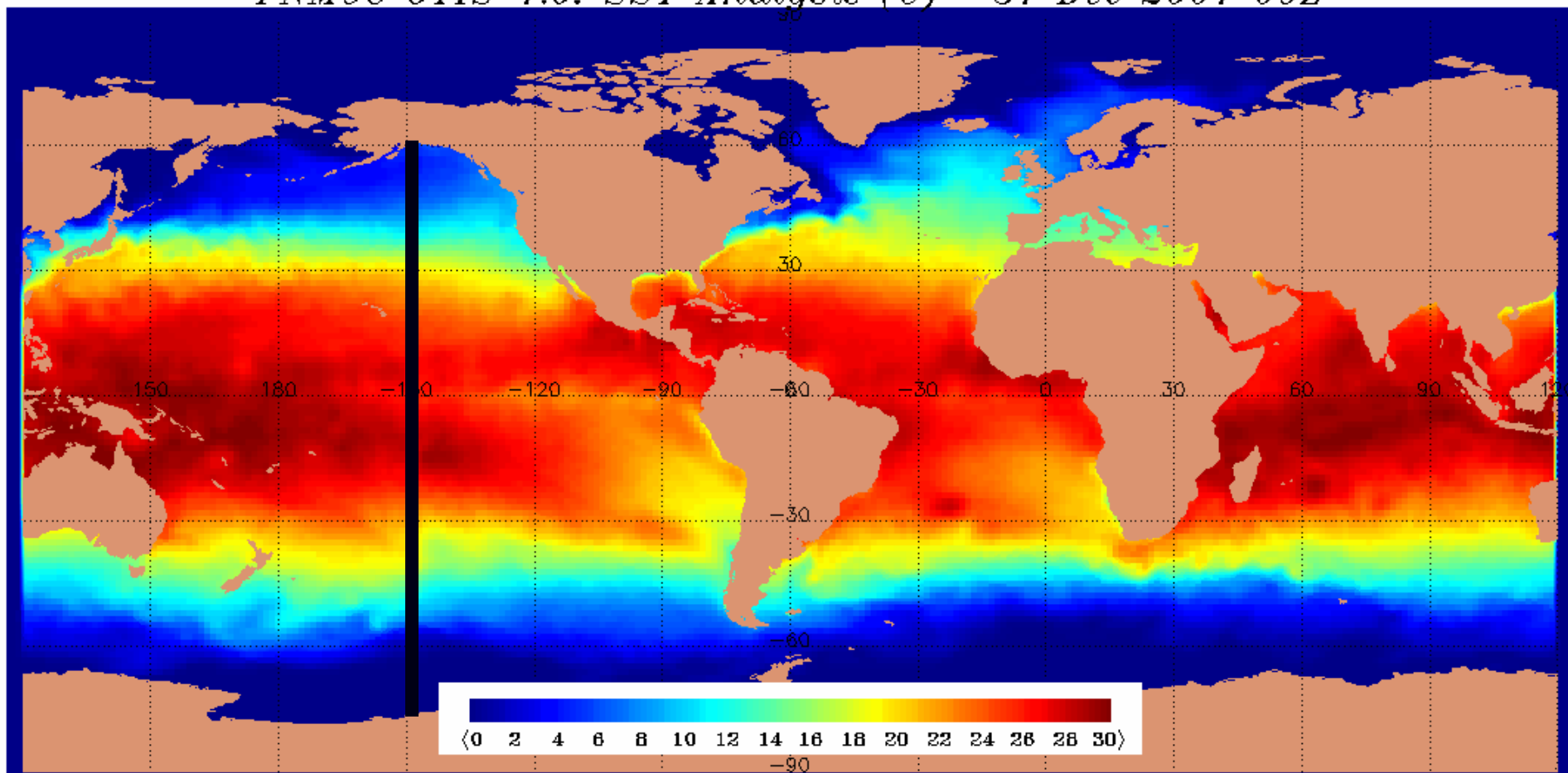
# Главные компоненты примеси в морской воде (% массы)



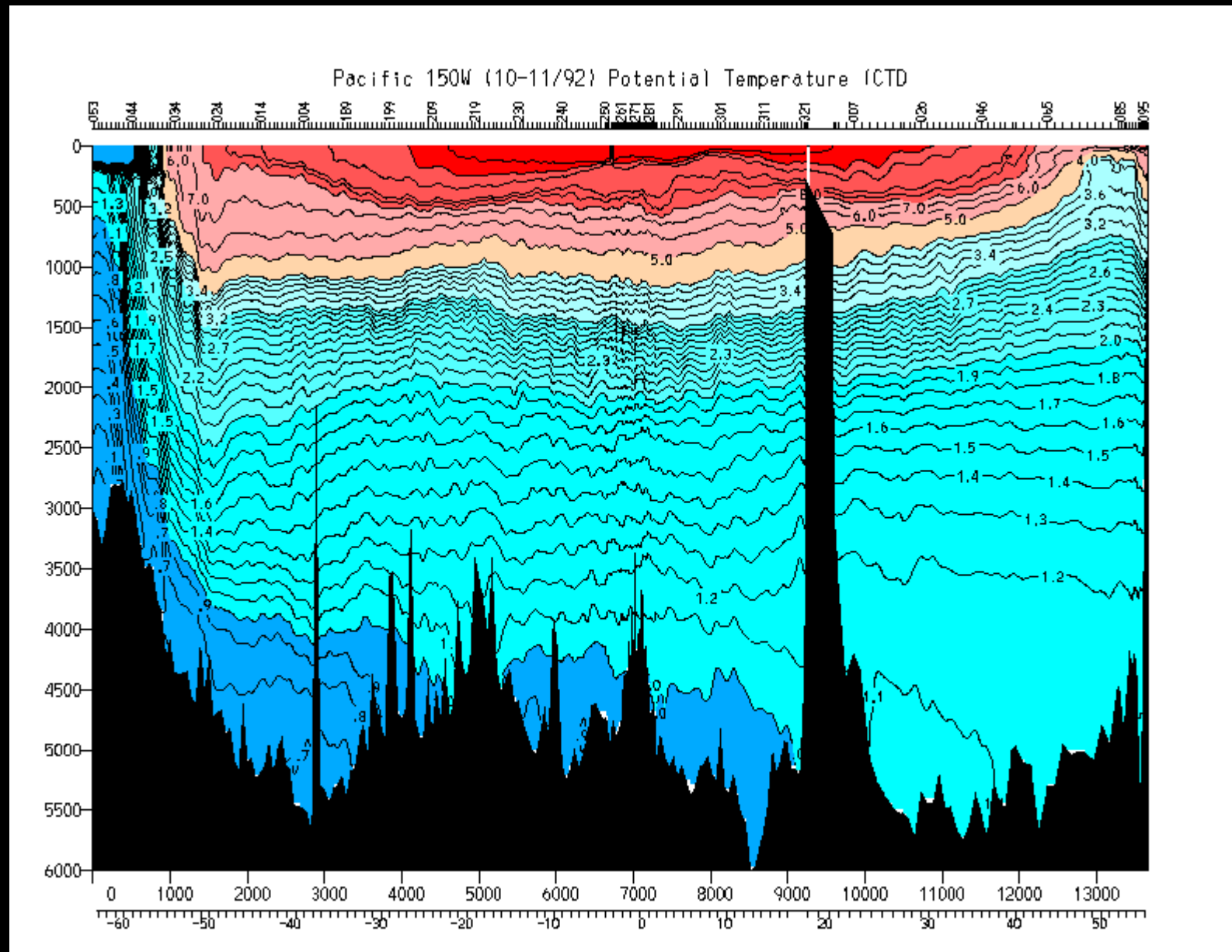
в 1 кг морской воды  
содержится ≈ 3·10<sup>-10</sup>  
кг золота

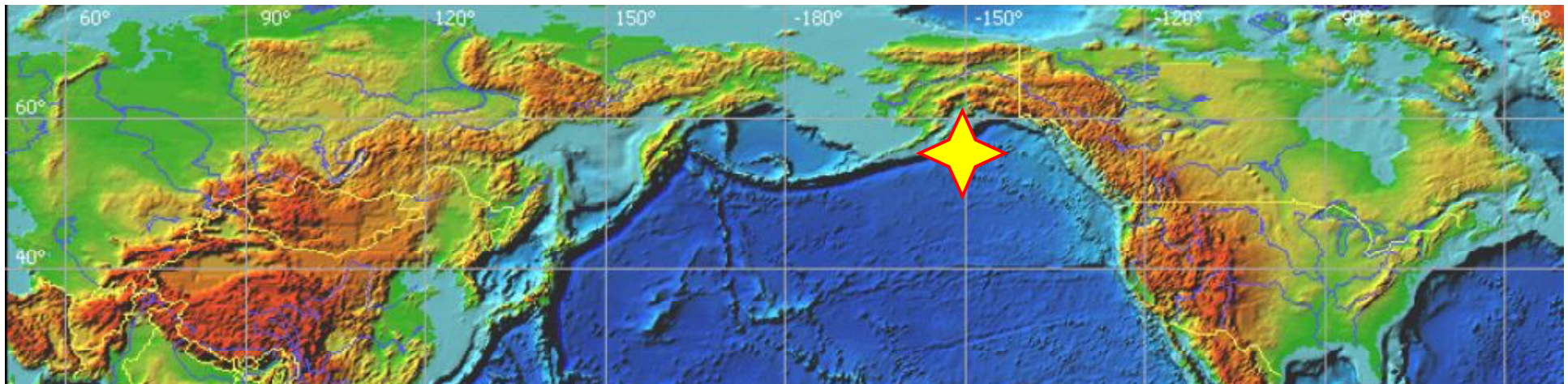
# Температура поверхности океана (ТПО)

*FNMOС OTIS 4.0: SST Analysis (C) 31 Dec 2001 00Z*



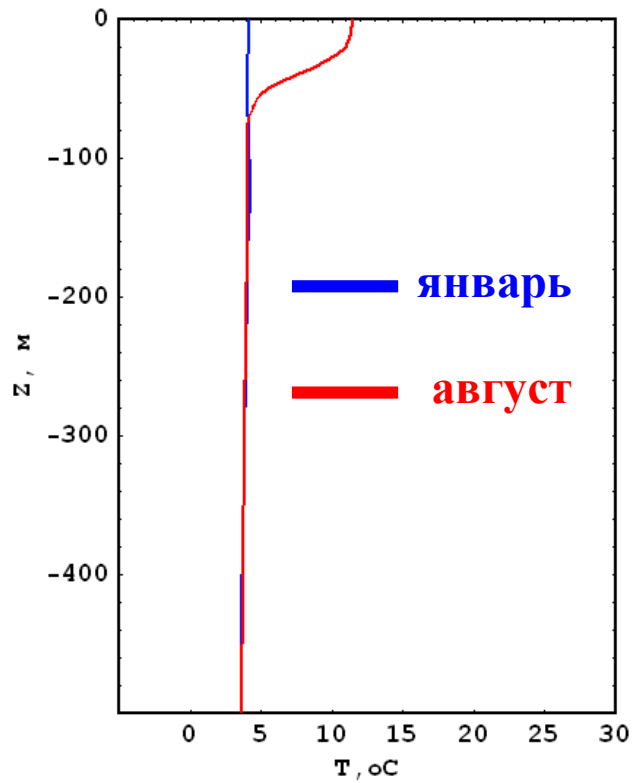
# Вертикальный температурный разрез по меридиану 150W



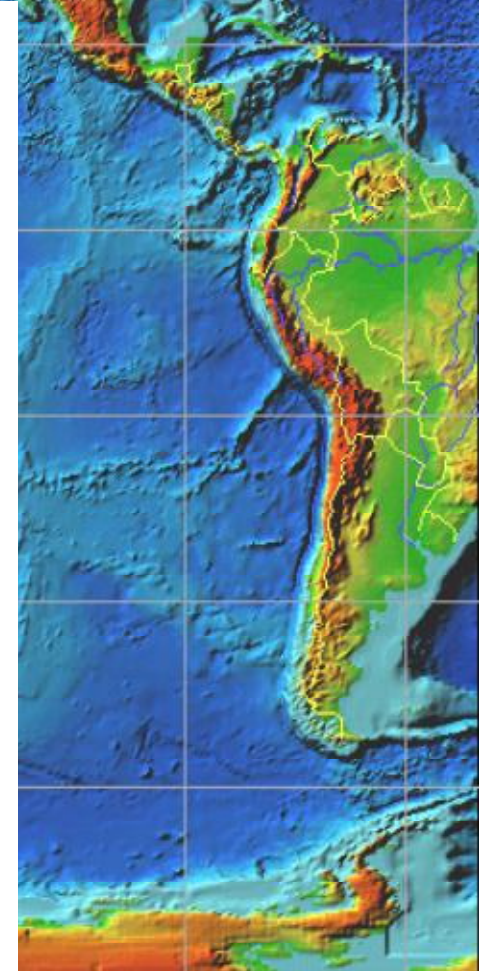
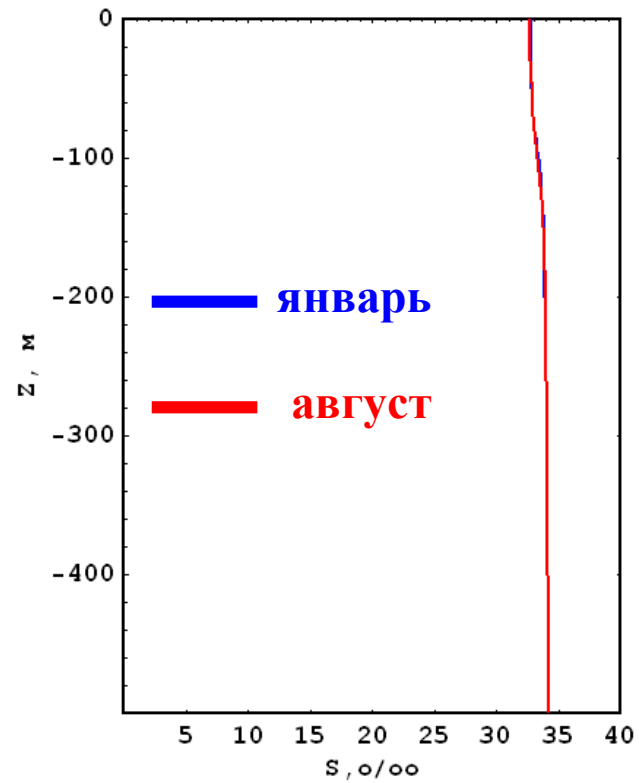


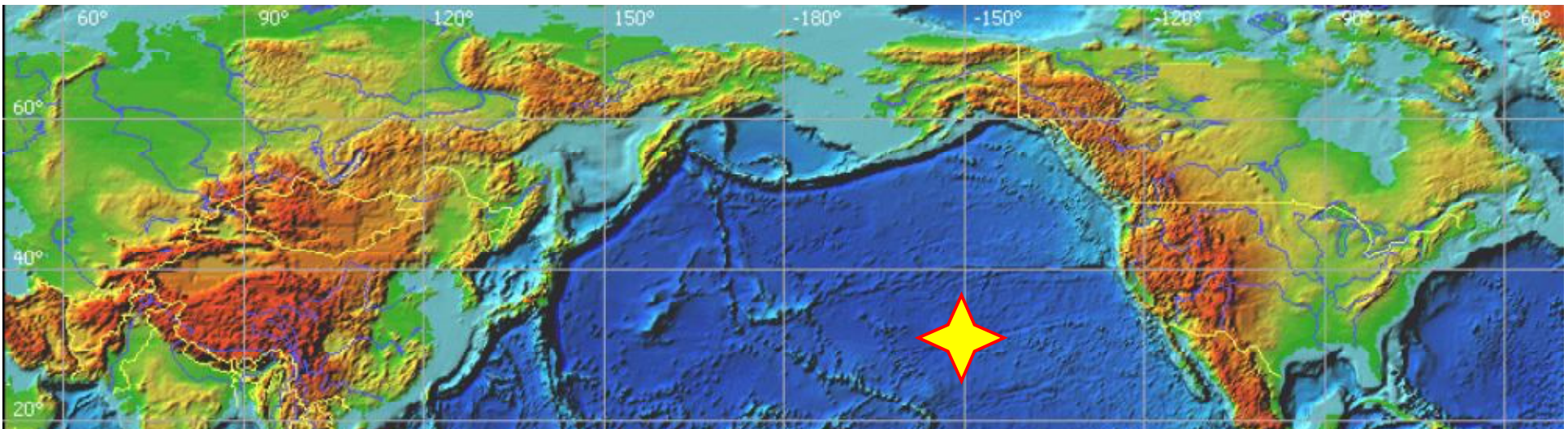
Lat=55 Lon=-150

### Профиль температуры

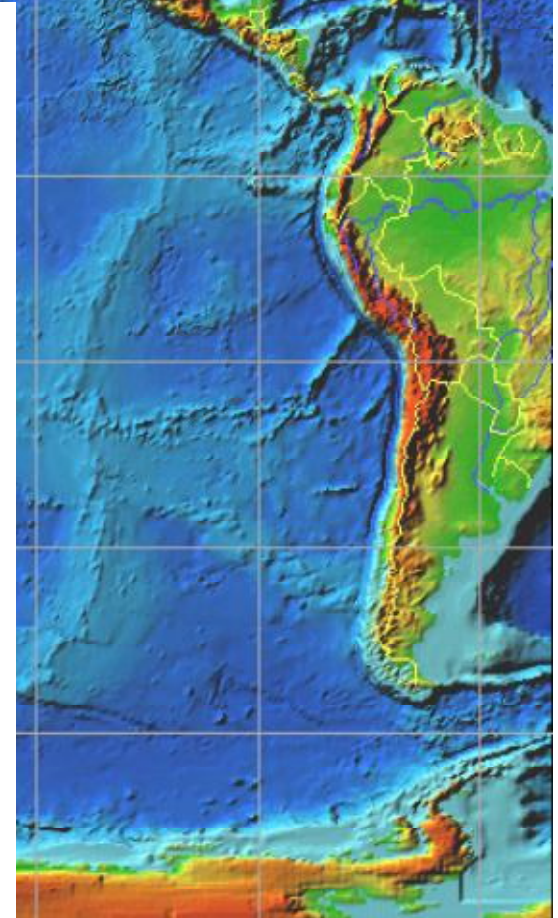
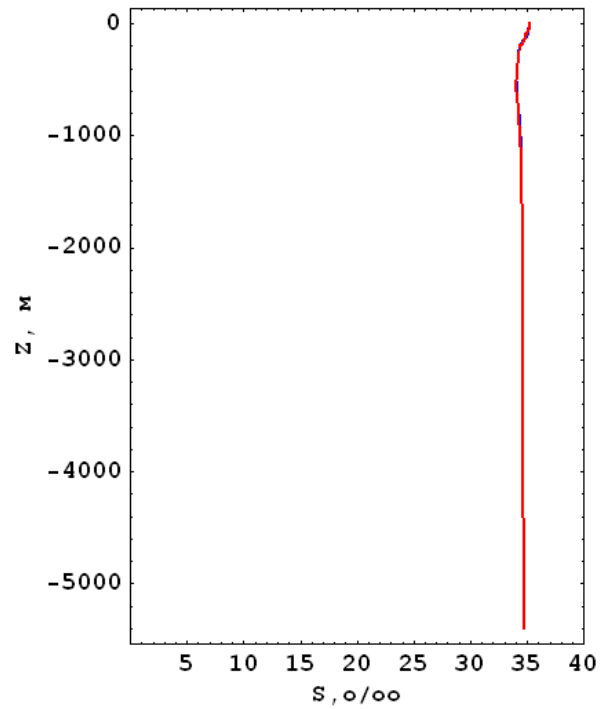
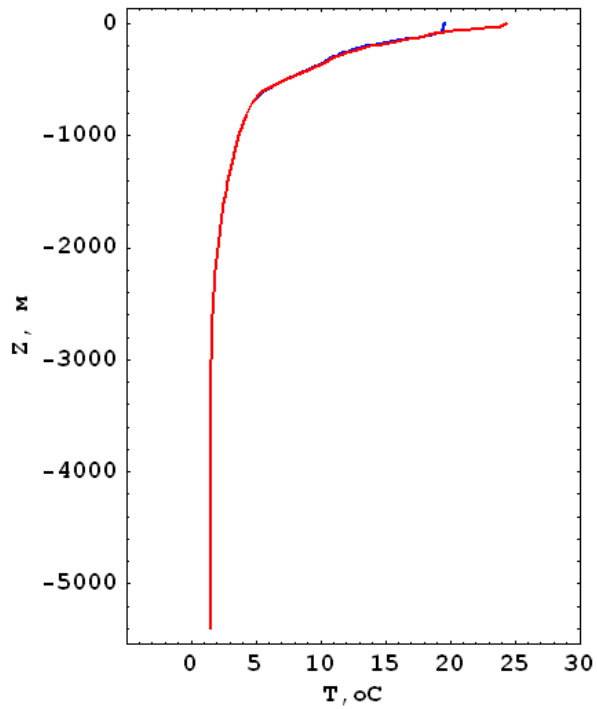


### Профиль солености

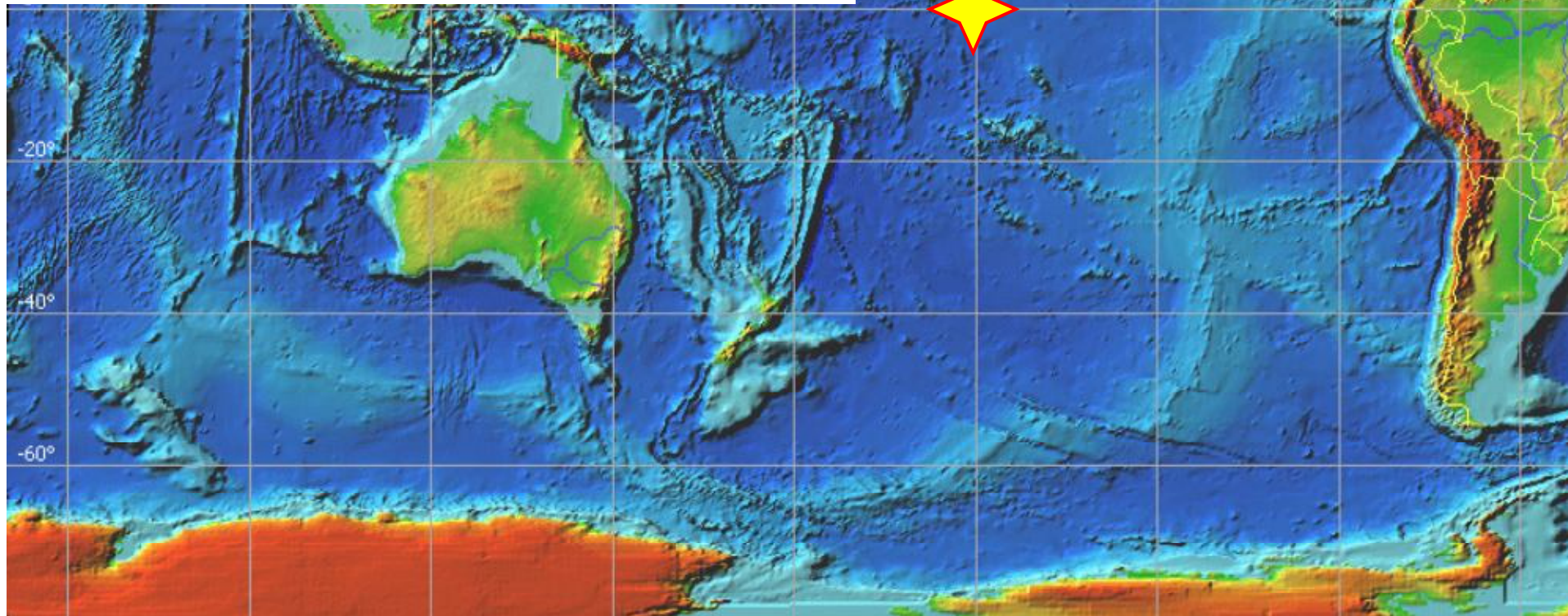
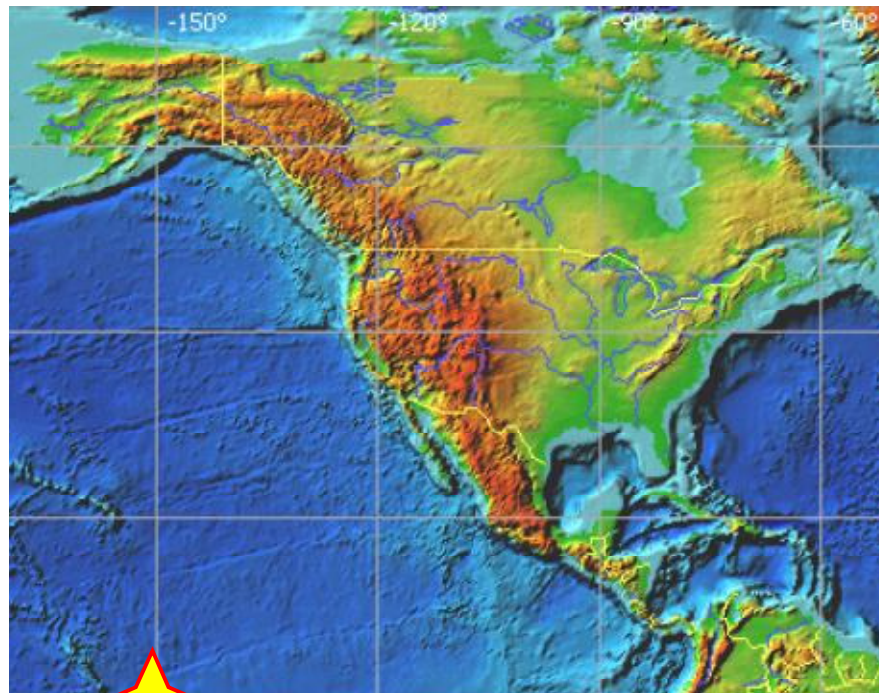
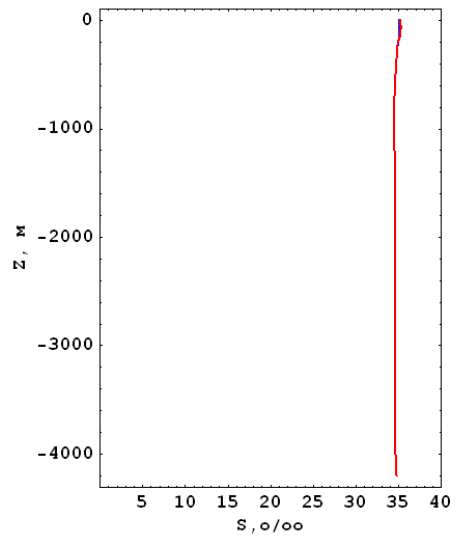
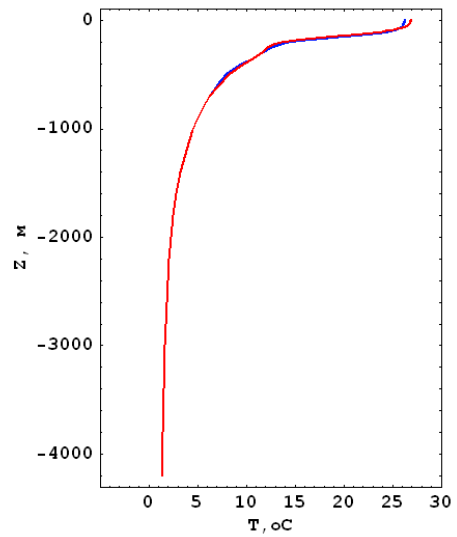




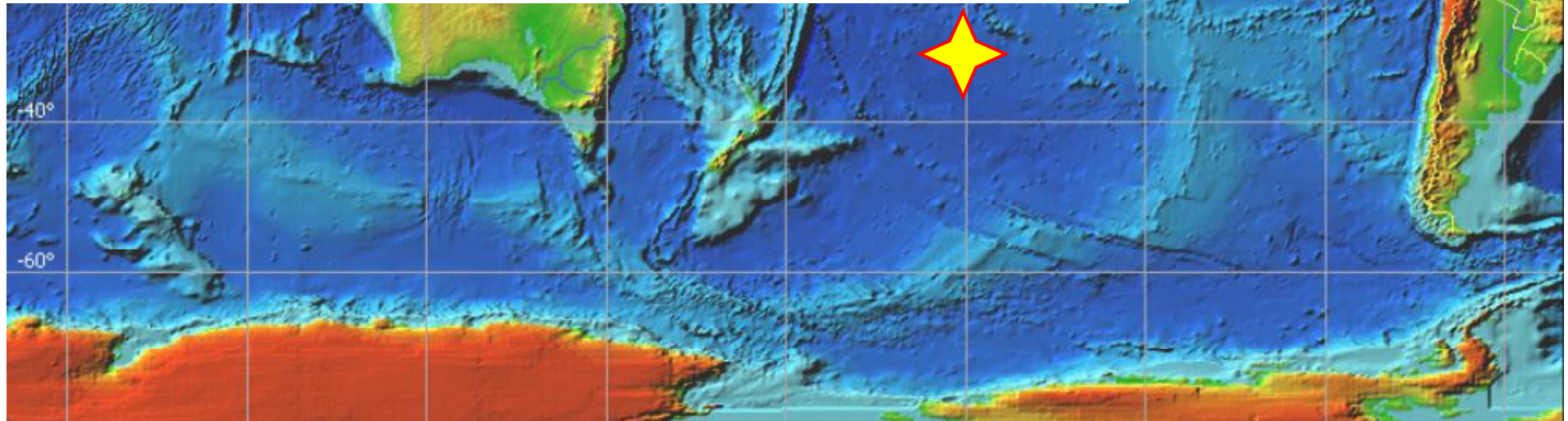
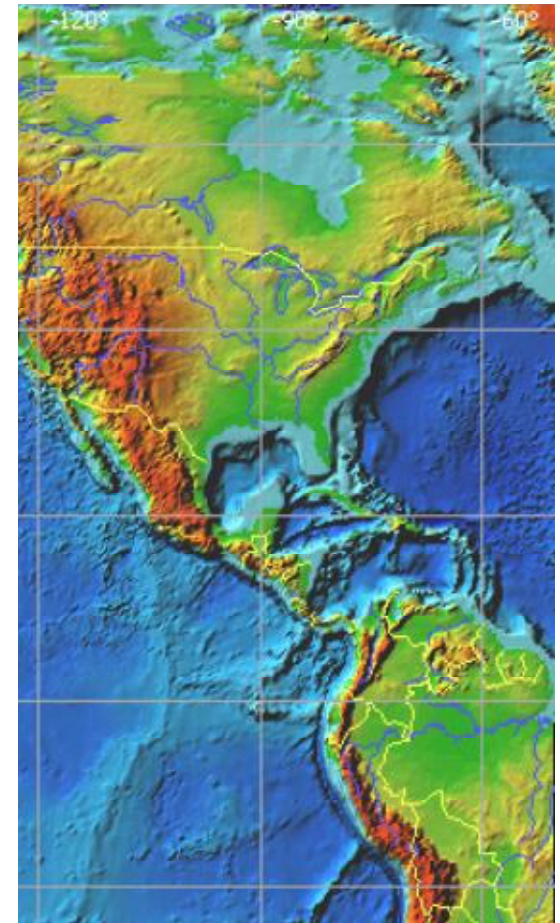
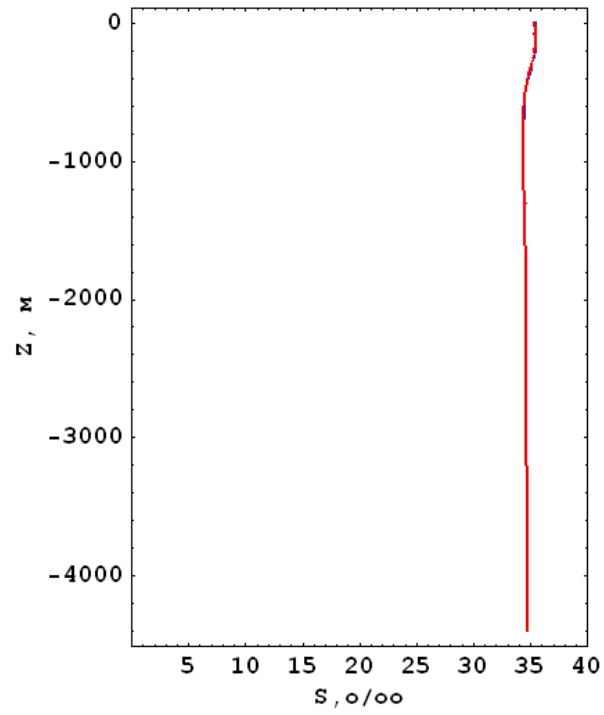
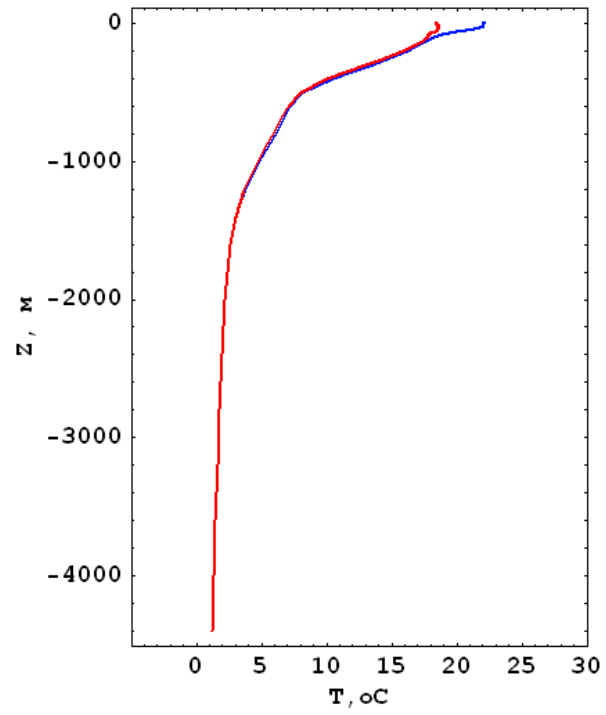
Lat=30 Lon=-150



Lat=00 Lon=-150

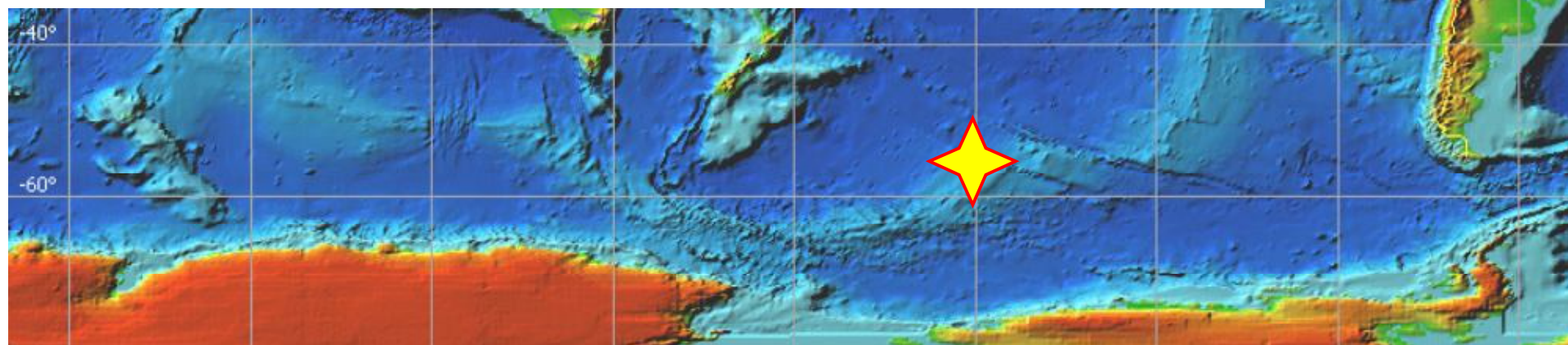
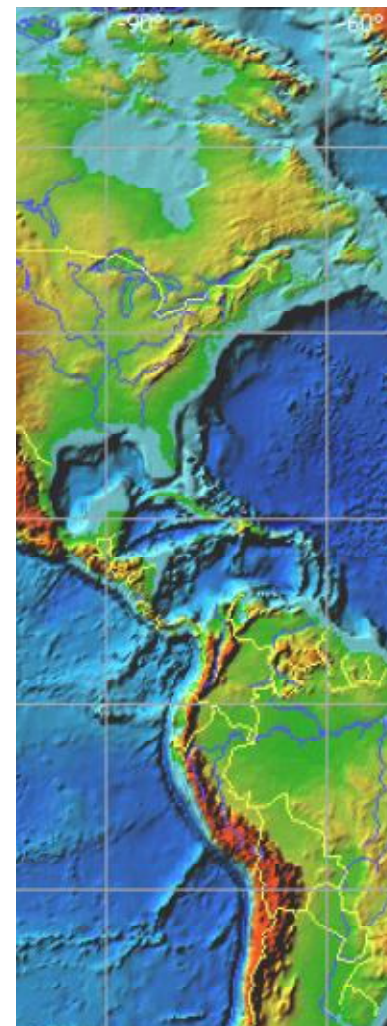
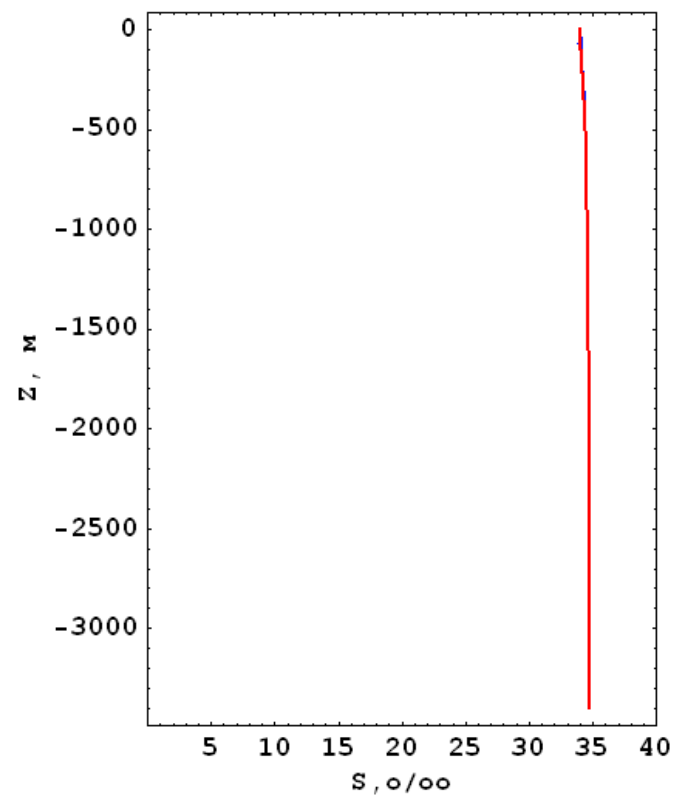
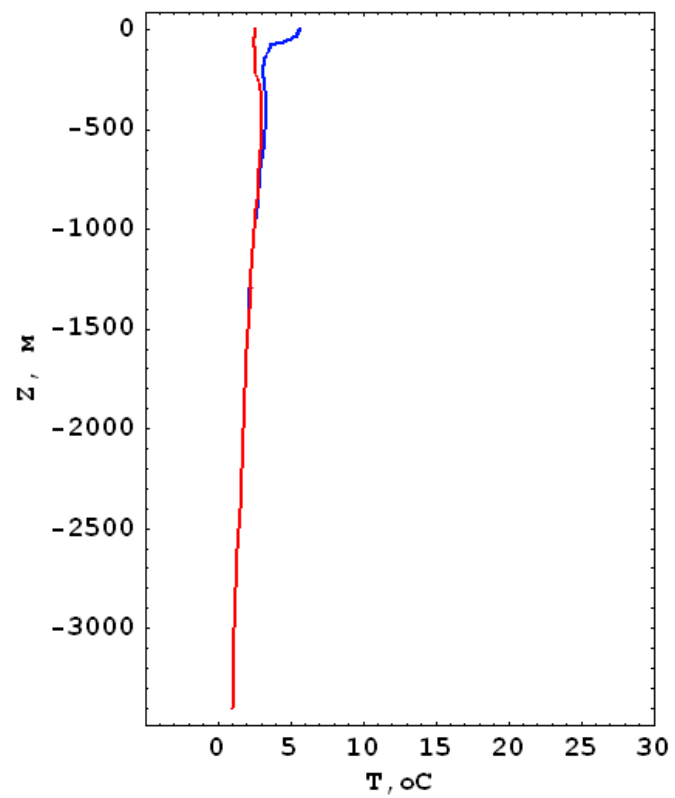


Lat=-30 Lon=-150

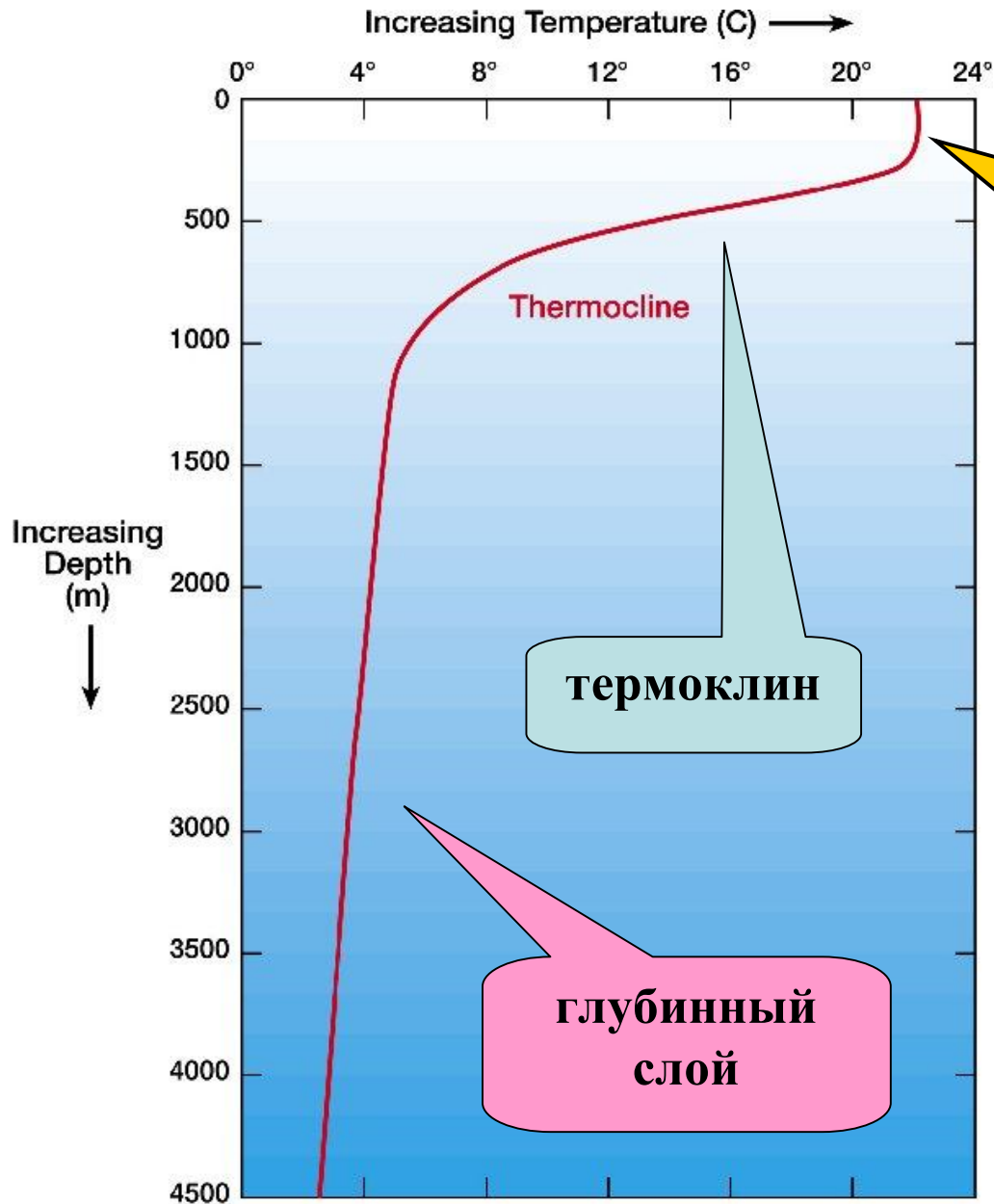




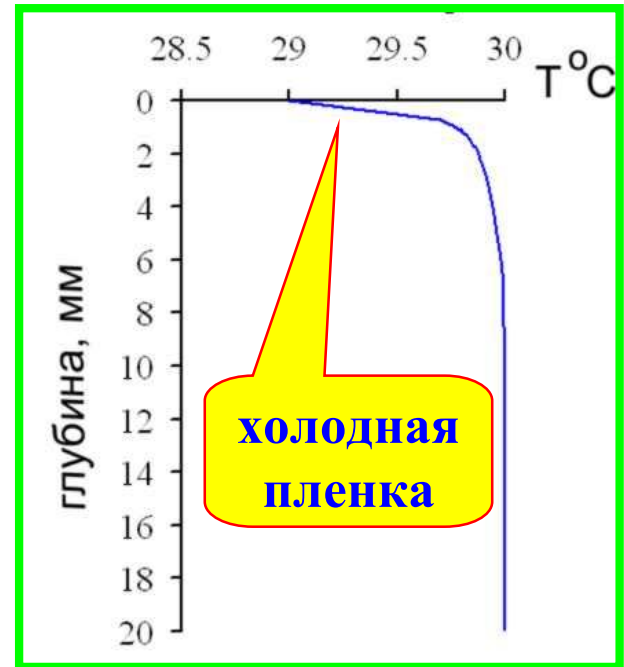
Lat=-55 Lon=-150



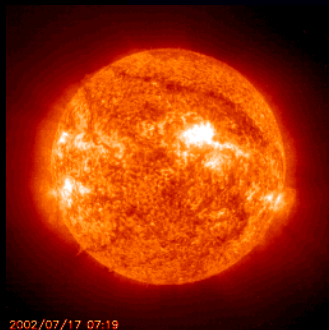
# Типичный вертикальный профиль температуры в океане



**ВКС - верхний квазиоднородный (перемешанный) слой**



# РАДИАЦИОННЫЙ ОБМЕН В СИСТЕМЕ СОЛНЦЕ - ЗЕМЛЯ - КОСМОС

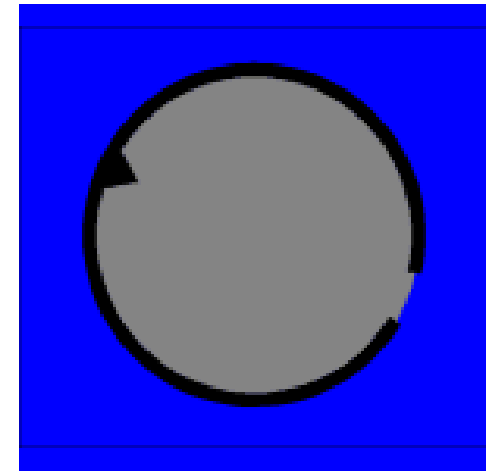


2002/07/17 07:19



# Законы теплового излучения

**Абсолютно черное тело (АЧТ) –**  
понятие теории теплового излучения,  
означающее тело, которое полностью  
поглощает любое падающее на его  
поверхность электромагнитное  
излучение, независимо от  
температуры этого тела



**понятие АЧТ введено Г.Р.Киргхофом в 1859г  
(G.R.Kirchhoff)**

# Свойства АЧТ:

1. Поглощательная способность равна 1 при излучениях всех частот, всех направлений и любых поляризациях;
  2. Плотность энергии и спектральный состав излучения, испускаемого единицей поверхности зависят только от его температуры, но не от природы излучающего вещества;
  3. Излучение АЧТ (\*) может находиться в равновесии с веществом при равенстве потоков излучения, испускаемого и поглощаемого АЧТ, имеющим определенную температуру.
- (\*) Такое излучение представляет собой излучение равновесное, которое подчиняется закону излучения Планка

# Испускательная способность АЧТ

(закон излучения Планка [M.Planck, 1900; A.Einstein, 1916] )

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda k T}\right] - 1} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{ с}} \cdot \frac{1}{\text{м}} \right]$$

$T$  – температура

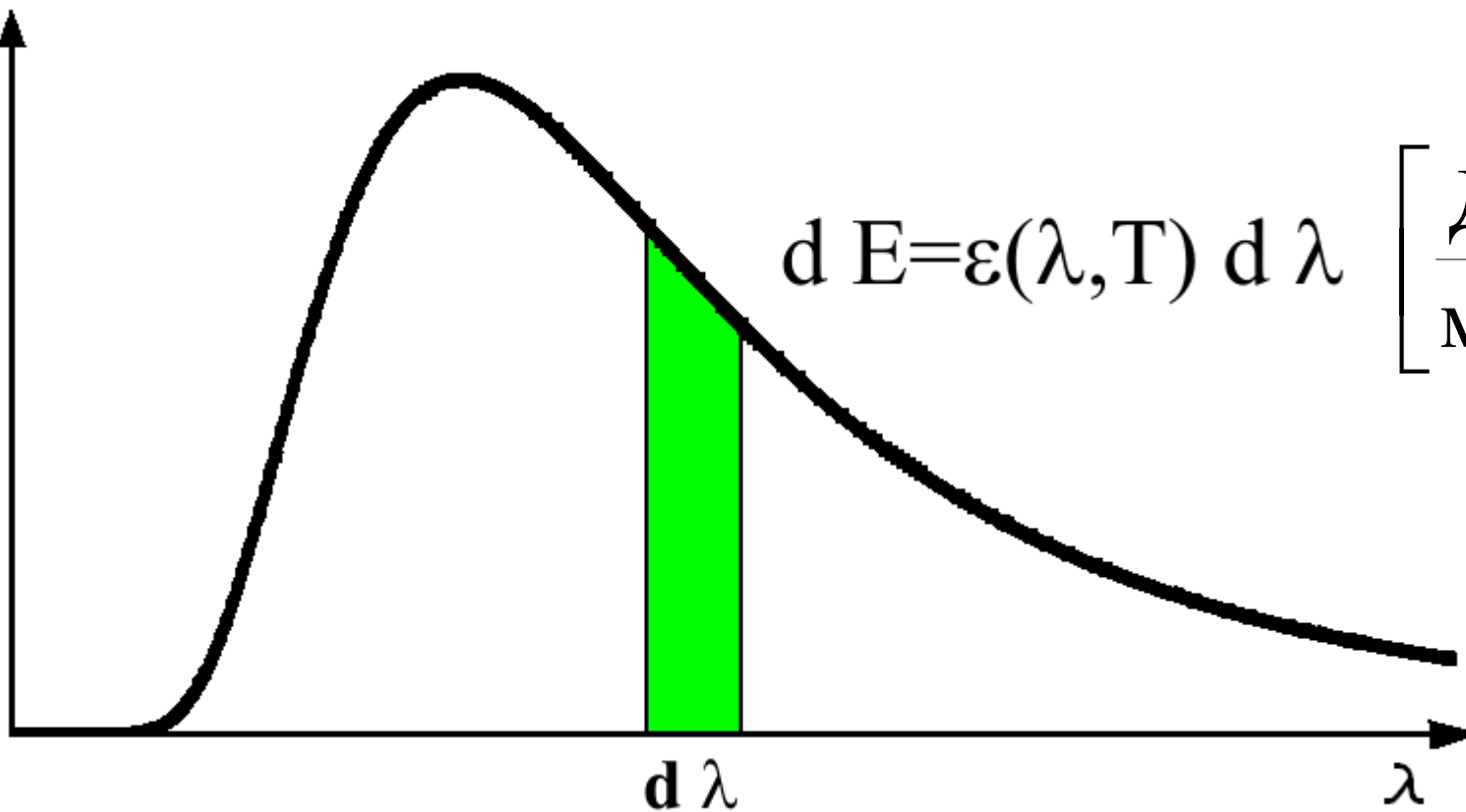
$\lambda$  – длина волны

$c$  – скорость света

$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж / К – постоянная Больцмана

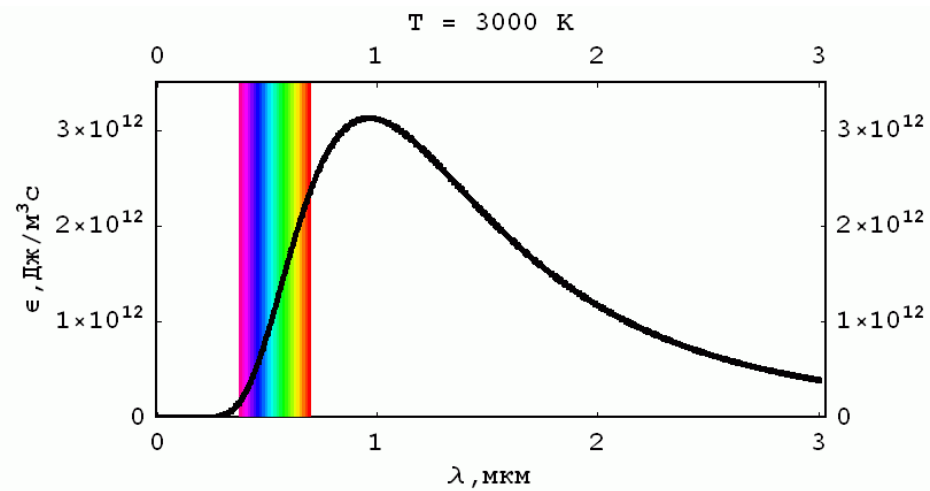
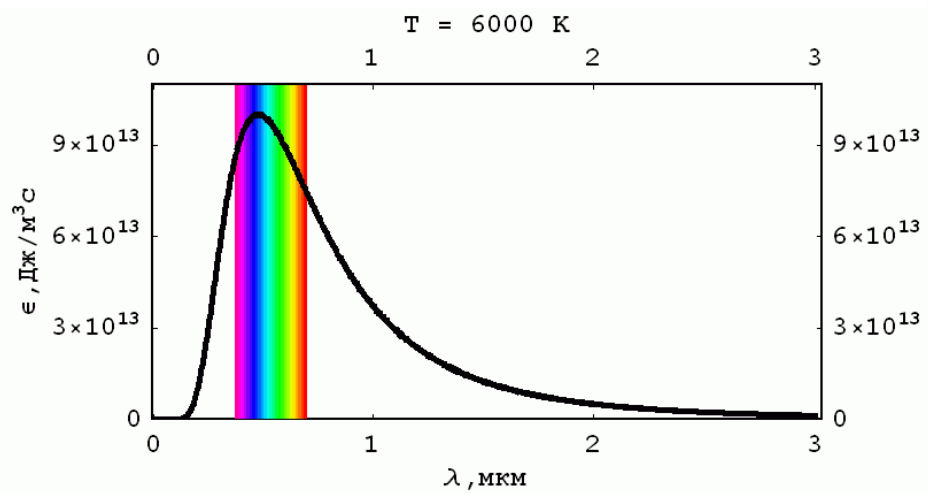
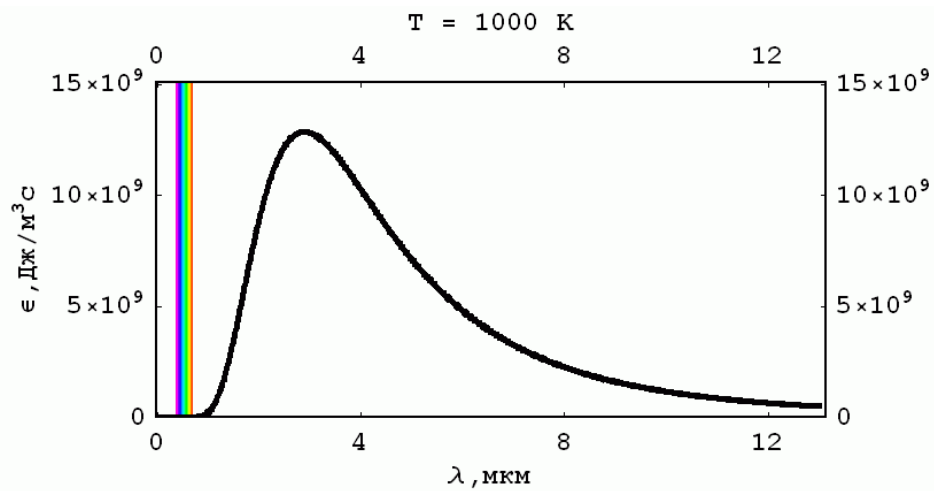
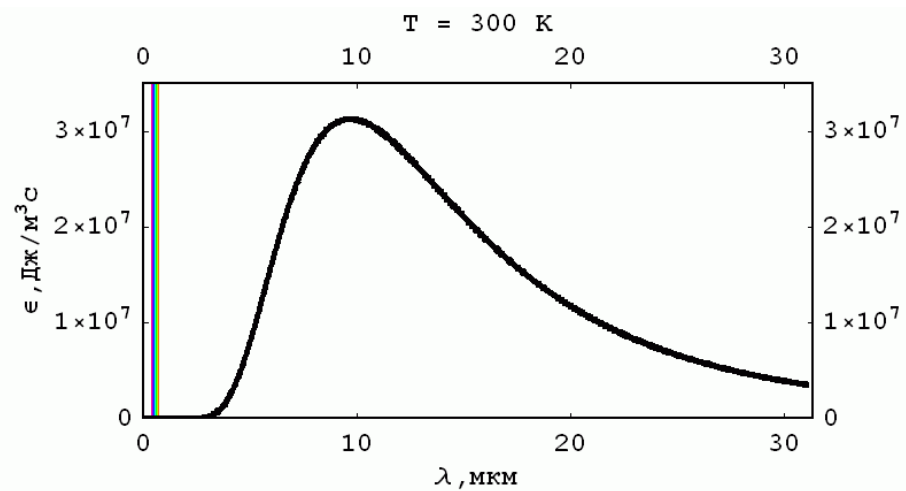
$$\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{ с}} \cdot \frac{1}{\text{м}} \right]$$

 $\varepsilon$ 

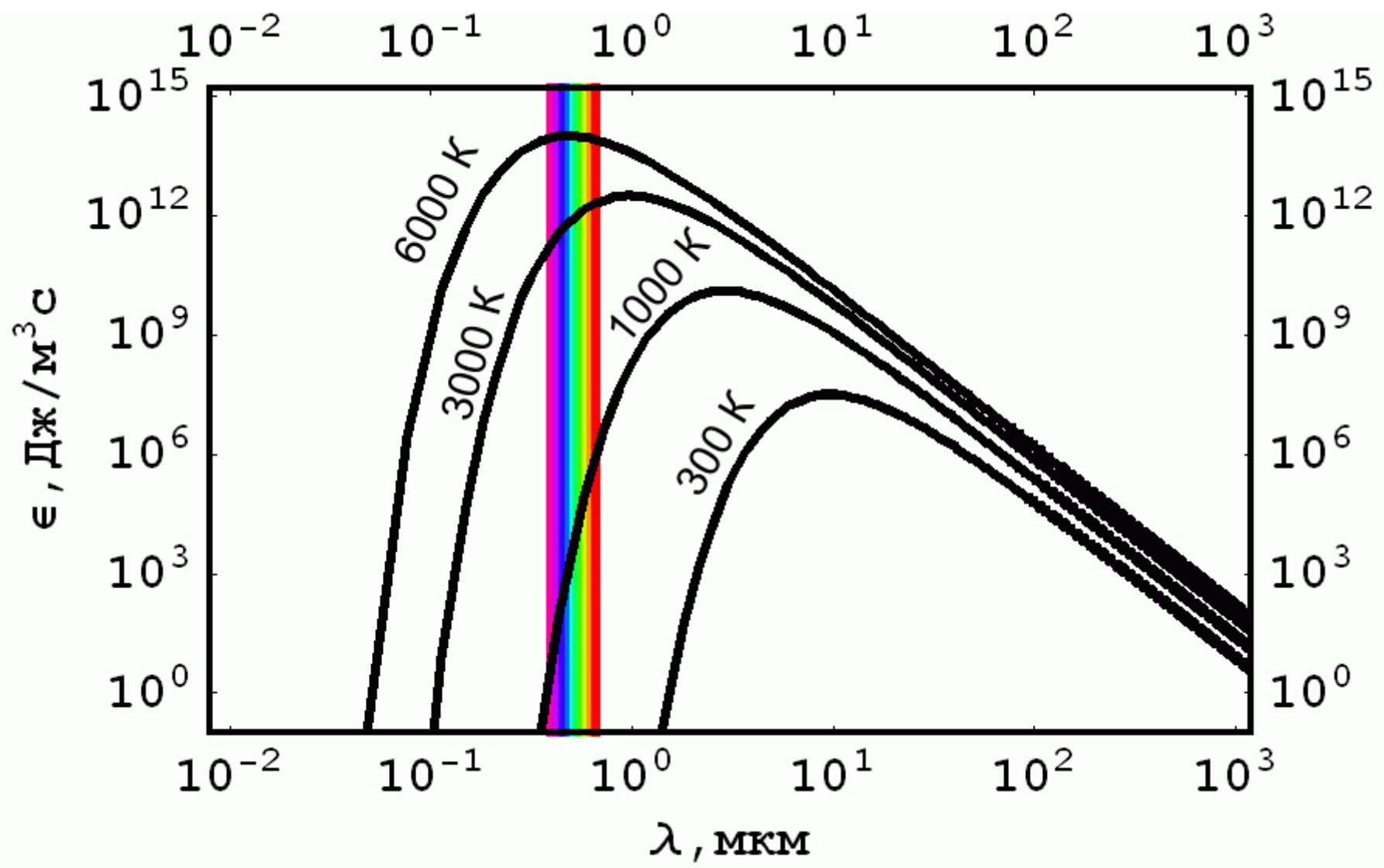
$$dE = \varepsilon(\lambda, T) d\lambda \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{ с}} \right]$$

 $d\lambda$  $\lambda$

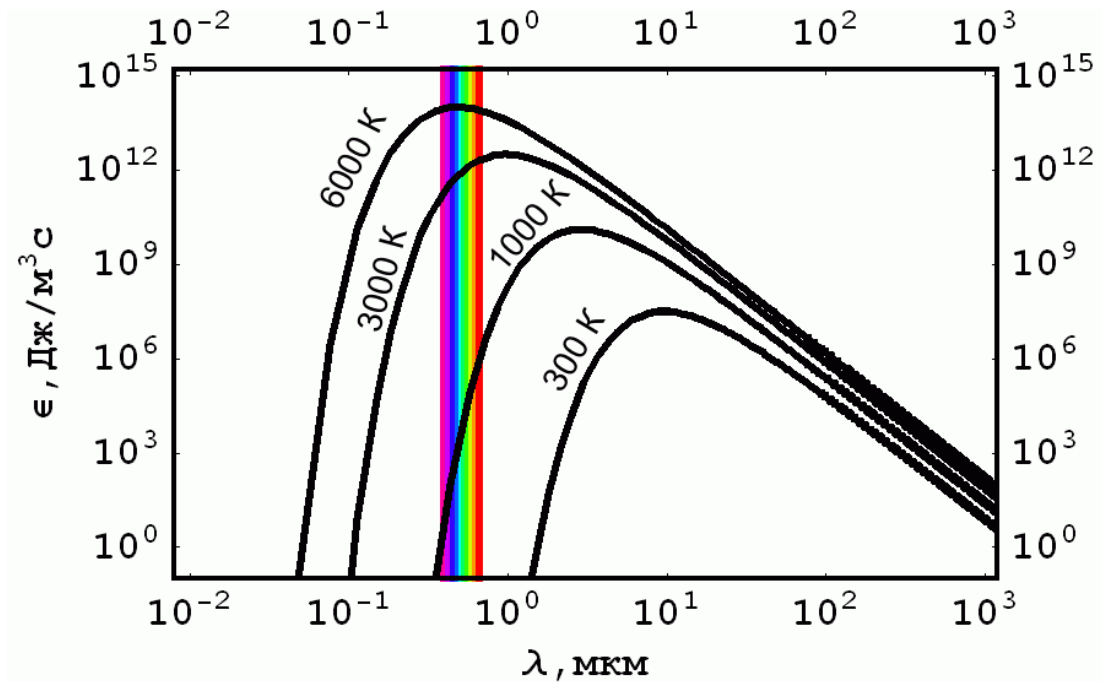








# Следствия закона Планка



# Закон смещения Вина [W. Wien, 1893]

$$\varepsilon(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda kT}\right] - 1} d\lambda$$

трансцендентное  
уравнение

$$\varepsilon(\lambda, T)d\lambda = \{\alpha \equiv \lambda T\} = \frac{F(\alpha)}{\alpha^5} d\alpha$$

$$\frac{d}{d\alpha} \left( \frac{F(\alpha)}{\alpha^5} \right) = 0 \Rightarrow \alpha_{\max}$$

$$\alpha_{\max} = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ [м} \cdot \text{К]} - \text{постоянная Вина}$$

$$\lambda_{\max} T = \alpha_{\max}$$

# Закон Стефана-Больцмана

[J.Stefan, 1879; L.Boltzmann, 1884]

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \exp\left[-\frac{hc}{\lambda k T}\right]$$

постоянная  
Стефана-  
Больцмана

$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}^4} \right]$$

## Модель реального тела

Тело, коэффициент поглощения которого меньше 1 и не зависит от длины волны излучения и абсолютной температуры, называется **«СЕРОЕ ТЕЛО»**

**СЕРОЕ ТЕЛО** является источником **серого излучения**, одинакового по спектральному составу с излучением АЧТ, но отличающегося от него меньшей яркостью

$$\varepsilon_{\text{СТ}} = \beta \varepsilon_{\text{АЧТ}}, \quad \beta < 1$$

Коэффициент черноты  $\beta$ :

Каменный уголь

0.8

Сажа

0.94-0.96

Платиновая и висмутовая черни

0.93-0.99

$$E = \beta \sigma T^4$$

# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №4

---

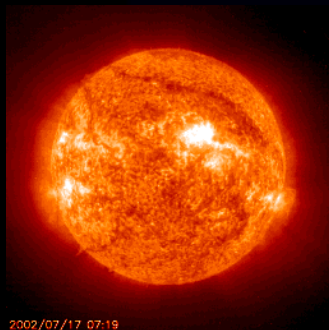
Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*



# РАДИАЦИОННЫЙ ОБМЕН В СИСТЕМЕ СОЛНЦЕ - ЗЕМЛЯ - КОСМОС



2002/07/17 07:19



**СОЛНЕЧНАЯ ПОСТОЯННАЯ ( $S_0$ )** -  
суммарный поток солнечного излучения,  
проходящий через единичную площадку,  
перпендикулярную направлению лучей и  
находящуюся вне земной атмосферы на  
среднем расстоянии Земли от Солнца  
 $r=1$  а. е. ( $149.6 \cdot 10^9$  м).

$$S_0 \approx 1367 \text{ Вт} / \text{м}^2$$

Тепловой поток  
из недр Земли  
 $Q \sim 0.1 \text{ Вт} / \text{м}^2$

$\Delta S_0 < 0.01 \%$  – солнечные пятна

$\Delta S_0 < 0.1 \%$  – 11 – летний цикл

меняет глобальную температуру Земли на 0.1 К

## Светимость Солнца

$$L_{\odot} = S_0 \cdot 4\pi r^2 \approx 3.84 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

АЧТ при  $T=5770 \text{ К}$

## Доля энергии, получаемая Землей

$$L_{\oplus} = S_0 \pi R_{\oplus}^2 \approx 1.75 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$$

$$L_{\oplus} / L_{\odot} = \pi R_{\oplus}^2 / 4\pi r^2 \approx 4.4 \cdot 10^{-10}$$

- ❑ **Все существующие на Земле запасы каменного угля равноценны 30-летнему притоку солнечной радиации к Земле**
- ❑ **За 1,5 суток Солнце дает Земле столько же энергии, сколько дают электростанции всех стран в течение 1 года**
- ❑ **За 40 млн.лет Солнце дает Земле энергию, равную энергии аккреции**

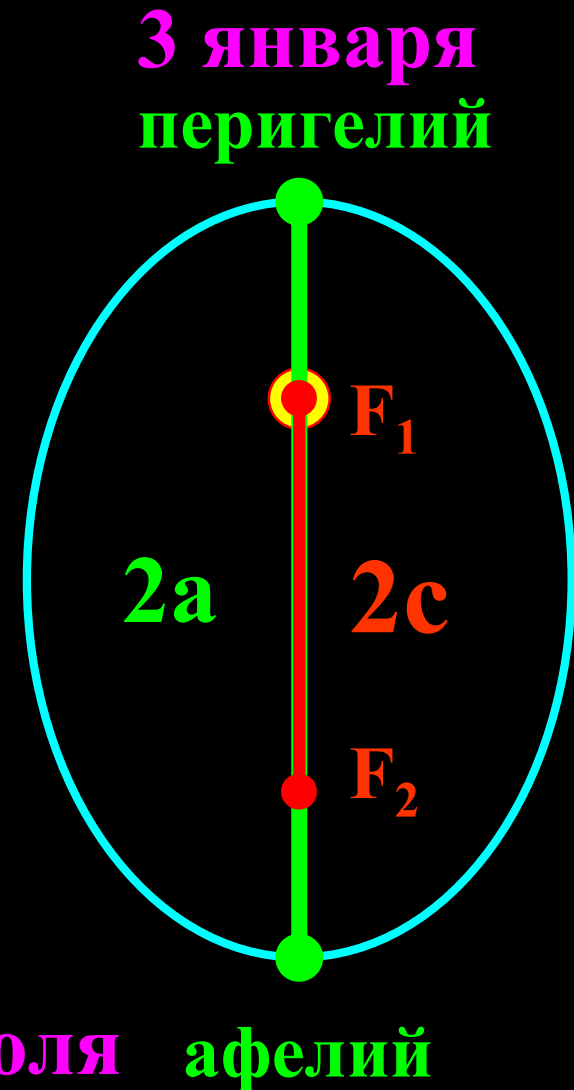
# Сезонные вариации солнечной радиации (но не солнечной постоянной!)

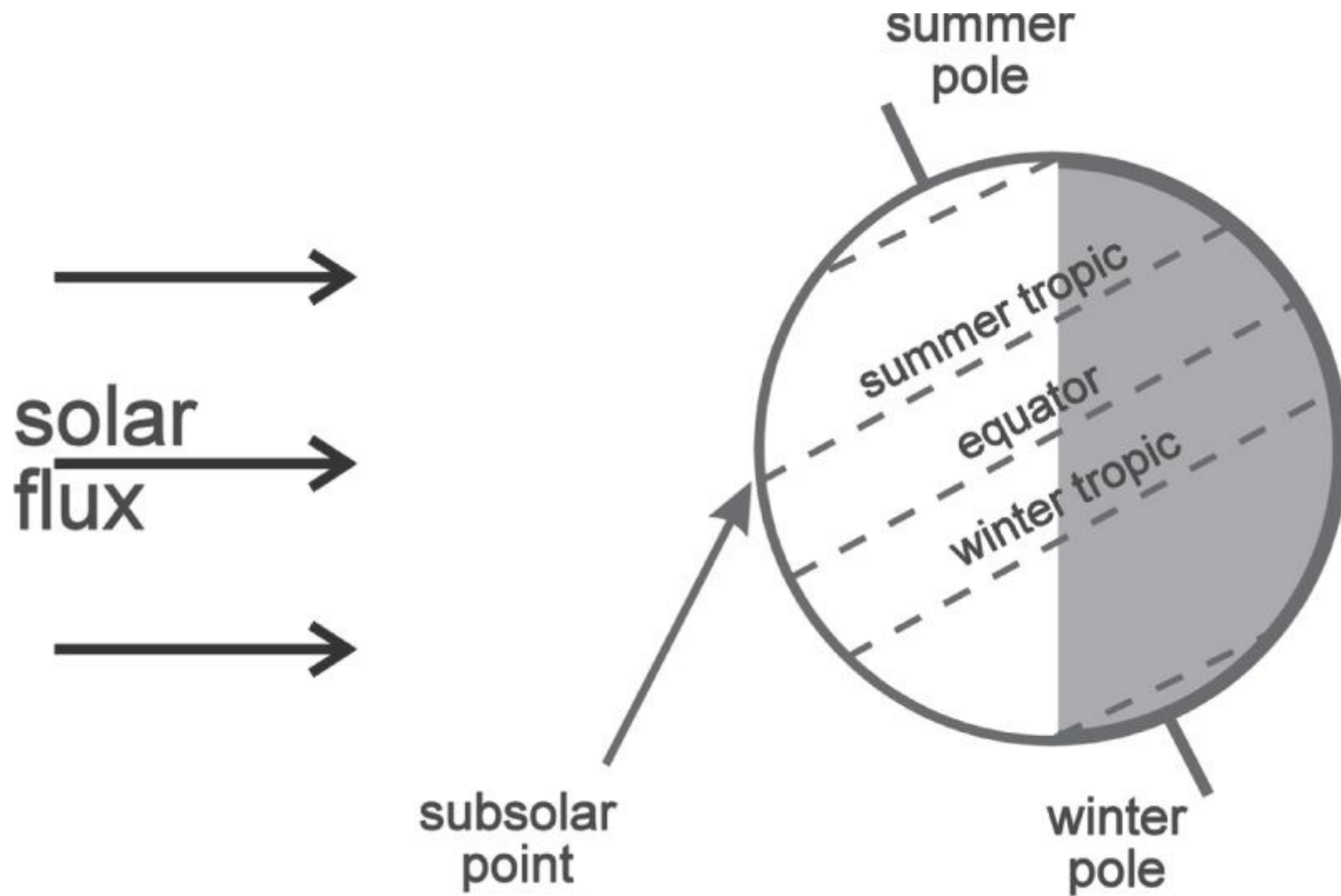
$$\Phi \sim \frac{1}{r^2} \Rightarrow \frac{\Phi_{\text{перигелий}}}{\Phi_{\text{афелий}}} = \left( \frac{r_{\text{афелий}}}{r_{\text{перигелий}}} \right)^2$$

$$e = c/a = 0.0167$$

$$\frac{r_{\text{афелий}}}{r_{\text{перигелий}}} = \frac{a+c}{a-c} = \frac{1+e}{1-e} \approx 1.017$$

$$\frac{\Phi_{\text{перигелий}}}{\Phi_{\text{афелий}}} = \left( \frac{1+e}{1-e} \right)^2 \approx 1.034$$





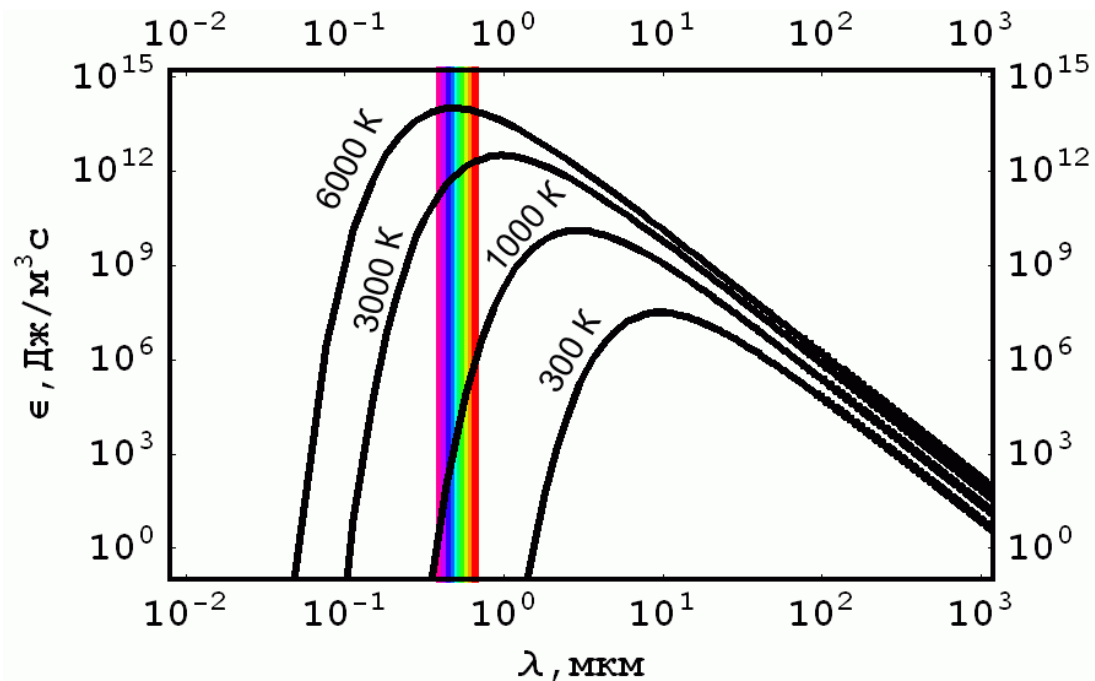
$$\lambda_{\max} T = \alpha_{\max}$$

## Следствия закона Планка

$$E = \sigma T^4$$

закон  
смещения Вина

закон  
Стефана-Больцмана



**В спектре планет  
всегда присутствуют  
два максимума:**

1. отраженное  
солнечное излучение

2. тепловое излучение

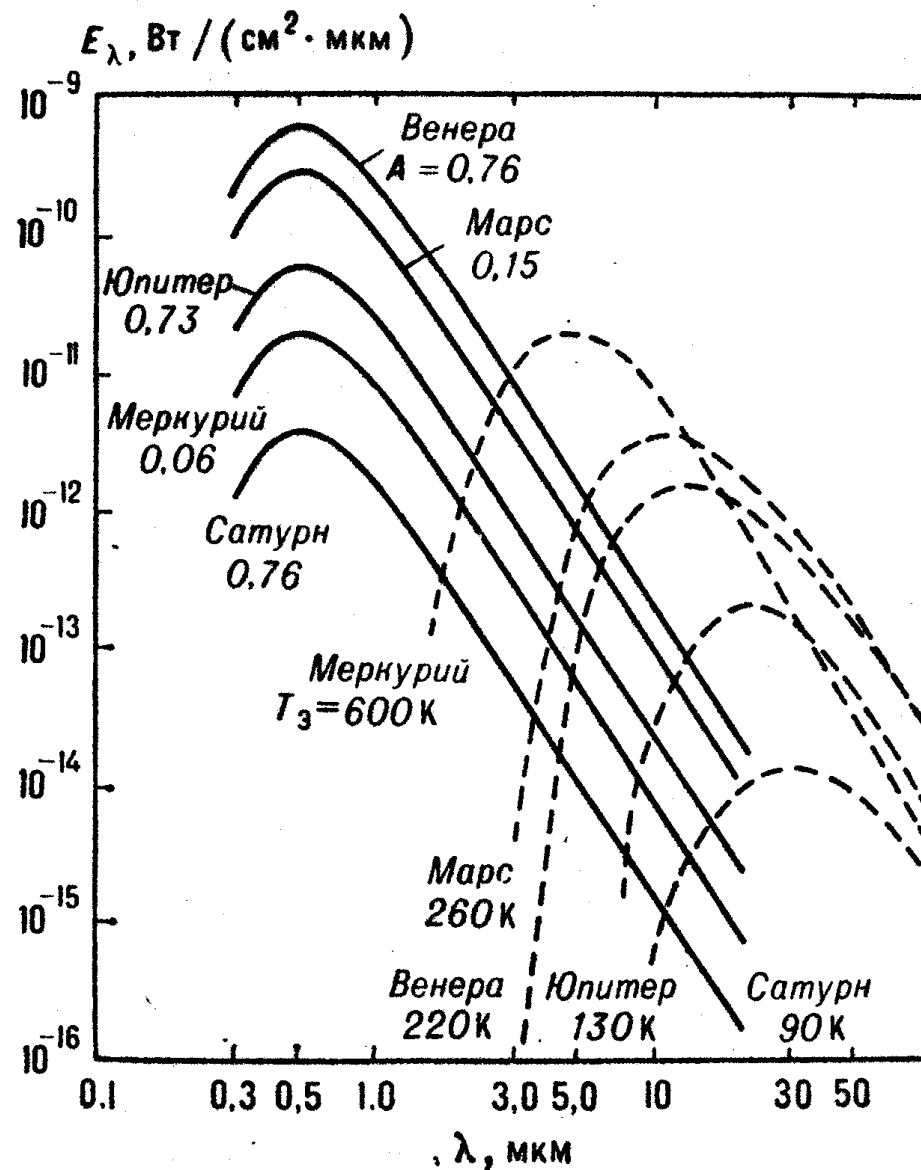


Рис. 3. Схема распределения энергии в спектре излучения планет. Сплошные кривые соответствуют отраженному солнечному излучению, прерывистые — тепловому излучению планет (рядом указаны значения альbedo  $A$  планет и эффективной температуры  $T_s$  их поверхности).



**Альбедо** – доля солнечной энергии, отраженной от планеты

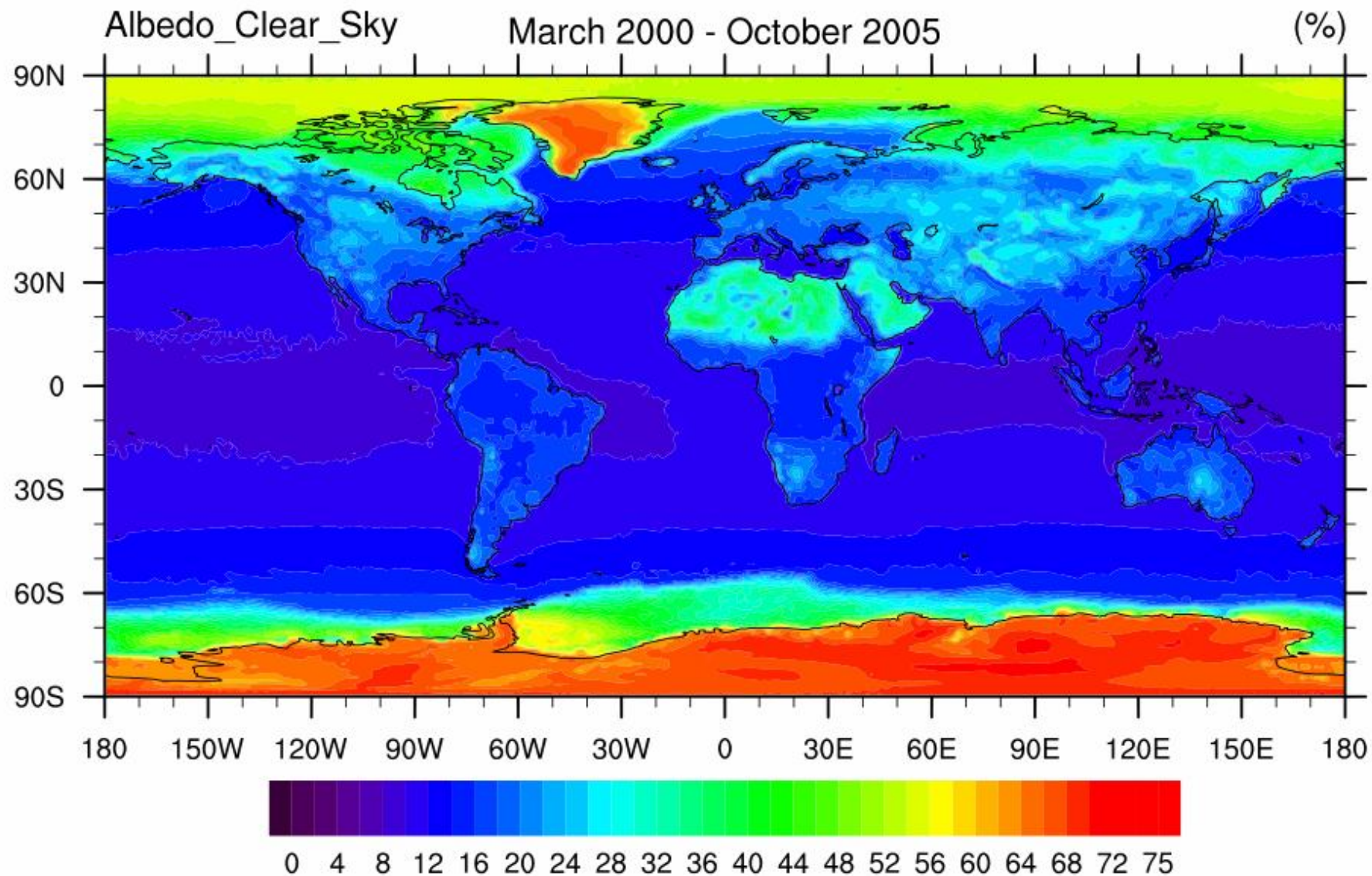
$$A = \Phi / \Phi_0$$

$\Phi_0$  - падающий поток солнечного излучения;

$\Phi$  - поток, рассеянный планетой во все стороны.

## Альбедо различных поверхностей (%)

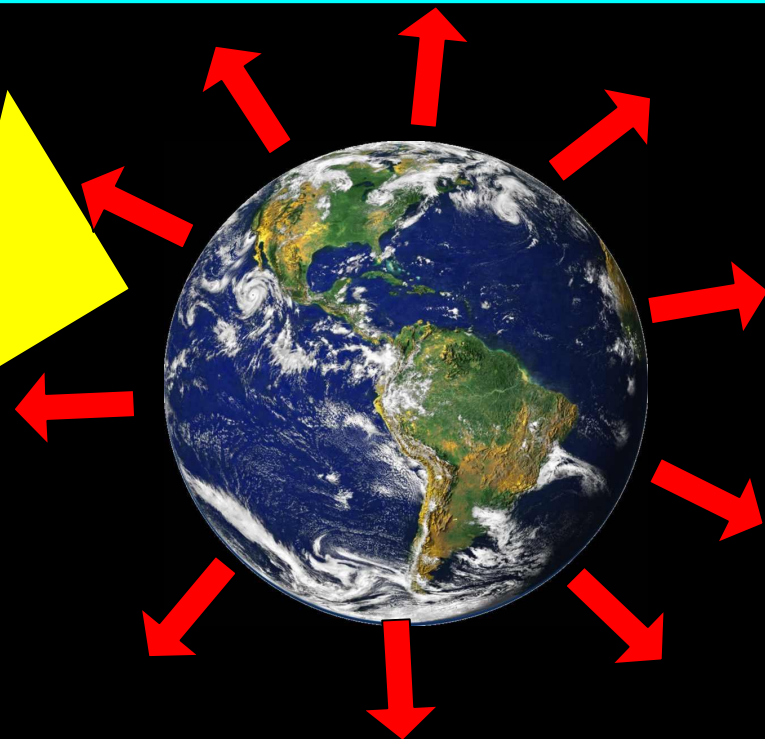
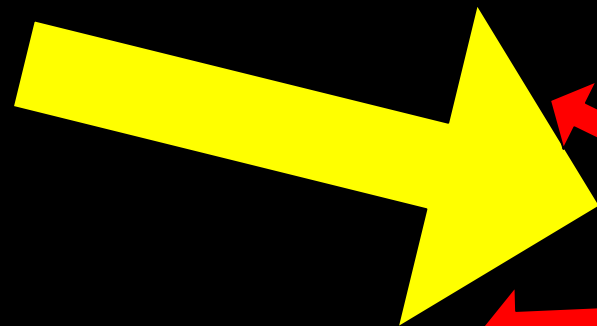
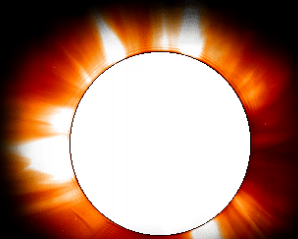
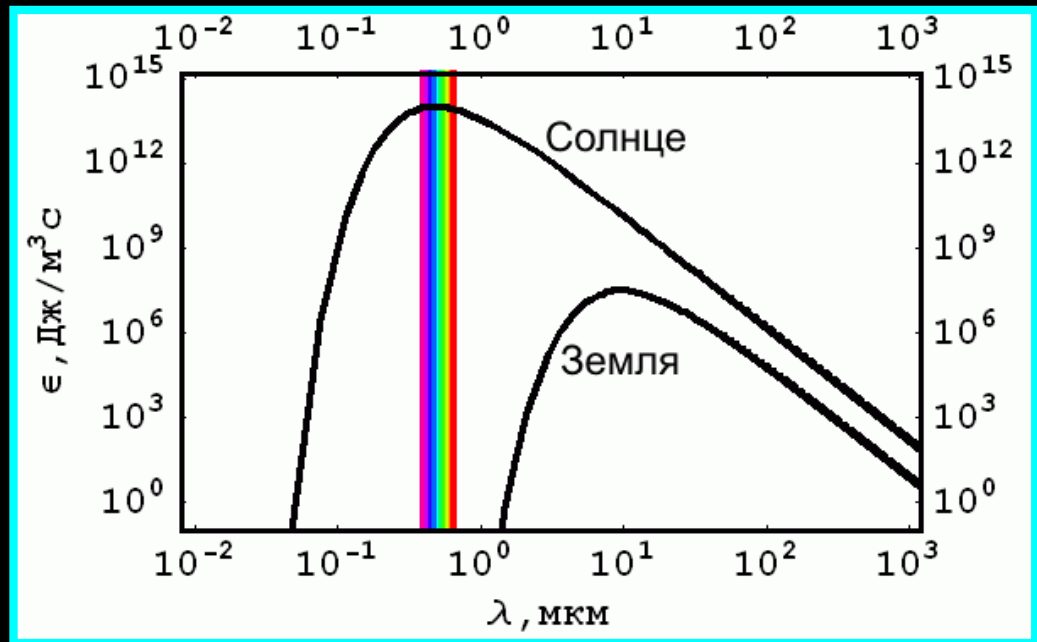
Океан	2-10
Леса	6-18
Города	14-18
Трава	7-25
Почва	10-20
Пустыня (песок)	35-45
Лед	20-70
Облака	30-70
Снег (старый)	40-60
Снег (свежий)	75-95

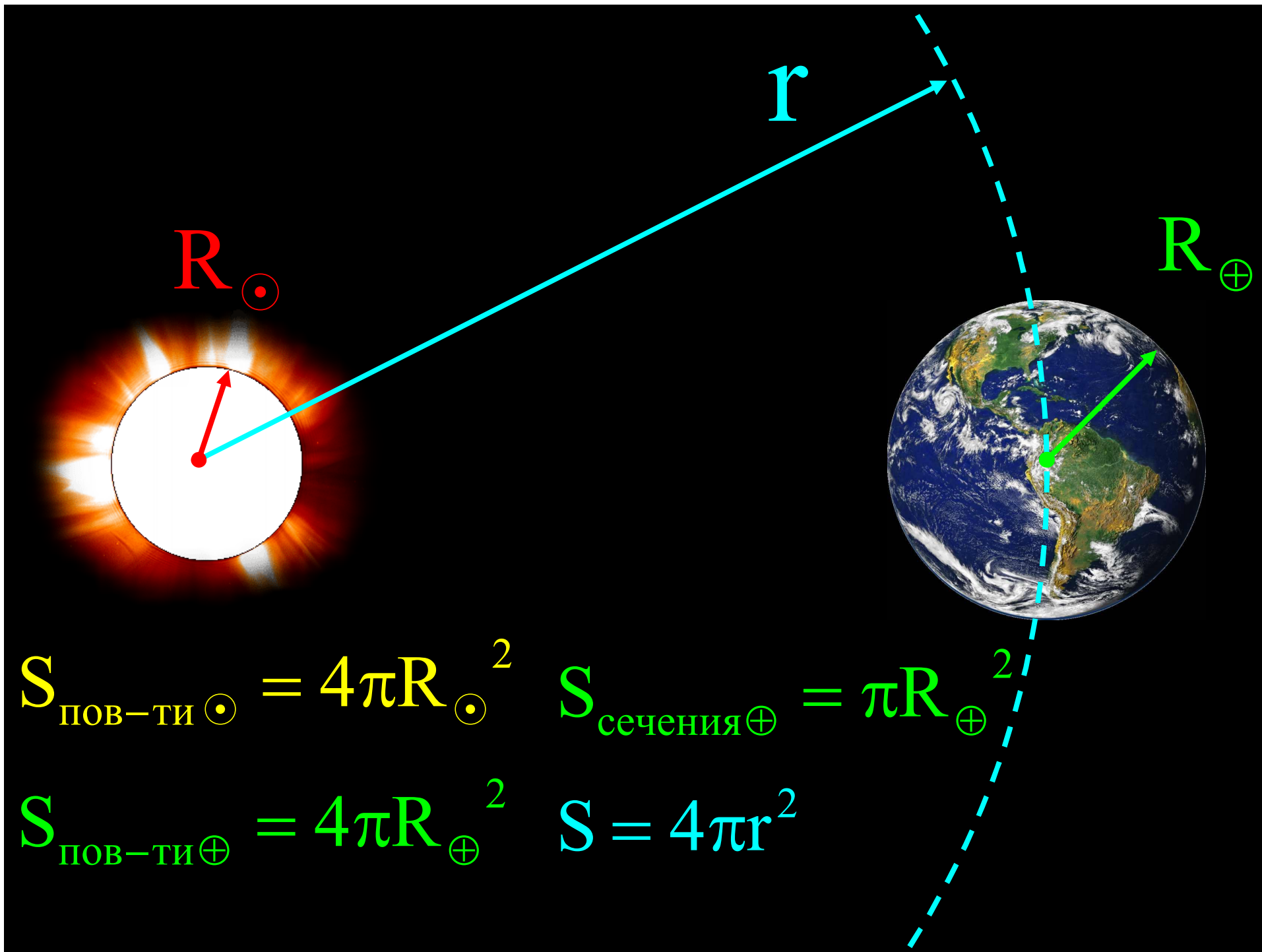


# Оценка радиационной температуры Земли

$$E = \sigma T^4 \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$





$$L_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4 S_{\text{пов-ти } \odot} = \sigma T_{\odot}^4 (4\pi R_{\odot}^2)$$

$$\Phi_{\odot} = L_{\odot} \frac{\pi R_{\oplus}^2}{4\pi r^2} = \pi \sigma T_{\odot}^4 R_{\odot}^2 \frac{R_{\oplus}^2}{r^2}$$

$$\Phi_{\oplus} = \sigma T_{\oplus}^4 S_{\text{пов-ти } \oplus} = \sigma T_{\oplus}^4 (4\pi R_{\oplus}^2)$$

$$\Phi_{\odot} (1 - A) = \Phi_{\oplus}$$

$$T_{\odot} = 5770 \text{ K}$$

$$A \approx 0.3$$

Почему такая низкая температура?!  
Средняя температура Земли  $\approx 288 \text{ K}$

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2r}} (1 - A)^{1/4} \approx 255 \text{ K} \approx -18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R_{\odot} = 6.96 \cdot 10^8 \text{ м}$$

$$r = 149.6 \cdot 10^9 \text{ м}$$

# Не учтено влияние атмосферы! (парниковый эффект)



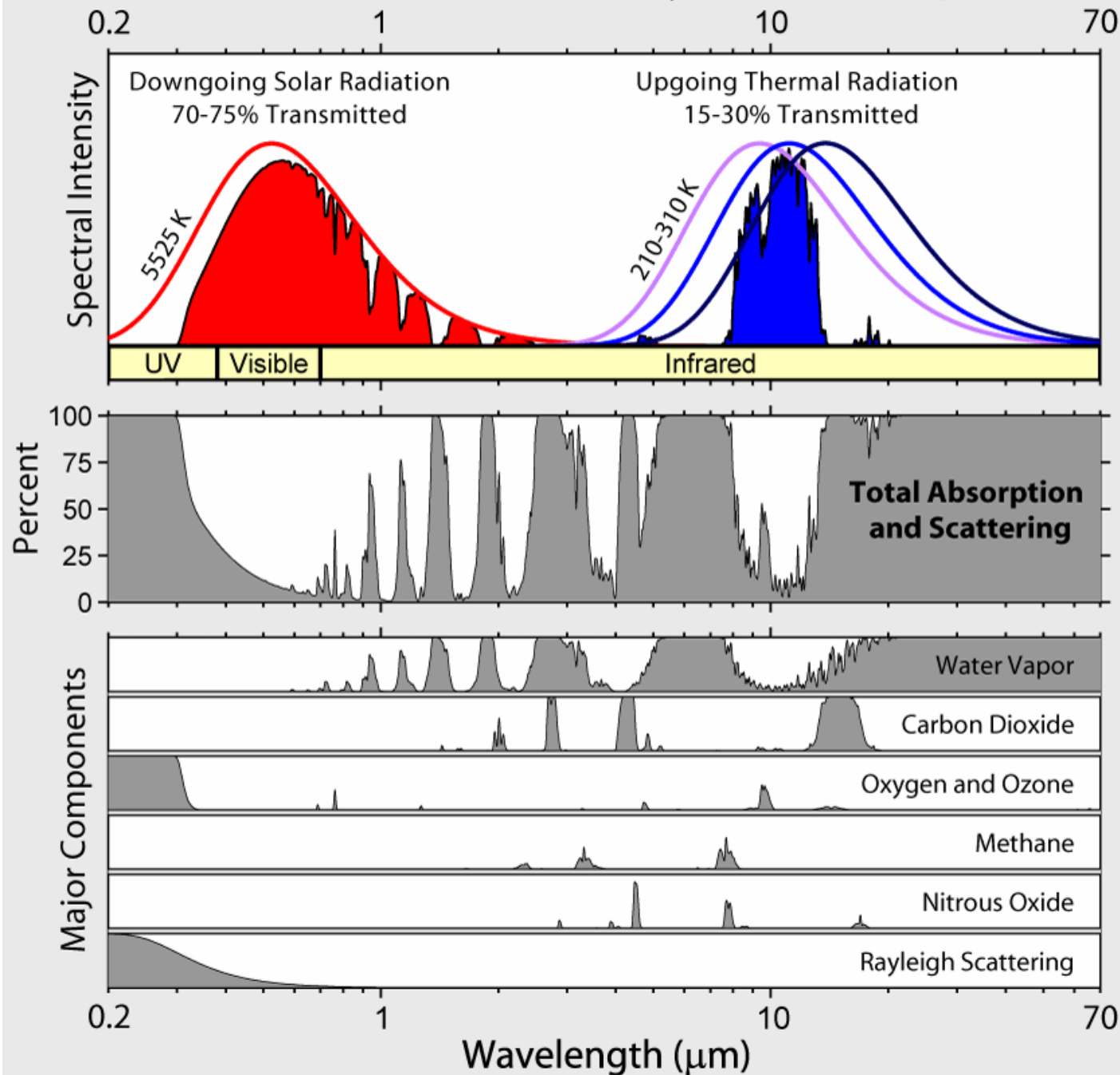
**Fourier J. B., Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 7 (1827), pp. 569–604.**



**Arrhenius S. A., On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, Philosophical Magazine 41 (1896), 237–76.**



# Radiation Transmitted by the Atmosphere



Нормированные  
спектры  
излучения  
Солнца и Земли

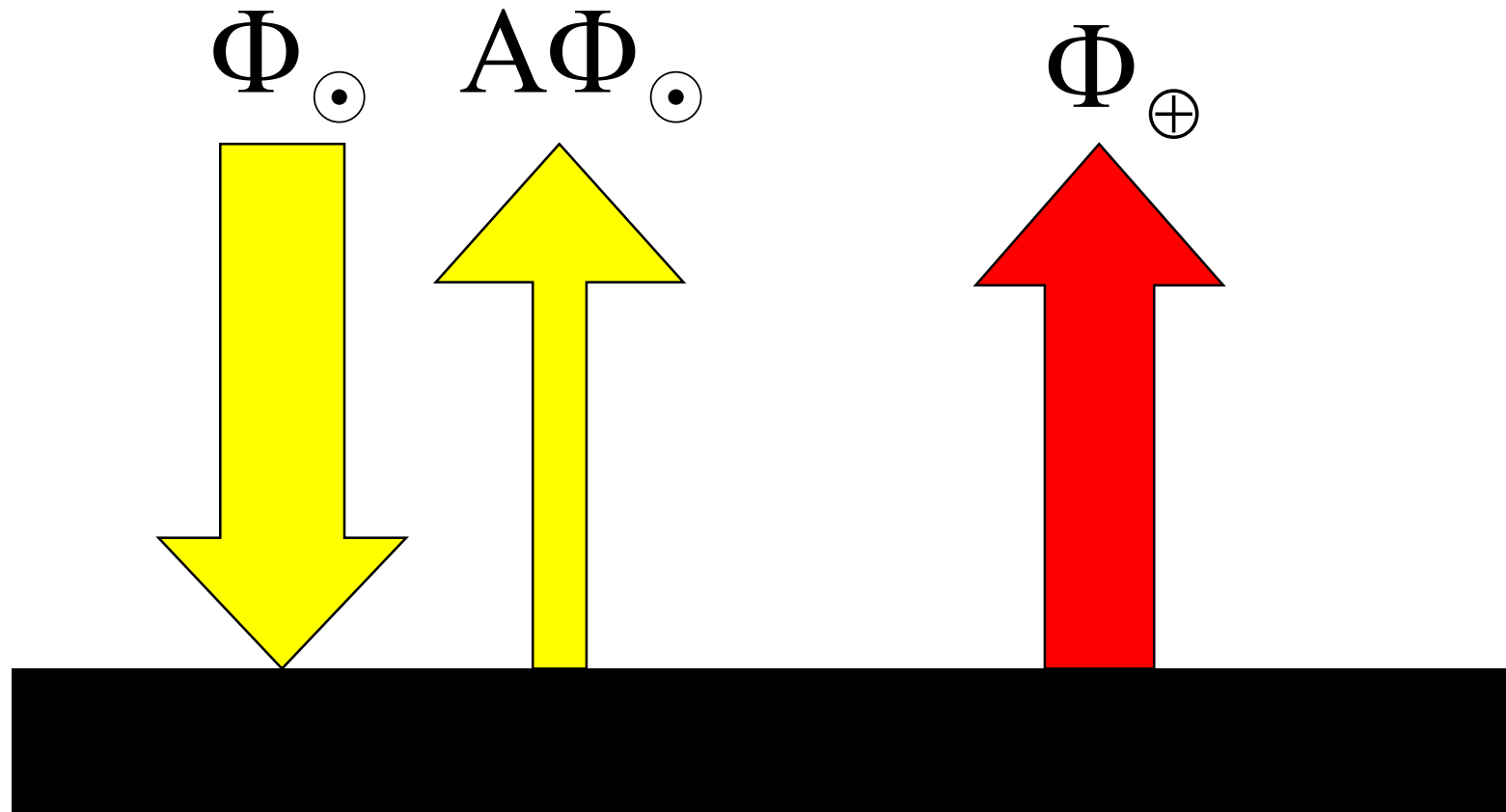
Спектр  
поглощения  
атмосферы

водяной пар  
углекислый газ  
кислород и озон  
метан  
закись азота

# Модель без учета атмосферы

$\sim 0.5 \text{ мкм}$

$\sim 10 \text{ мкм}$

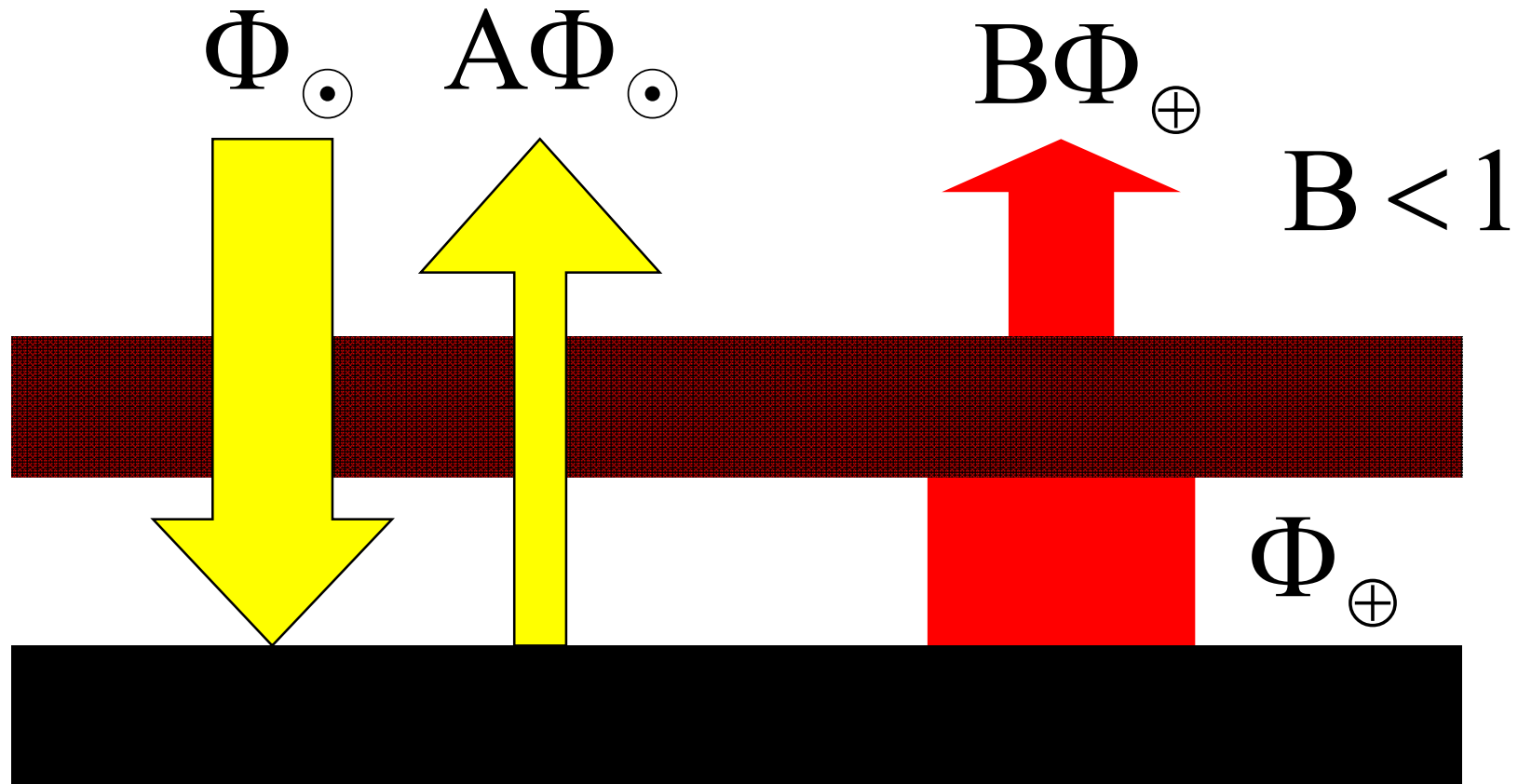


$$\Phi_{\odot} - A\Phi_{\odot} = \Phi_{\oplus}$$

# Модель с учетом атмосферы

$\sim 0.5 \text{ мкм}$

$\sim 10 \text{ мкм}$



$$\Phi_{\odot} - A\Phi_{\odot} = B\Phi_{\oplus}$$

$$\cancel{\Phi_{\odot}(1-A) = \Phi_{\oplus}} \Rightarrow \Phi_{\odot}(1-A) = B\Phi_{\oplus}$$

$$B < 1$$

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2r}} \left( \frac{1-A}{B} \right)^{1/4} \approx 288 \text{ K} \approx 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\odot} = 5770 \text{ K}$$

$$B \approx 0.6$$

$$A \approx 0.3$$

$$R_{\odot} = 6.96 \cdot 10^8 \text{ м}$$

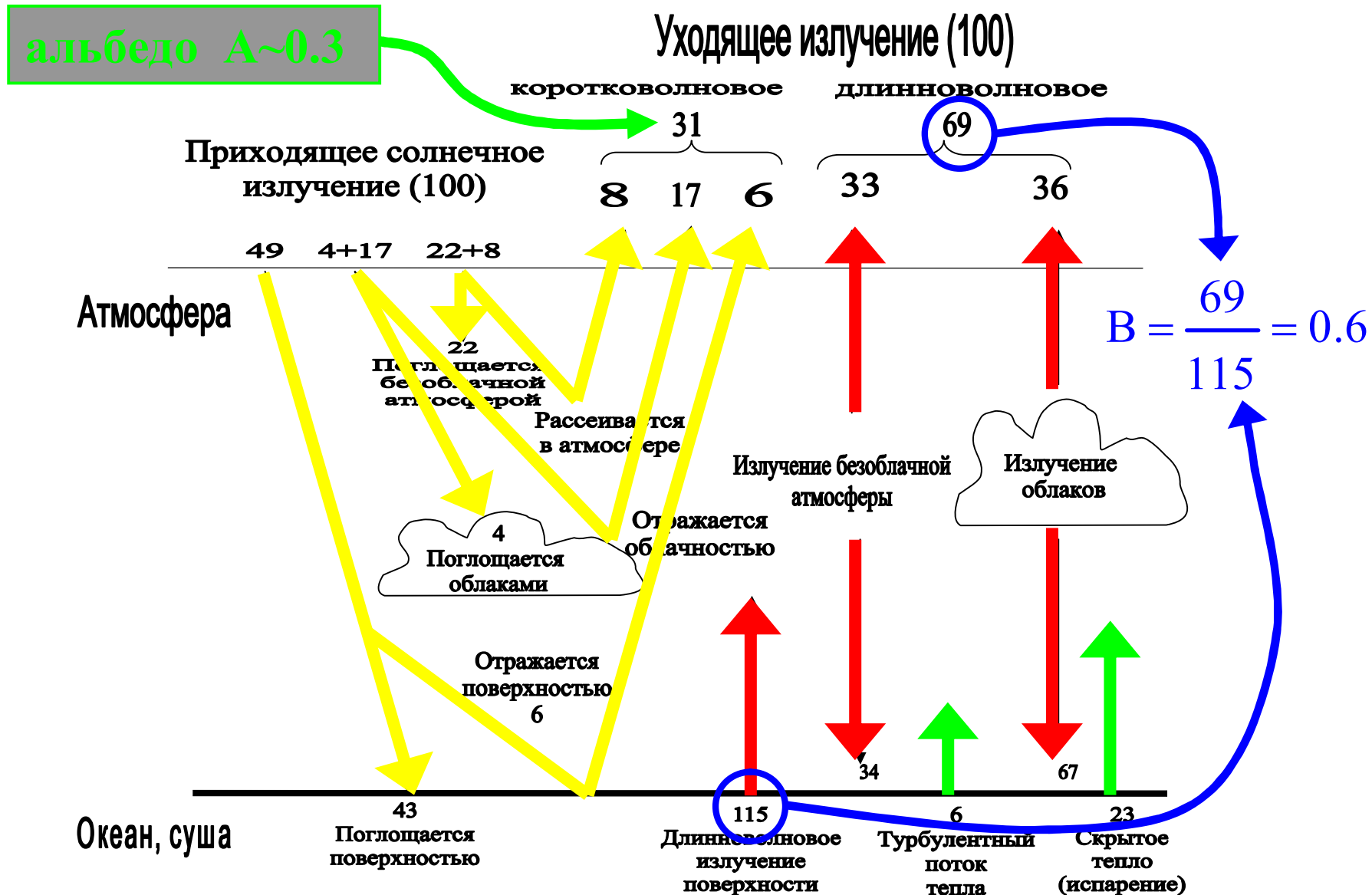
$$r = 149.6 \cdot 10^9 \text{ м}$$

$$A(T_{\oplus}), \quad B(T_{\oplus})$$

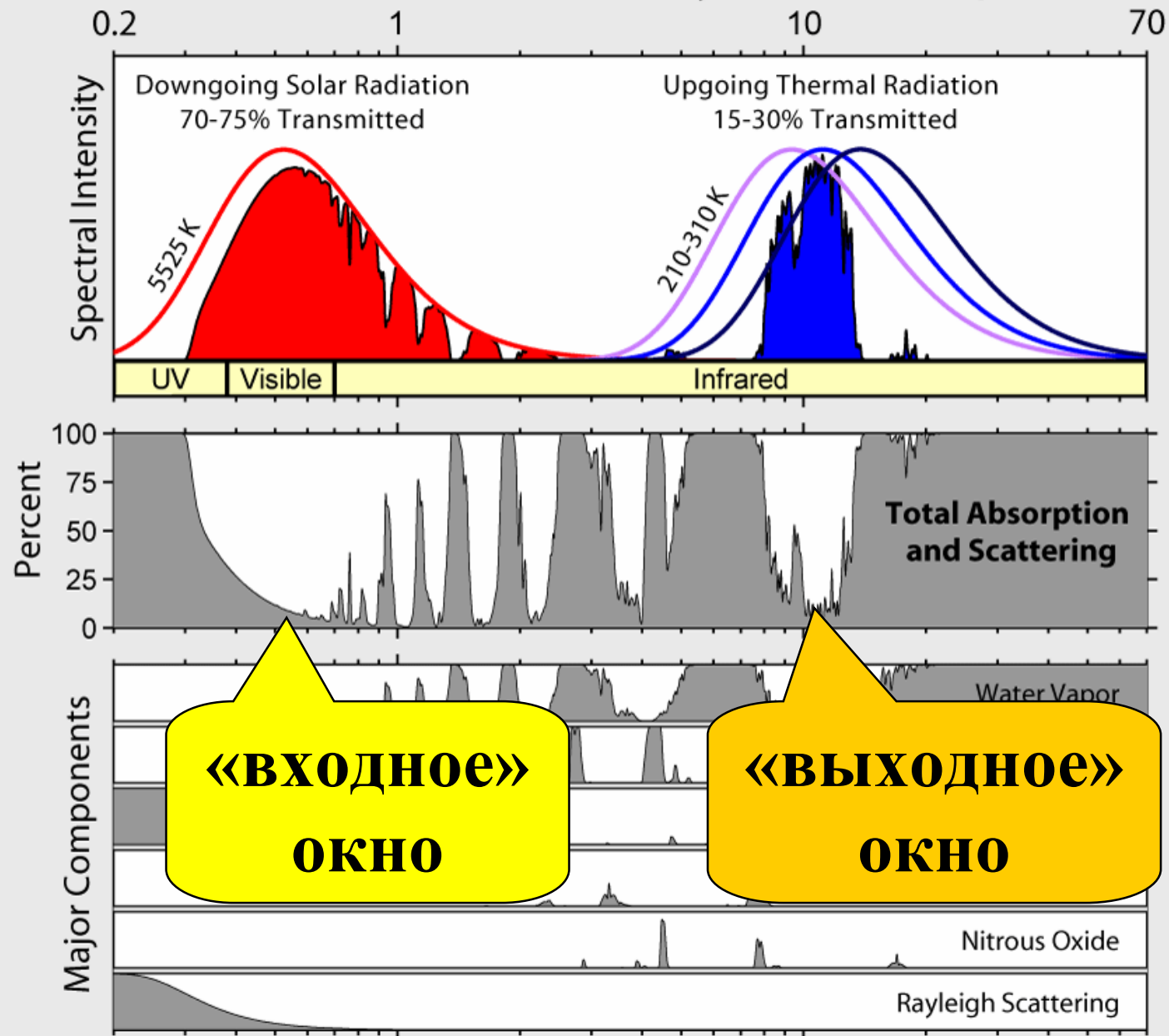
**ВОЗМОЖНОСТЬ ГЛОБАЛЬНОГО  
ОЛЕДЕНЕНИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ**

# Радиационно-тепловой баланс атмосферы

Космос



# Radiation Transmitted by the Atmosphere



**Климат Земли сильно зависит от пропускной способности окон**

parts per million

Mauna Loa Observatory, Hawaii  
Monthly Average Carbon Dioxide Concentration



**Антропогенное  
воздействие?**

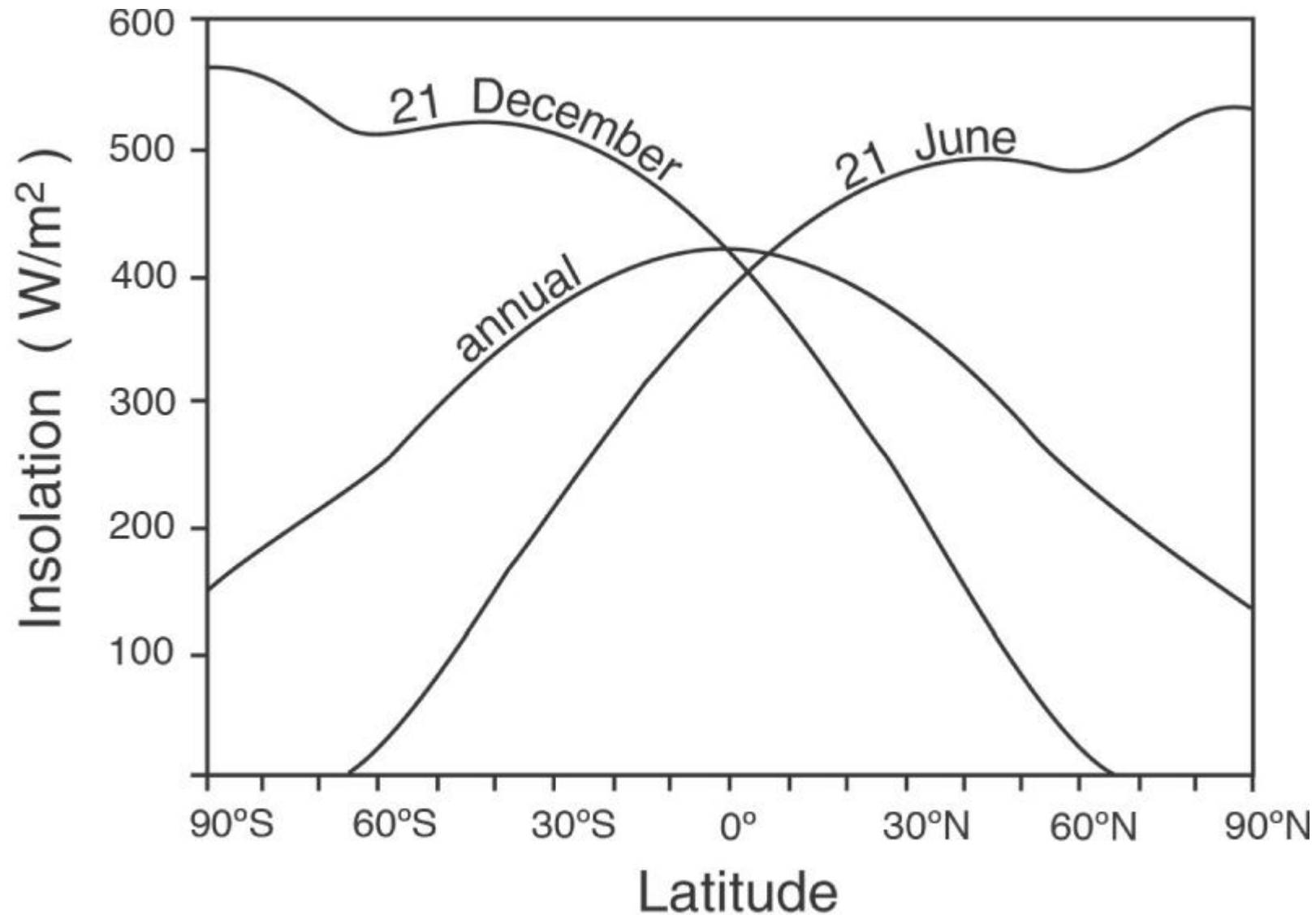
## *Концентрация CO<sub>2</sub> определяется:*

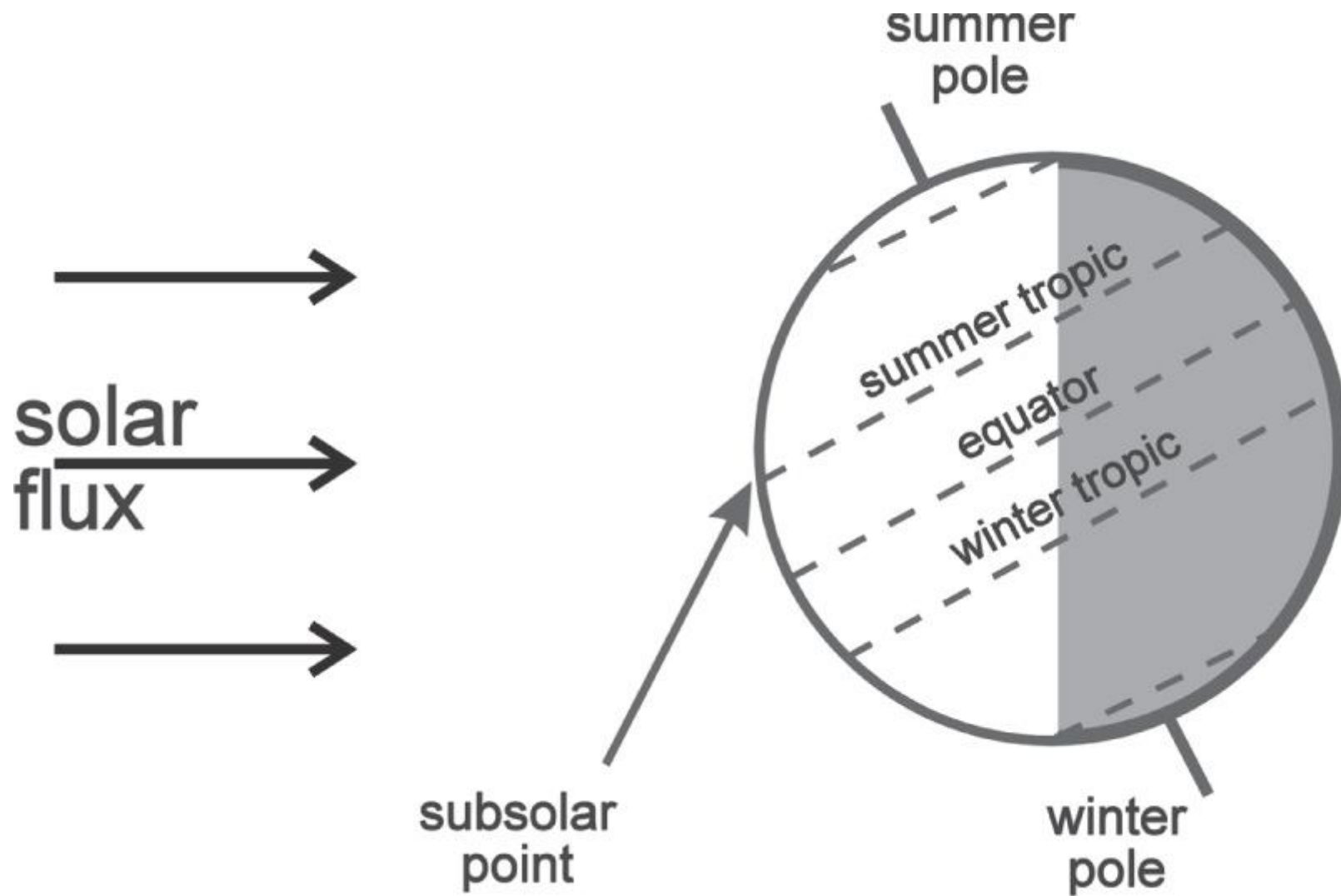
- 1. Фотосинтезом;**
- 2. Дыханием живых организмов;**
- 3. Обменом между океаном и атмосферой;**
- 4. Антропогенной деятельностью (в современном мире)**
- 5. etc.**

<b>Доиндустриальная эпоха</b>	<b>280 PPM</b>
<b>20 000 лет (ледниковый период)</b>	<b>180 PPM</b>
<b>220 млн.лет</b>	<b>1900 PPM</b>
<b>450-550 млн.лет</b>	<b>7500 PPM</b>

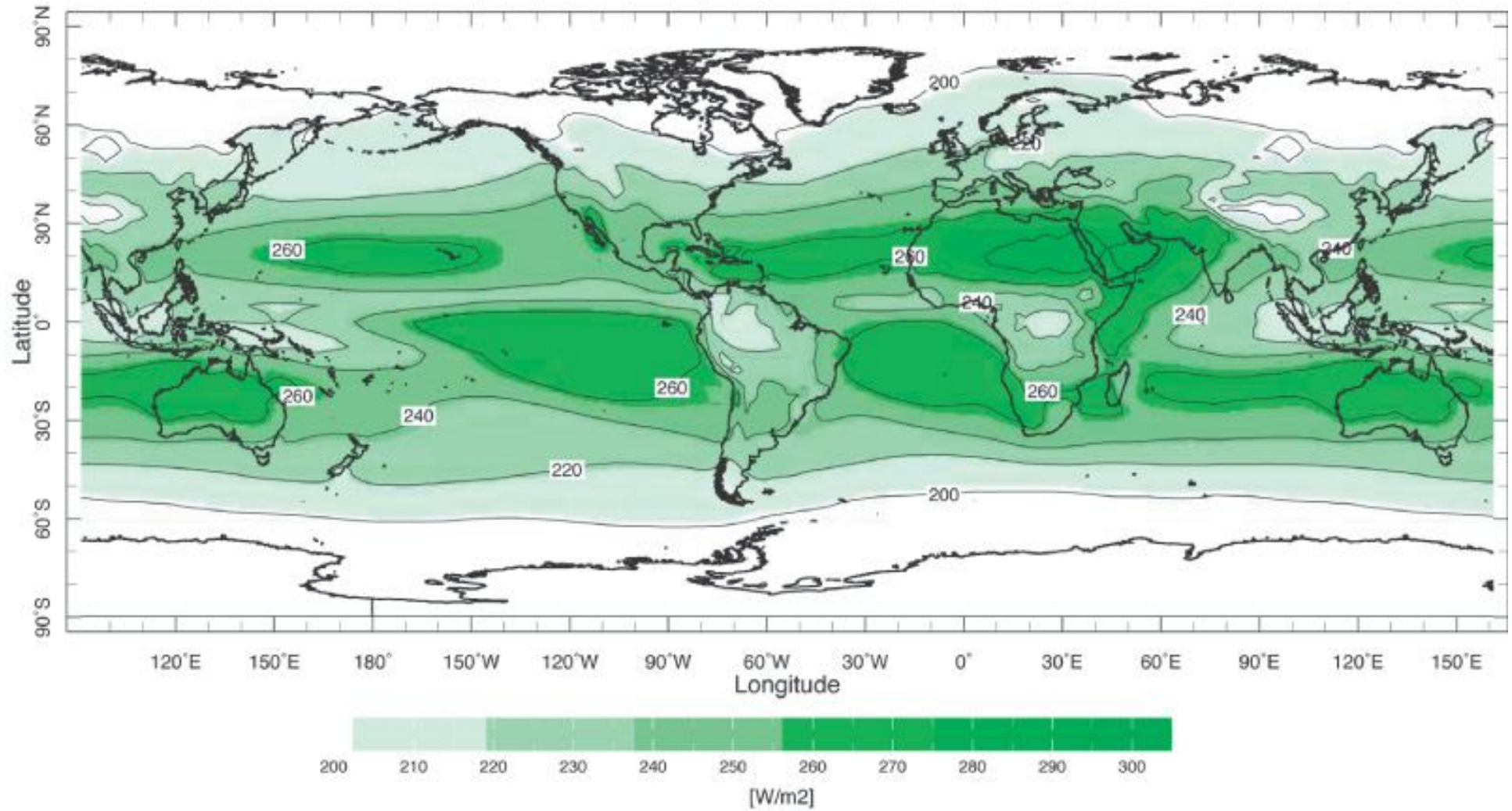


# Широтное распределение инсоляции ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) поверхности Земли



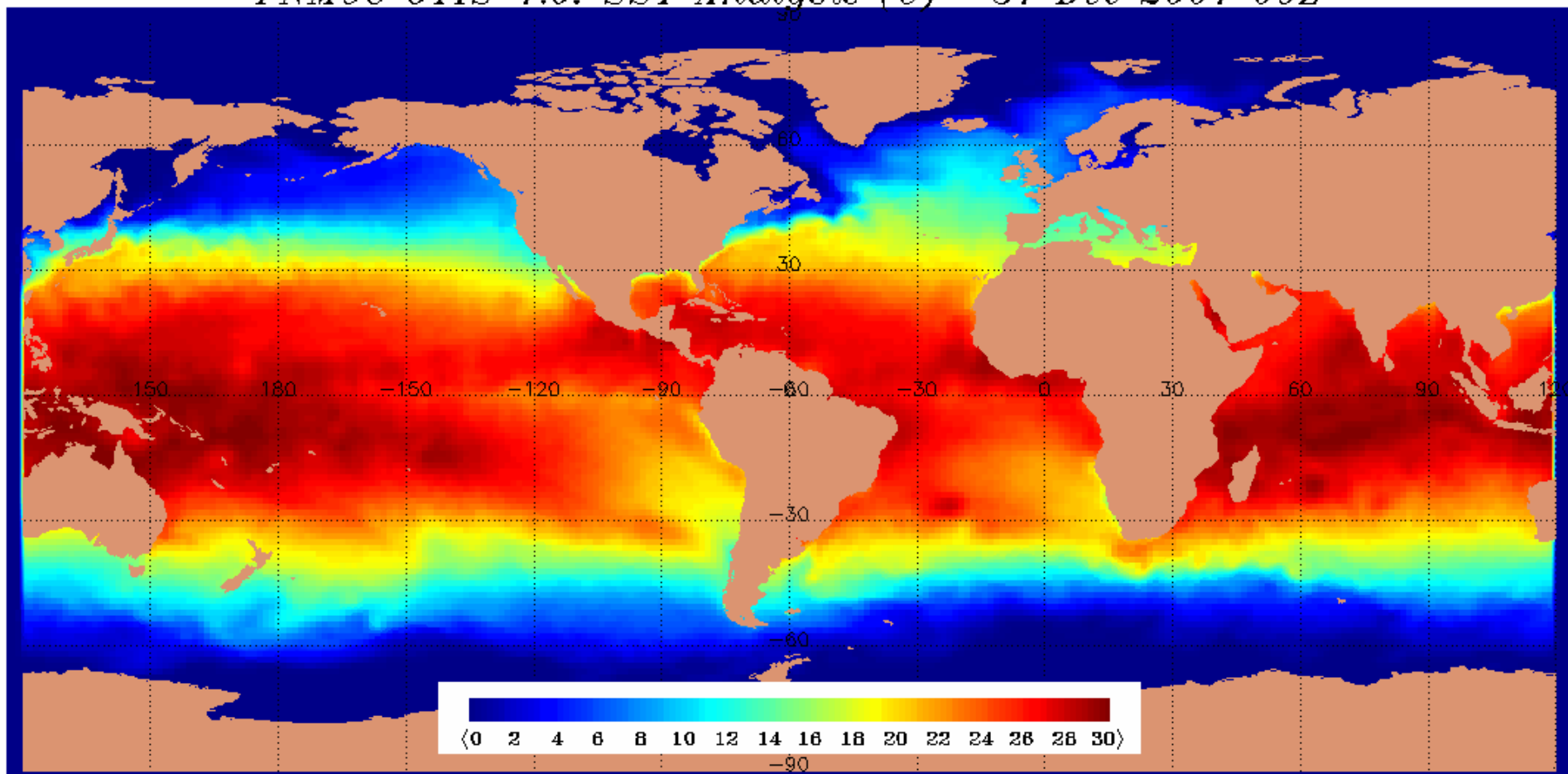


## Outgoing Longwave Radiation ( $\text{Wm}^{-2}$ )

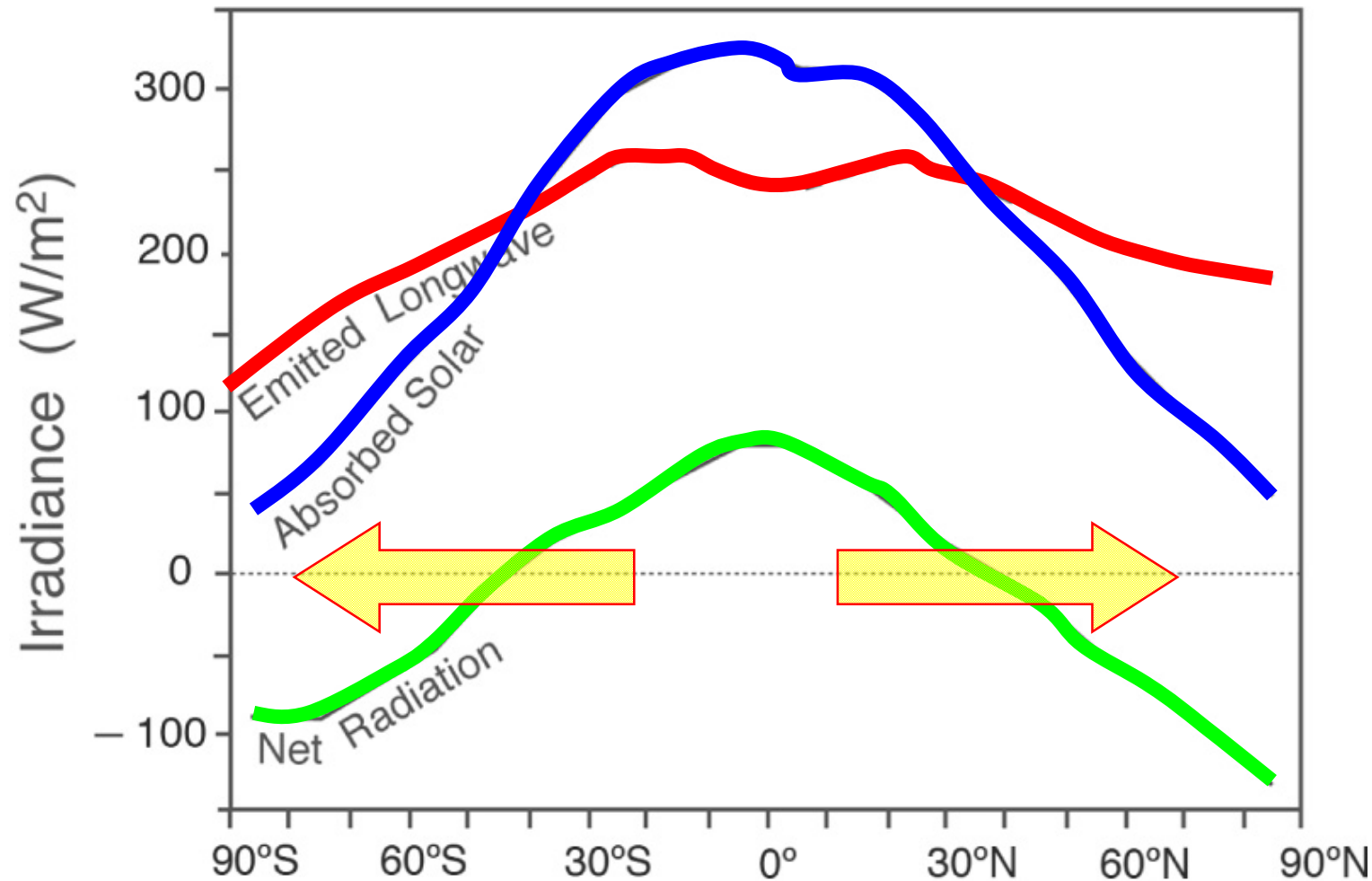


# Температура поверхности океана (ТПО)

*FNMOC OTIS 4.0: SST Analysis (C) 31 Dec 2001 00Z*



Среднегодовые широтные распределения радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ):  
поглощенной солнечной, излученной длинноволновой  
и их разница



Существует поток тепла от экватора к полюсам

# Блоки климатической системы (проявление сезонных колебаний)

## Атмосфера в целом

Малоинерционный блок,  
приспосабливающийся к  
состоянию океана и суши

**Масса=1**

**Теплоемкость = 1.1**

Самое инерционное звено

**Верхний  
«деятельный» слой  
океана ~250 м**

**Масса = 16.4**

**Теплоемкость = 77**

**Верхний  
«деятельный»  
слой суши ~10 м**

**Масса=0.55**

**Теплоемкость = 0.5**

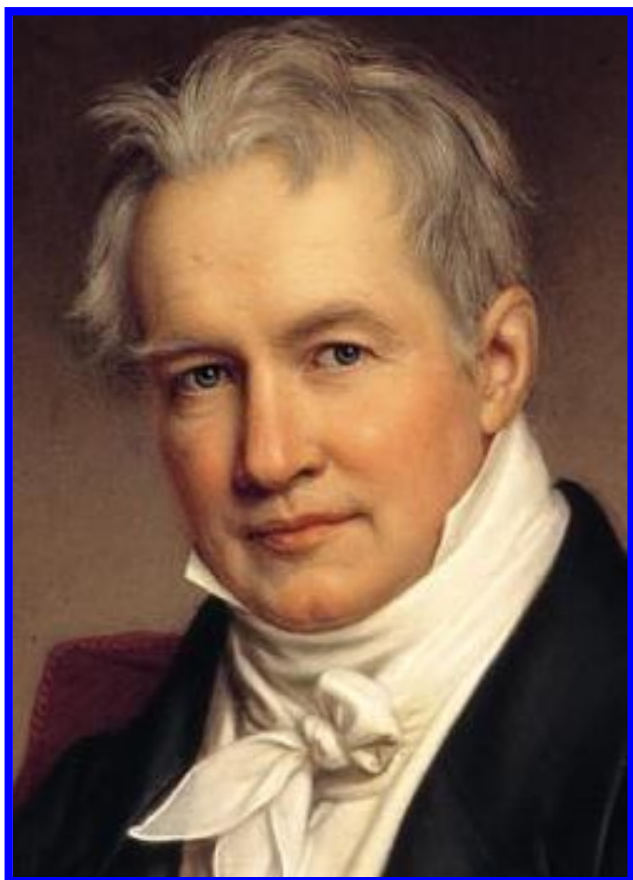
+ ледяные щиты  
⇒  
высокая тепловая  
инерция

- Термин **КЛИМАТ** (в переводе с греческого – «наклон») ввел древнегреческий астроном Гиппарх, который разделил Землю на 5 широтных зон: полярные, умеренные и тропическую, которые различаются наклоном солнечных лучей.



*Гиппарх из Никеи*  
(190-120 гг. до н.э.) –  
древнегреческий  
астроном, географ и  
математик

- **Александр фон Гумбольдт добавил к «наклону» влияние подстилающей поверхности океана и суши на атмосферу**



*Александр фон Гумбольдт*  
(1769-1859 гг.)

– немецкий учёный-  
энциклопедист, физик,  
метеоролог, географ,  
ботаник, зоолог и  
путешественник

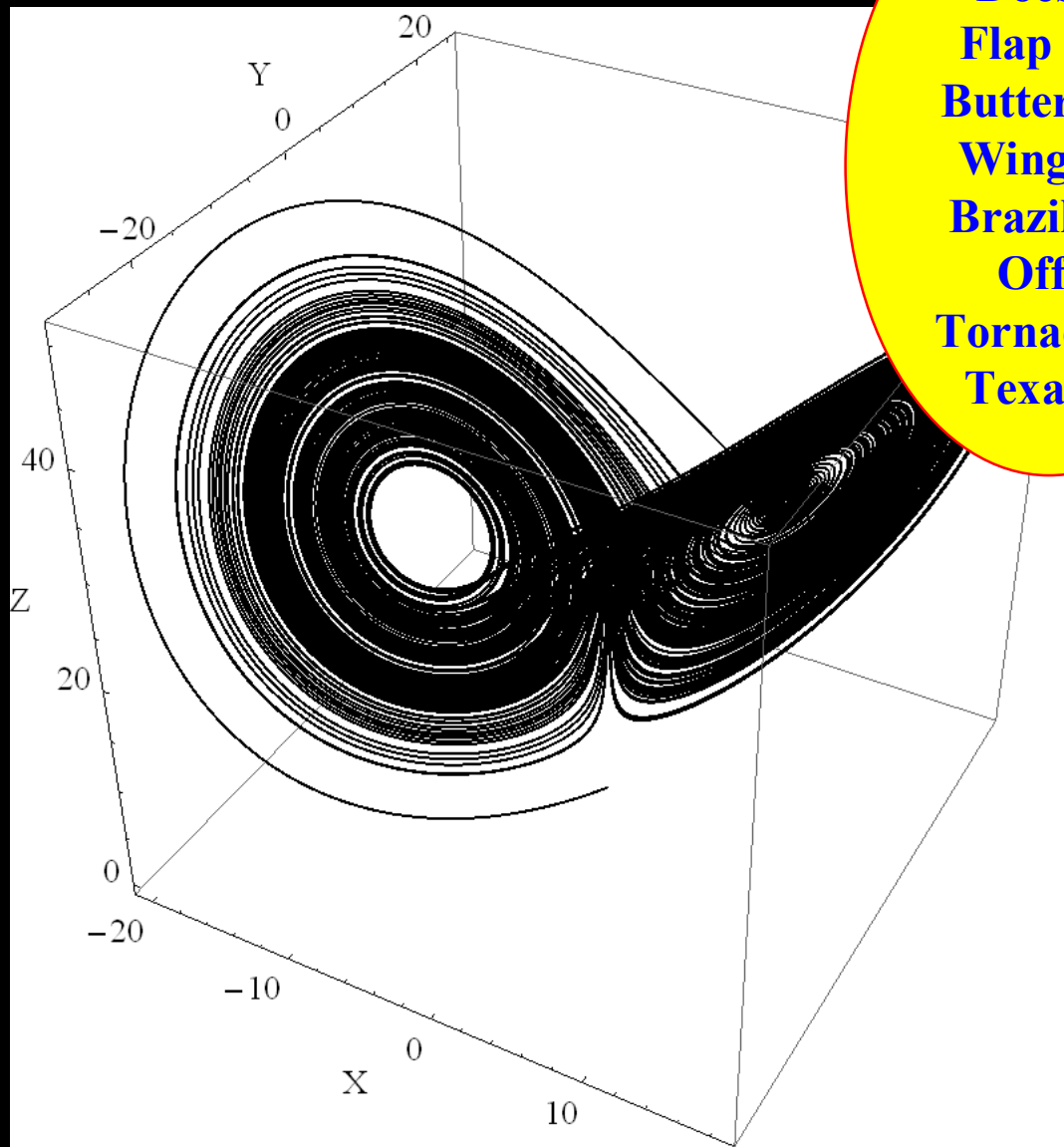


- **Василий Вас. Докучаев** **развил и детализировал представления о широтной, а затем и вертикальной, зональности поверхности суши. Построены климатические карты – средние температуры, осадки, давление для различных сезонов и среднегодовые.**



***Василий Васильевич  
Докучаев (1846-1903 гг.)***  
– русский ученый,  
**основатель современного  
научного почвоведения и  
комплексного  
исследования природы**

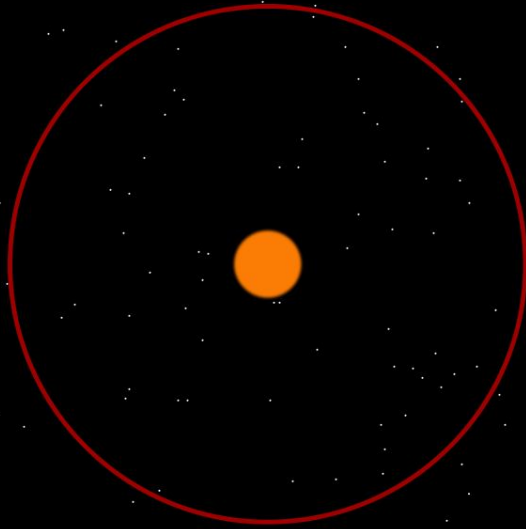
- ❑ **Погода** – мгновенное состояние атмосферы
- ❑ **Климатом** называется статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой «Океан-Суша-Атмосфера» за период в несколько десятилетий (~30 лет)
- ❑ Климат **НЕ ЯВЛЯЕТСЯ** некоторым устойчивым средним состоянием, флуктуации которого - второстепенные характеристики
- ❑ Климат подвержен хаотичной изменчивости



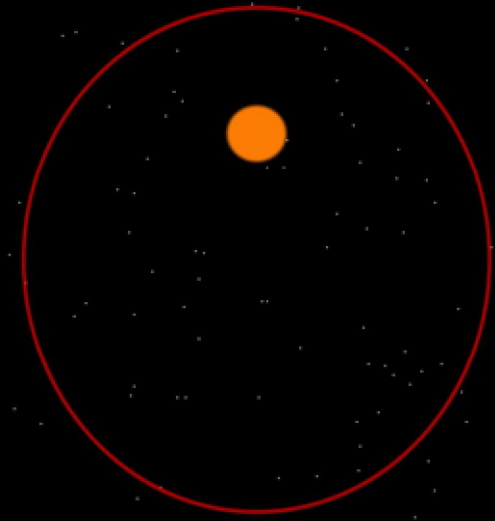
"Does the  
Flap of a  
Butterfly's  
Wings in  
Brazil Set  
Off a  
Tornado in  
Texas?"



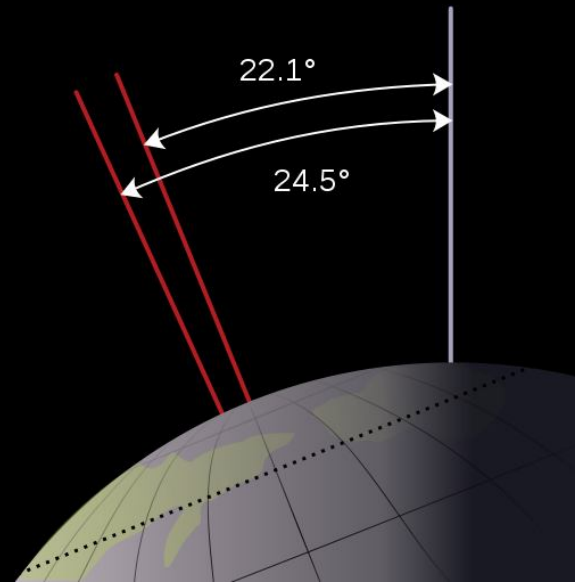
*Эдвард Нортон Лоренц*  
(1917-2008) —  
американский математик  
и метеоролог, один из  
основоположников теории  
хаоса, автор эффекта  
бабочки, аттрактора  
Лоренца



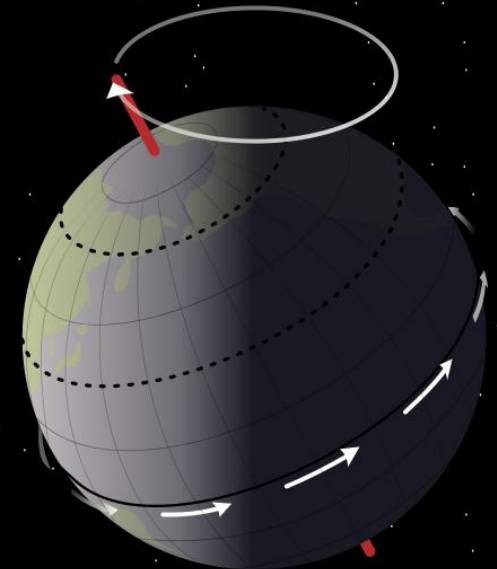
**Эксцентриситет орбиты:  
0.0007-0.0658 с периодами  
100 и 400 тыс. лет**

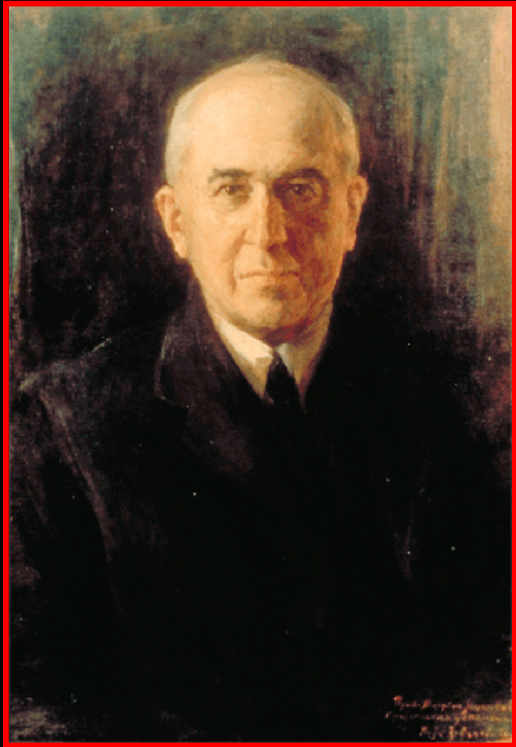


**Наклон земной оси:  
22.1°-24.5° с периодом  
41 тыс. лет**



**Прецессия: 23 тыс. лет  
(климатическая прецессия – вариации  
направления оси вращения Земли  
относительно плоскости орбиты)**





*Милутин Миланкович*  
(1879-1958 гг.)  
сербский математик,  
создавший  
математическую  
теорию климата

## Циклы Миланковича

1. Эксцентриситет орбиты:  
0.0007-0.0658 с периодами  
100 и 400 тыс. лет
2. Наклон земной оси:  $22.1^{\circ}$ - $24.5^{\circ}$  с  
периодом 41 тыс. лет
3. Прецессия: 23 тыс. лет  
(климатическая прецессия –  
вариации направления оси  
вращения Земли относительно  
плоскости орбиты)

$$Q(\varphi) = \text{"Экцентриситет"} + \text{"Наклон оси"} + \text{"Прецессия"}$$

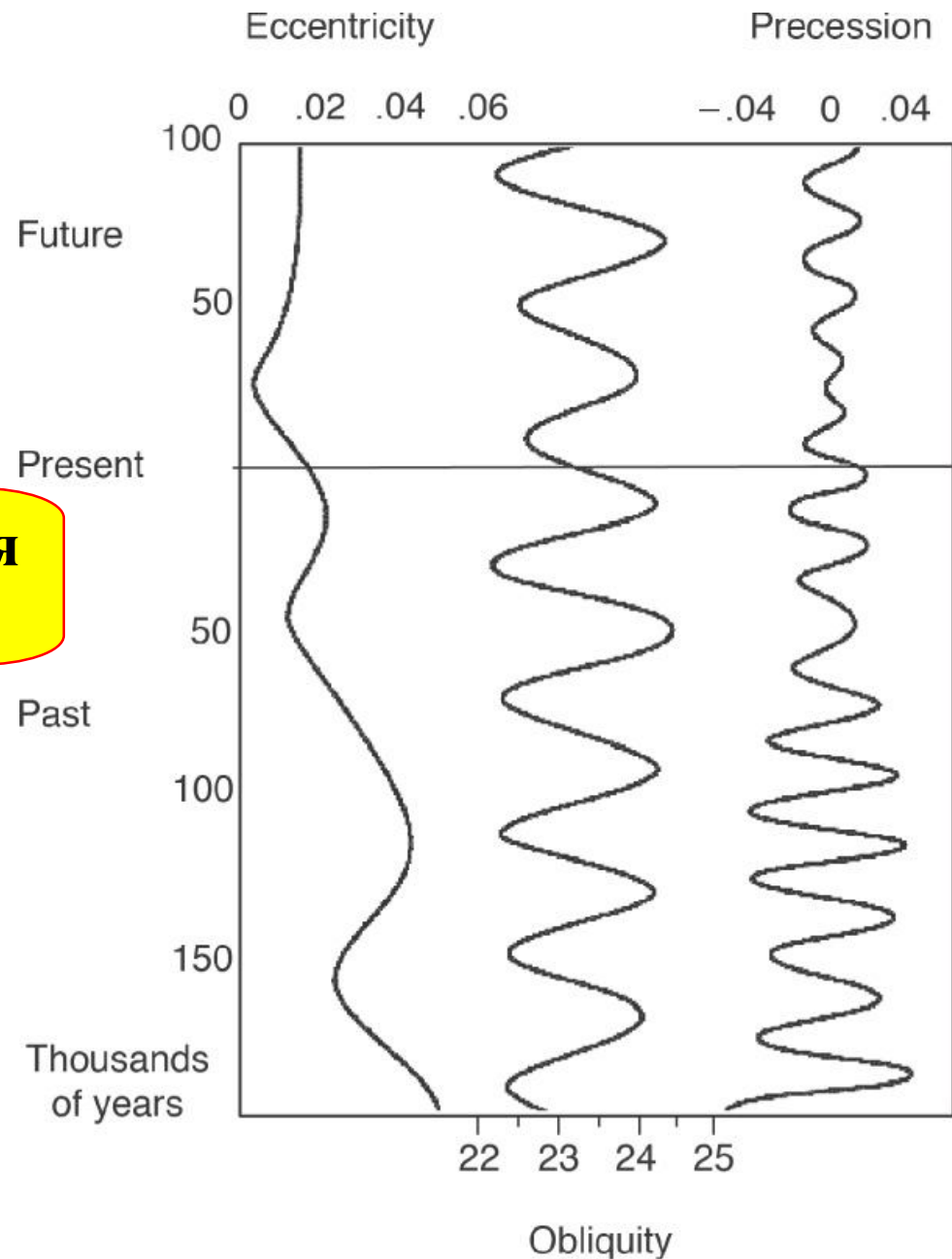
**средняя  
инсоляция на  
широте  $\varphi$**

$\varphi_1(t)$

**эквивалентная  
широта**

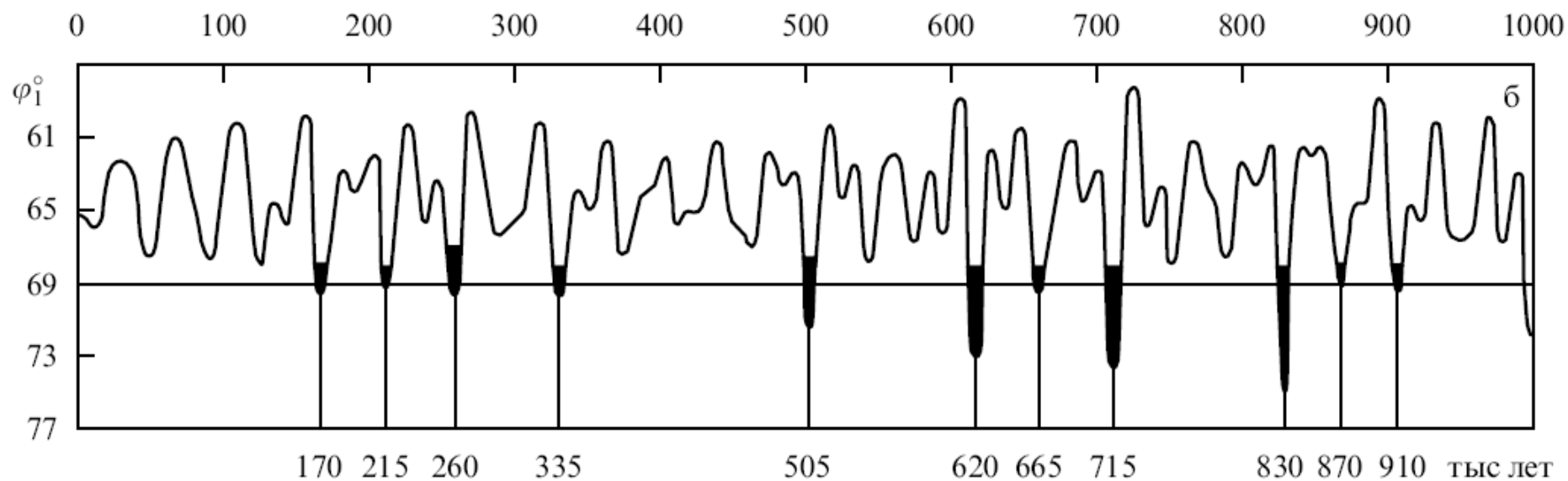
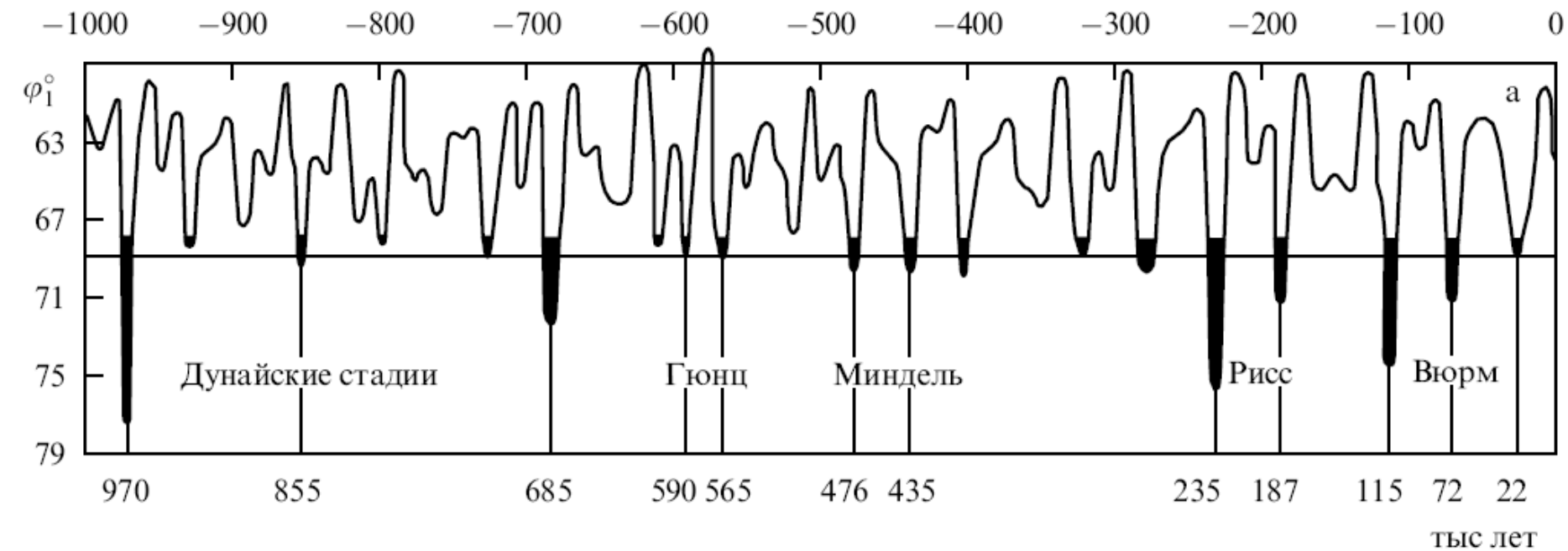
**астрономическая  
эпоха**

$$Q(\varphi_1(t)) = Q(\varphi)$$



(From Berger and Loutre, (1992).)

# Расчет вариаций «эквивалентной широты» ( $65^{\circ}\text{N}$ ) за 1 млн. лет



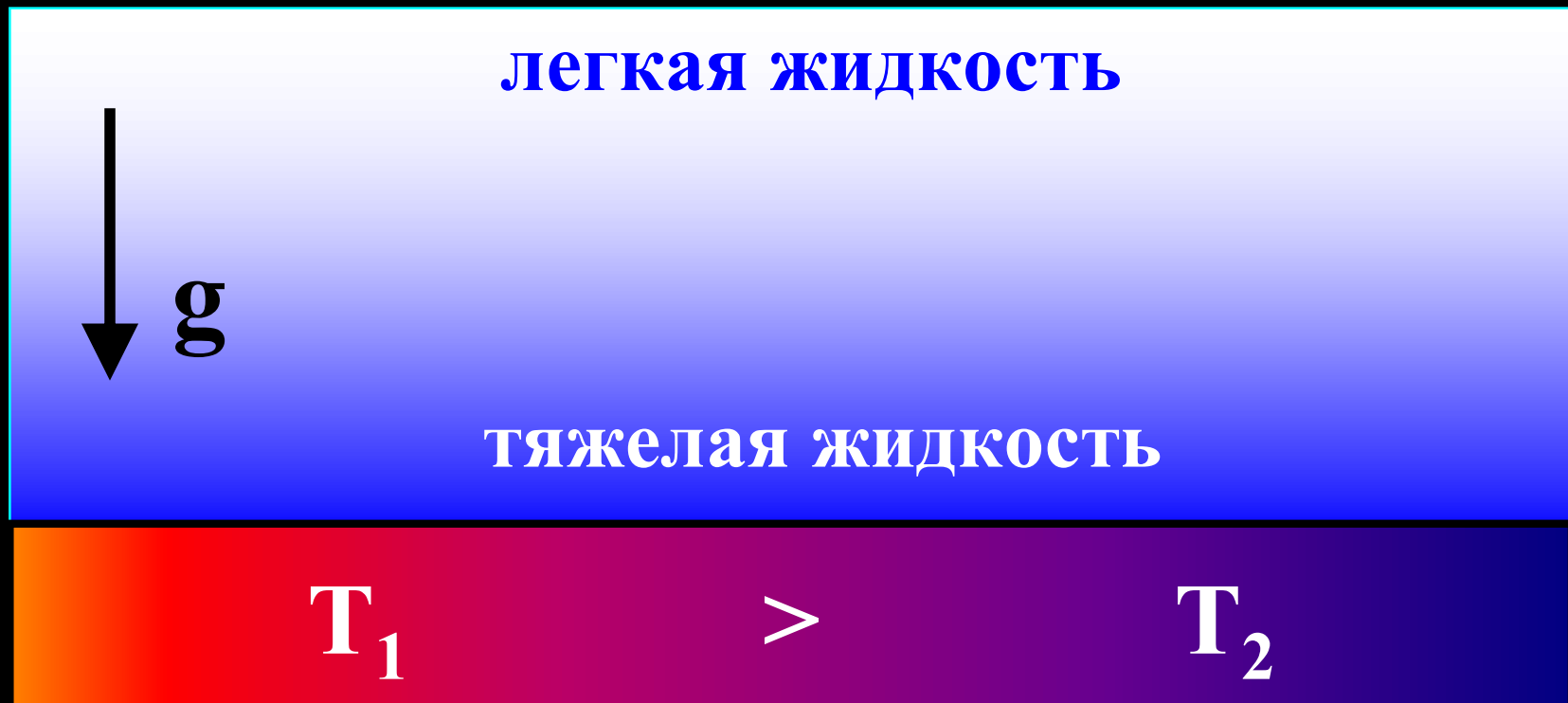


**Элементы  
геофизической  
гидродинамики**



баротропная  
жидкость

$$\rho = \rho(p)$$

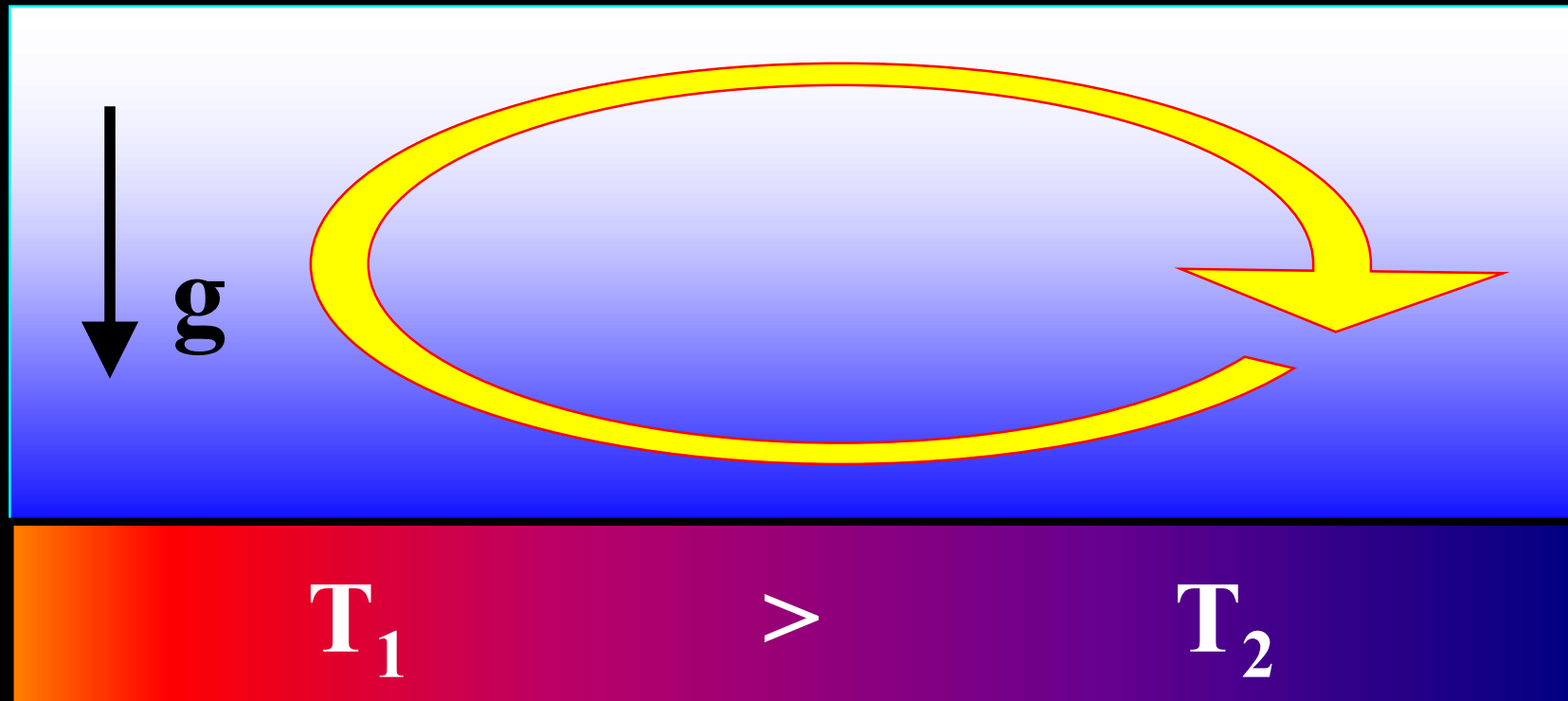


**В баротропной жидкости (газе) температурные градиенты не приводят к возникновению течений!**

реальные атмосфера и океан

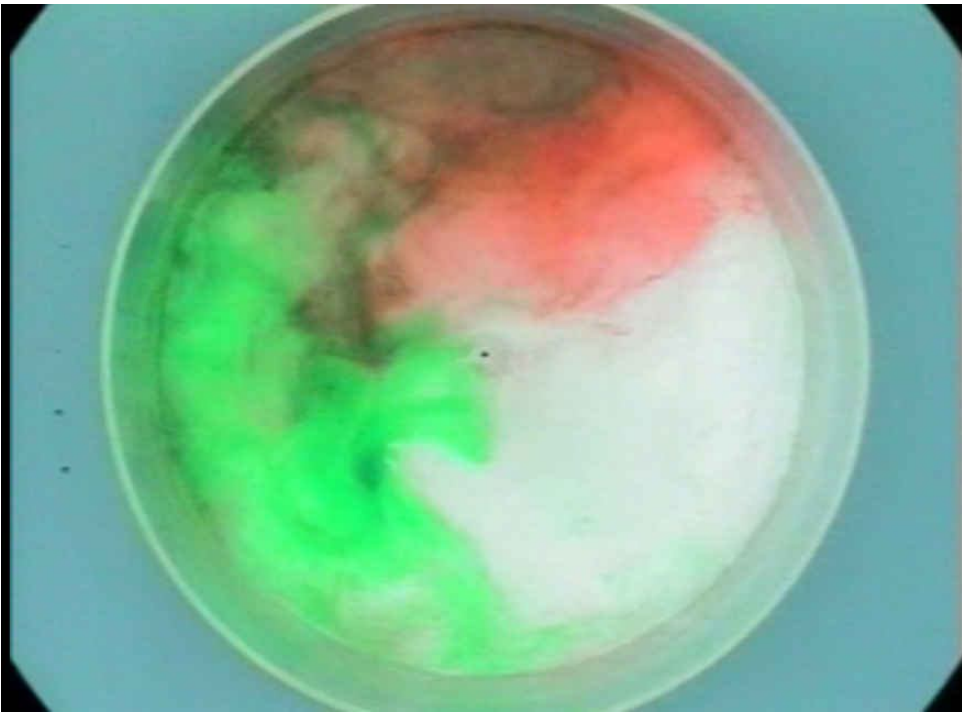
бароклинная  
жидкость

$$\rho = \rho(p, T, \dots)$$



В бароклинной жидкости (газе) температурные градиенты приводят к возникновению течений!

# Влияние вращения Земли





**Gaspard-Gustave de Coriolis**  
**French, Mathematics, Physics**  
**1792-1843**

$$\mathbf{F}_{\text{Kop}} = 2m[\vec{v} \times \vec{\omega}]$$

**Геофизическая гидродинамика –  
динамика бароклинной жидкости (газа)  
в поле силы тяжести на неравномерно  
прогретой, вращающейся сфере (геоиде)**

---

**Большинство крупномасштабных течений атмосферы  
и гидросферы происходят в условиях баланса сил:**

**по вертикали:**

**гидростатический баланс**

*сила градиента давления = сила тяжести*

**по горизонтали:**

**геострофический баланс**

*сила градиента давления = сила Кориолиса*

# Уравнение состояния

$$\rho = \rho(p, T, \dots)$$

парциальное давление  
водяного пара

**воздух**

$$\rho = \rho(p, T, e)$$

соленость

**вода**

$$\rho = \rho(p, T, s)$$

## Уравнение состояния воздуха

$$p = \frac{m}{V} \frac{R}{\mu} T = \rho \frac{R}{\mu} T \equiv \rho R_a T$$

$$R_a \equiv \frac{R}{\mu} = \frac{8.31 \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{МОЛЬ}} \right]}{0.029 \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} \right]} \approx 287 \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{КГ}} \right]$$

$$p = \rho R_a T \Rightarrow \rho = \frac{p}{R_a T}$$

**Уравнение состояния  
СУХОГО воздуха**

при Н.У.

$$p = 101325 \text{ Па}$$

$$T = 273.16 \text{ К}$$

$$\left. \begin{array}{l} p = 101325 \text{ Па} \\ T = 273.16 \text{ К} \end{array} \right\} \Rightarrow \rho \approx 1.29 \text{ кг / м}^3$$



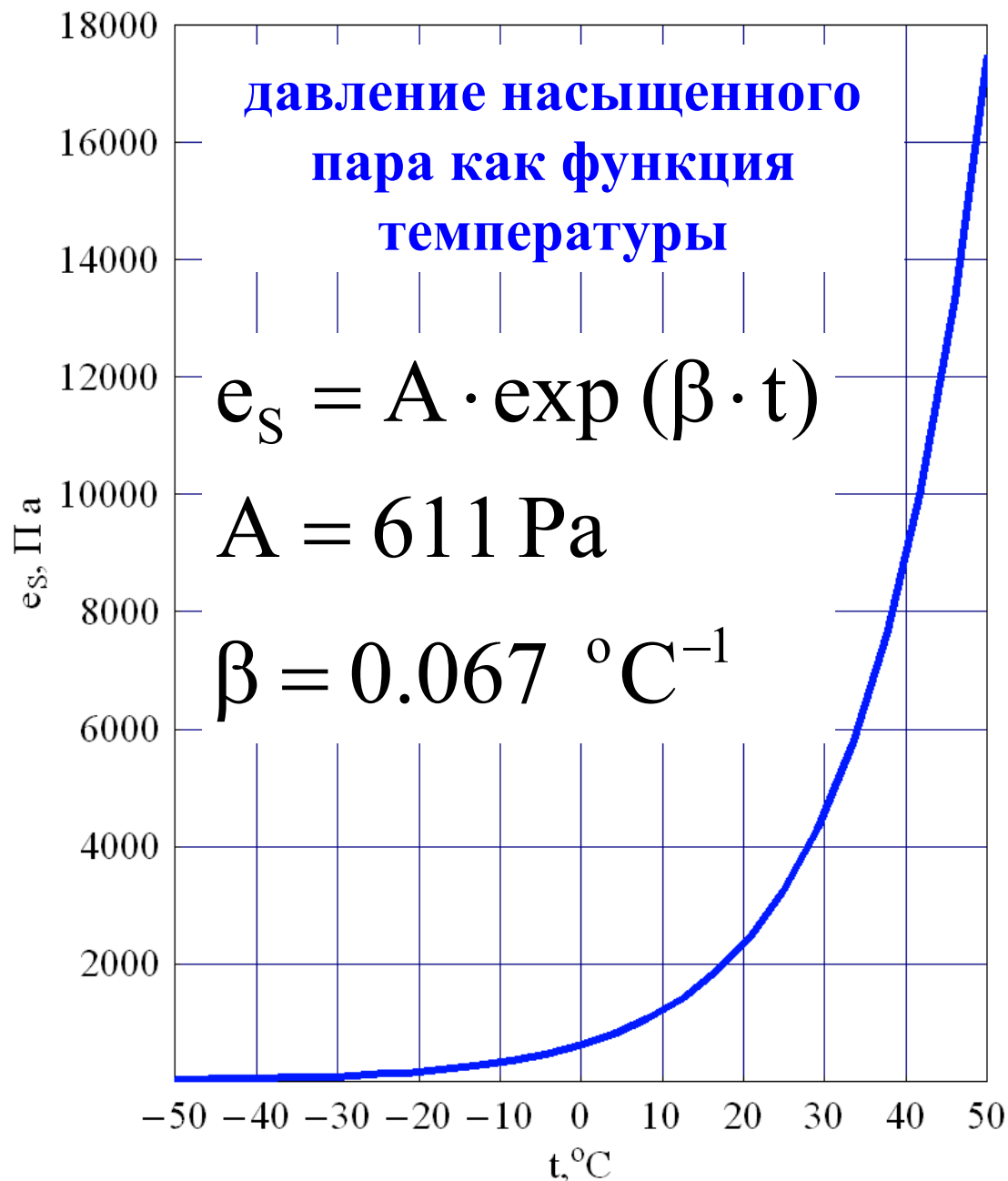
$$p_a = \rho_a R_a T \quad \text{водяной пар} \quad e = \rho_w R_w T$$

$$\rho = \rho_a + \rho_w = \frac{p_a}{R_a T} + \frac{e}{R_w T} = \frac{p - e}{R_a T} + \frac{e}{R_w T}$$

Уравнение состояния влажного воздуха

$$\rho = \frac{p}{R_a T} \left( 1 - \frac{e}{p} \left[ 1 - \frac{R_a}{R_w} \right] \right) \approx \frac{p}{R_a T} \left( 1 - 0.38 \frac{e}{p} \right)$$

$$e \sim 10^3 \text{ Па} \quad \Rightarrow \quad \frac{e}{p} \ll 1$$



- ❑ Концентрация пара резко падает с высотой
- ❑ В высоких широтах воздух менее влажный чем в тропиках
- ❑ Осадки – концентрация пара, поднятого на высоту конвекцией
- ❑ Содержание пара в атмосфере Земли варьировалось в прошлом в соответствии с ходом температуры

# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №5

---

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

**Элементы  
геофизической  
гидродинамики**

# Уравнение состояния

$$\rho = \rho(p, T, \dots)$$

парциальное давление  
водяного пара

**воздух**

$$\rho = \rho(p, T, e)$$

соленость

**вода**

$$\rho = \rho(p, T, s)$$

# Уравнение состояния морской воды

$$\rho = \rho(p, T, s)$$

$$\rho = 1 + 10^{-3} (\varepsilon_1 s + \varepsilon_2 T - \varepsilon_3 s T - \varepsilon_4 T^2 + \varepsilon_5 p) \quad [\text{г/см}^3]$$

$$\varepsilon_1 = 0.82$$

$$\varepsilon_2 = 0.0689 \quad s \quad [^{\circ}/_{\infty}]$$

$$\varepsilon_3 = 0.0039 \quad T \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\varepsilon_4 = 0.00918 \quad p \quad [\text{дбар}]$$

$$\varepsilon_5 = 4.5 \cdot 10^{-3}$$

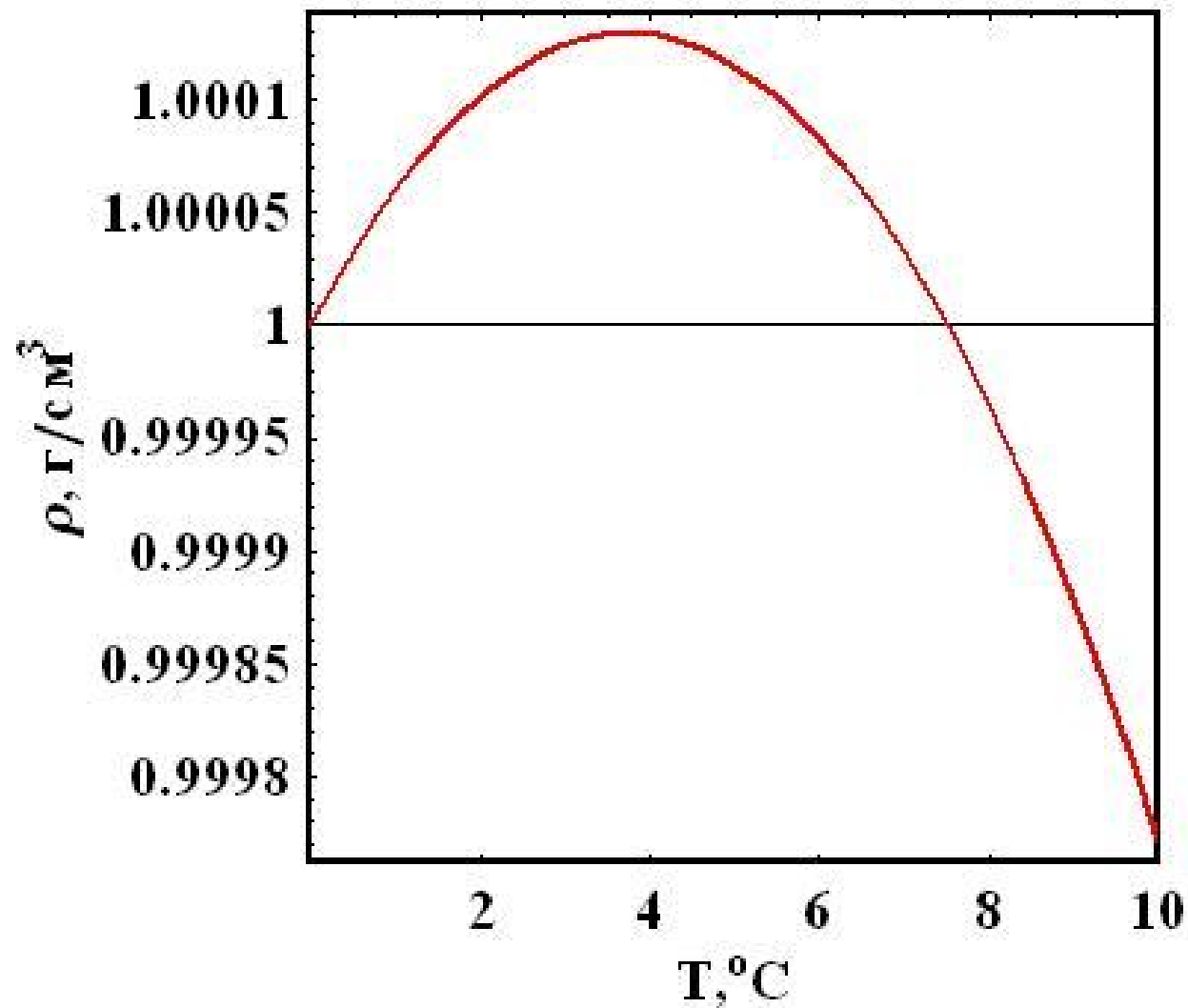
# Уравнение состояния морской воды

$$\rho = \rho(p, T, s)$$

Уравнение Чена-Миллеро содержит **48 (!!!)**  
эмпирических констант

**The International Thermodynamic  
Equation of Seawater – 2010 (TEOS-10)**

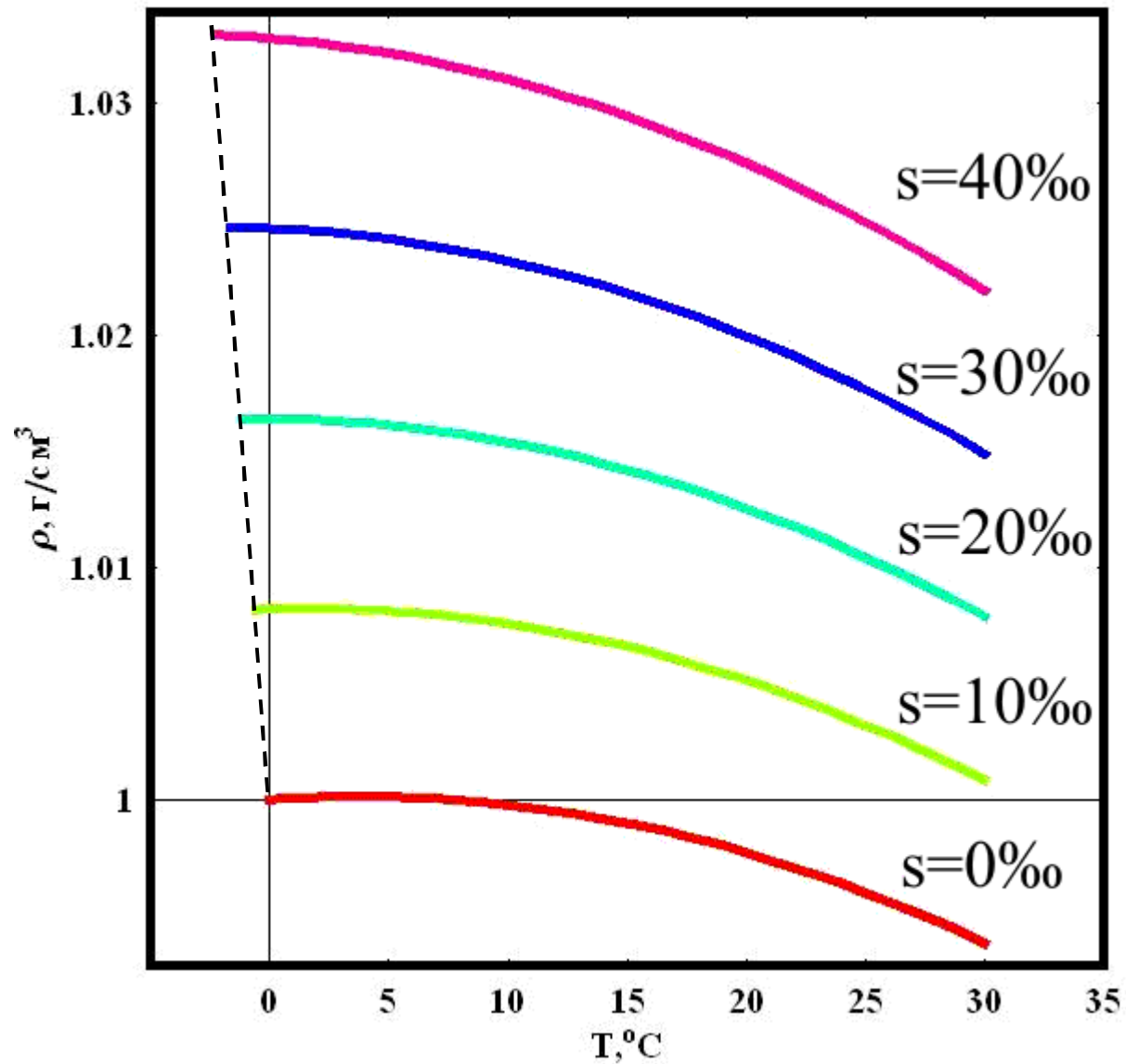
**[www.teos-10.org](http://www.teos-10.org)**



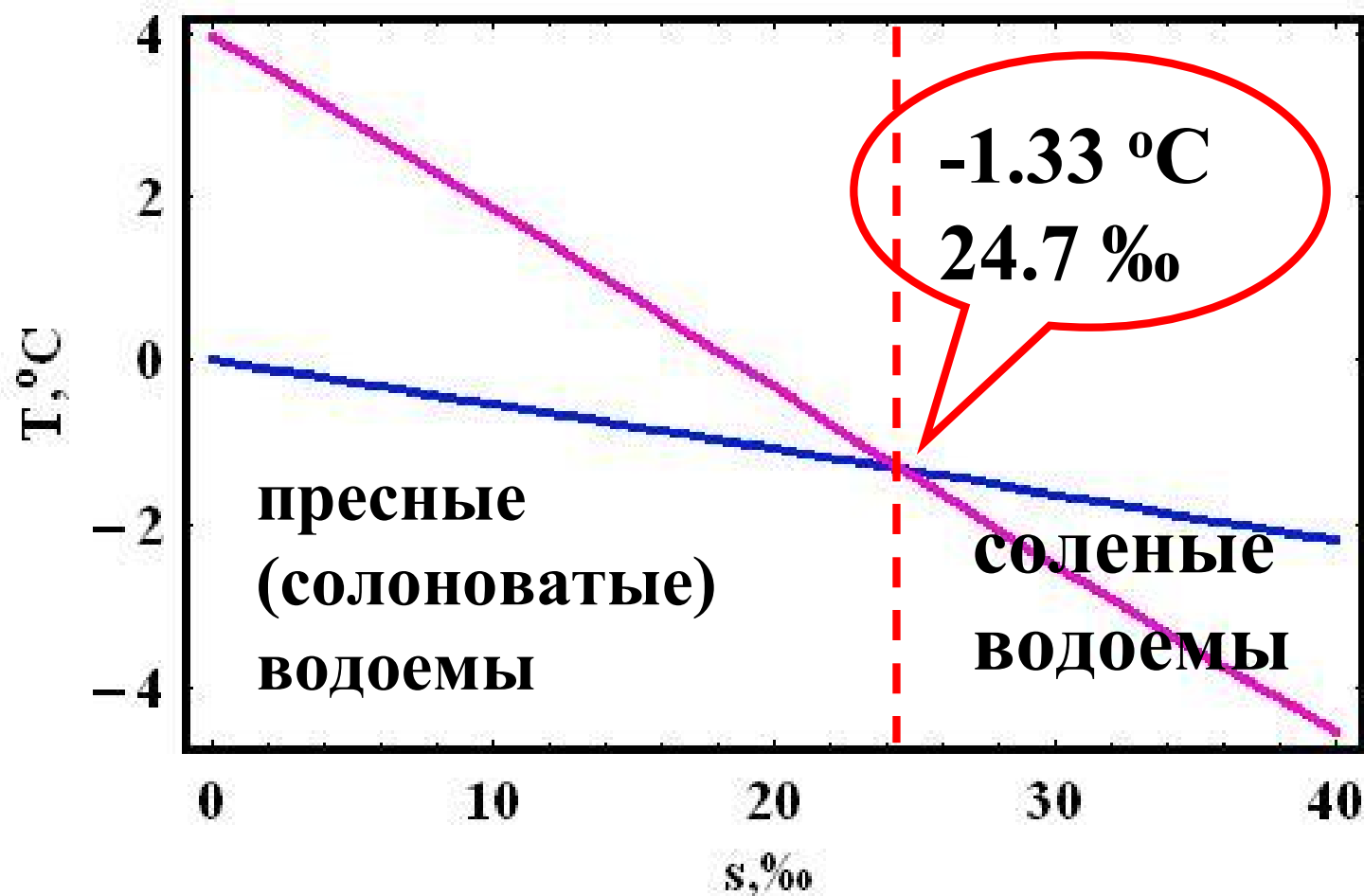
**у пресных (солонватых) вод существует «температура максимальной плотности»**



# Плотность морской воды как функция температуры и солёности



# Температура замерзания и максимальной плотности как функция солености



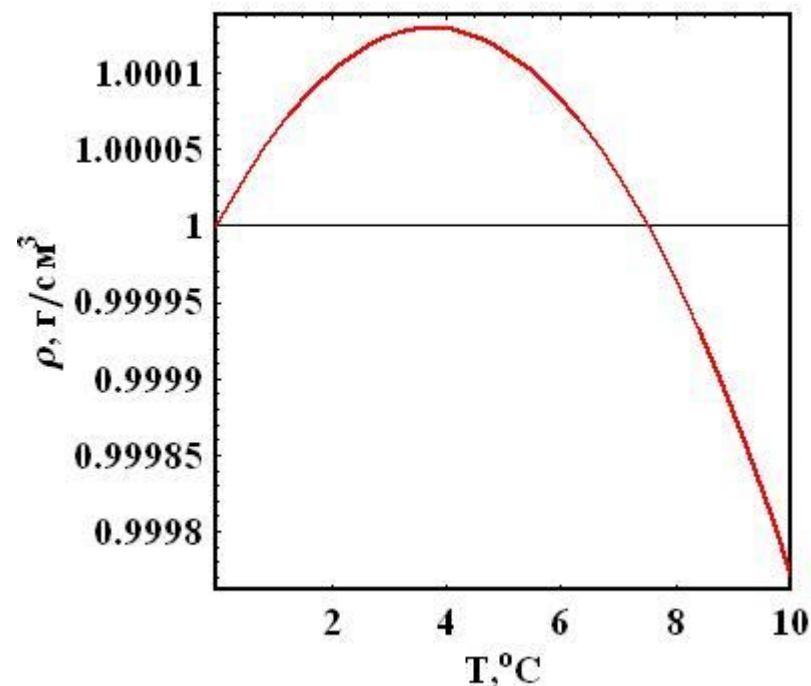
# Уникальные свойства воды

**ПЛОТНОСТЬ ЛЬДА < ПЛОТНОСТИ ВОДЫ**

**917 кг/м<sup>3</sup>**

**999.8 кг/м<sup>3</sup>**

**существование  
температуры  
максимальной  
плотности у пресных  
(солонватых) вод**



# Уникальные свойства воды

стабилизируют  
климат Земли

## Высокие значения:

теплоемкости

4 186 Дж/кг К

теплота плавления

332 400 Дж/кг

теплота парообразования

2 256 200 Дж/кг

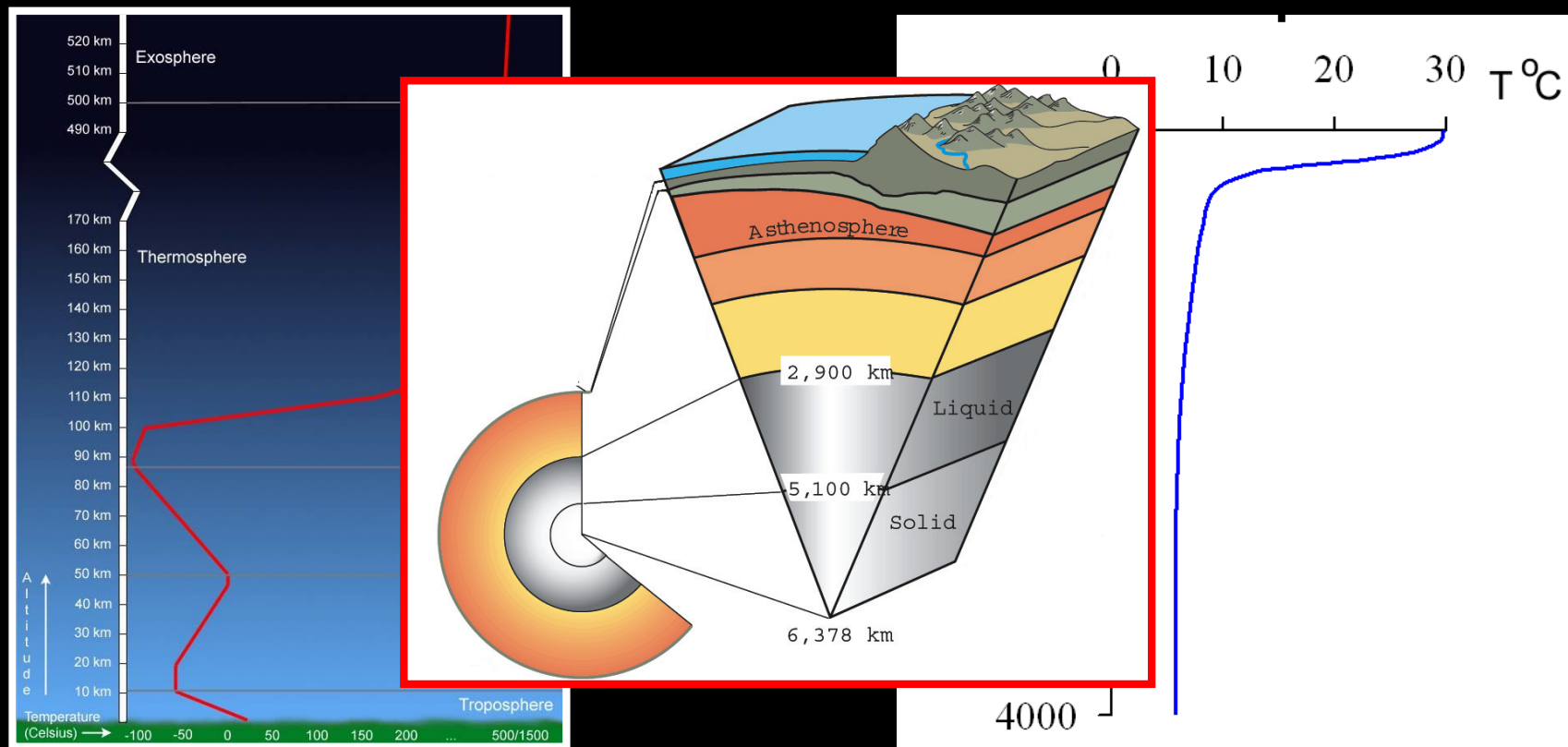
- ❑ Вода – эффективный растворитель
- ❑ На Земле вода встречается в трех фазах
- ❑ Широкий диапазон существования жидкой фазы

# **Устойчивость стратификации**

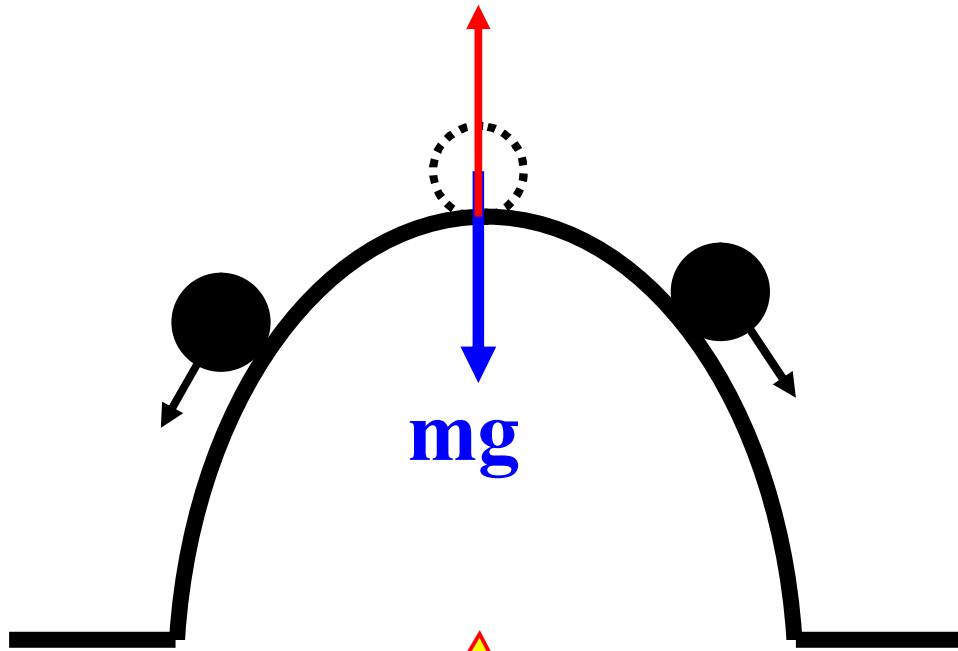
# Стратификация –

(лат. *stratum* настил слой+ *facere* делать)

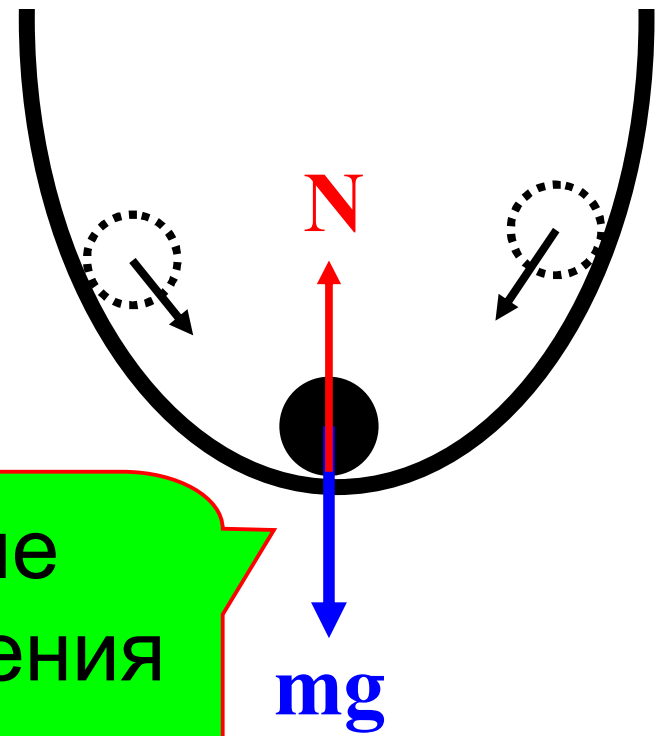
распределение по вертикали слоев воды или воздуха с различной плотностью, температурой, соленостью, etc.



# **N** Устойчивость



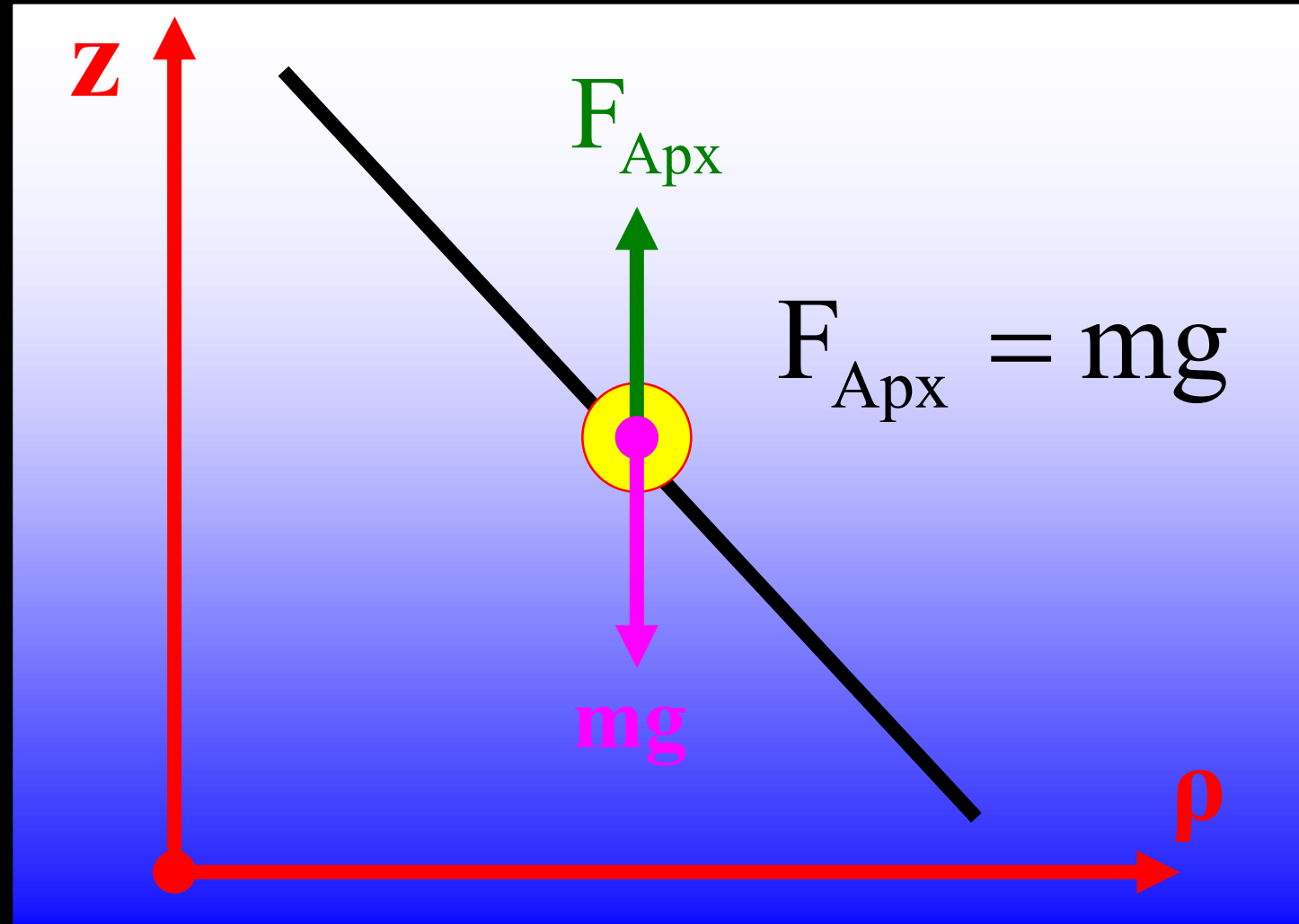
Малые  
возмущения  
нарастают со  
временем



Малые  
возмущения  
затухают

$$\frac{\partial}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial}{\partial y} = 0$$

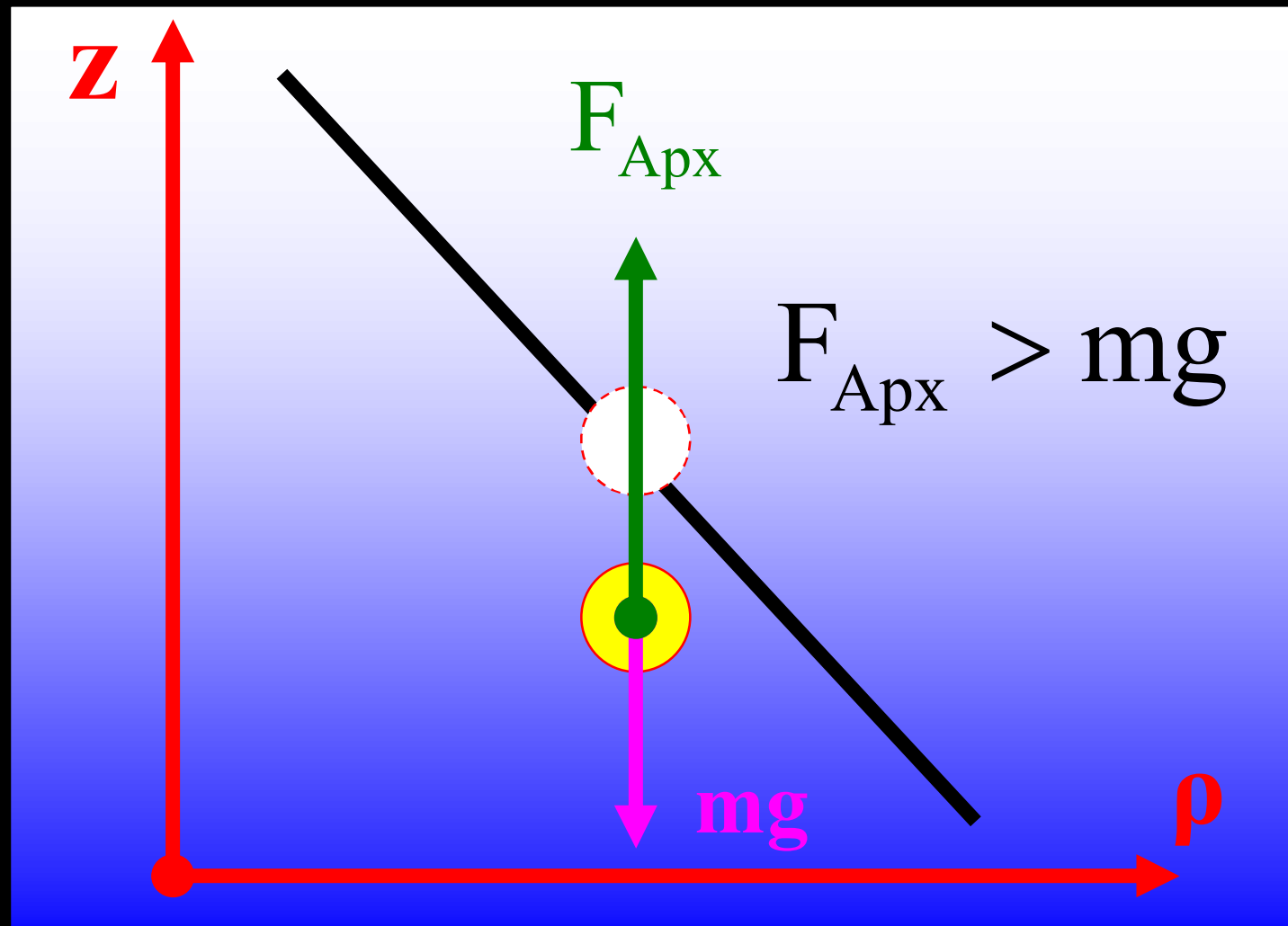
$\rho$





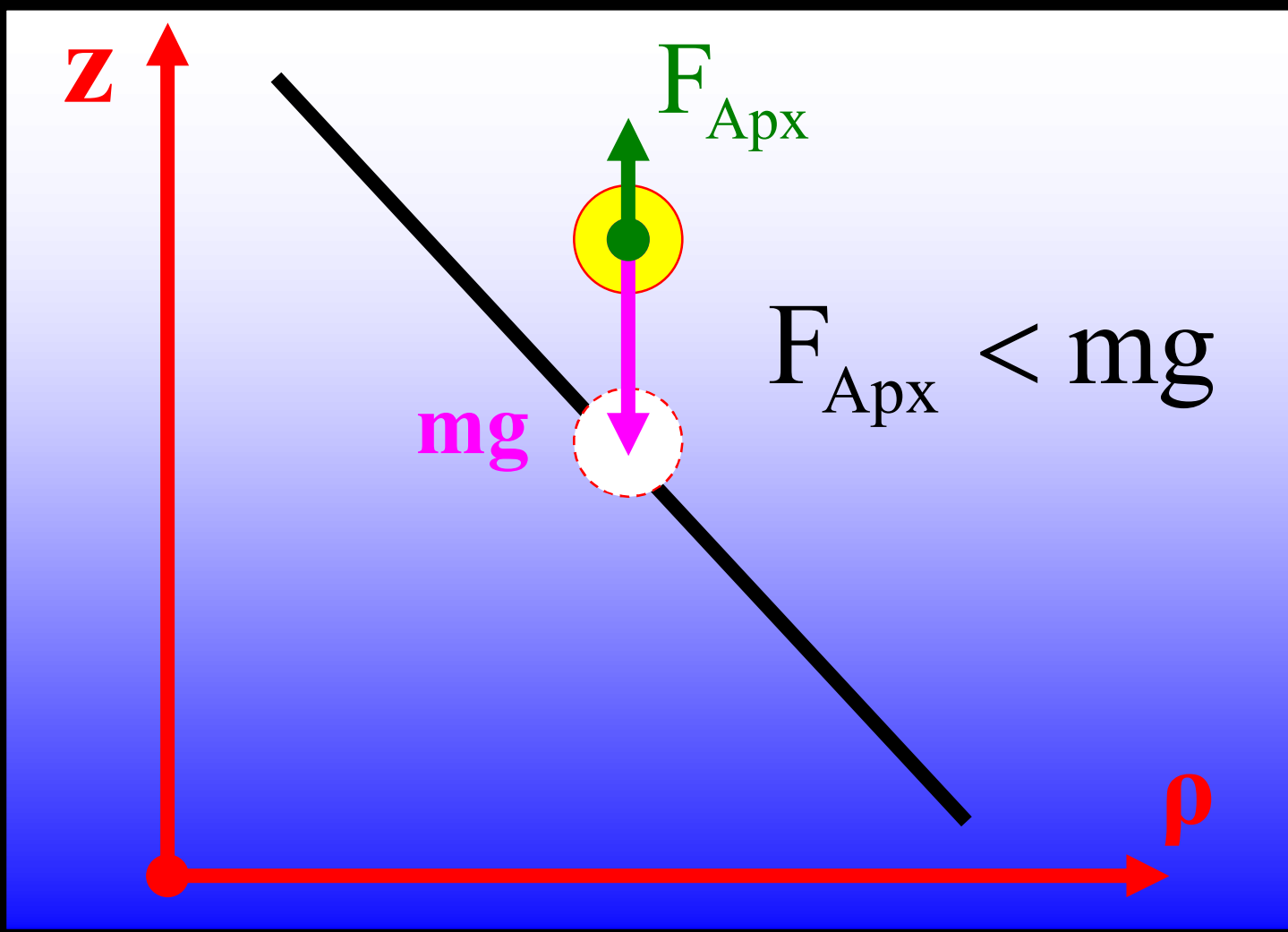
Разница сил возвращает частицу  
в исходное положение

$\rho$

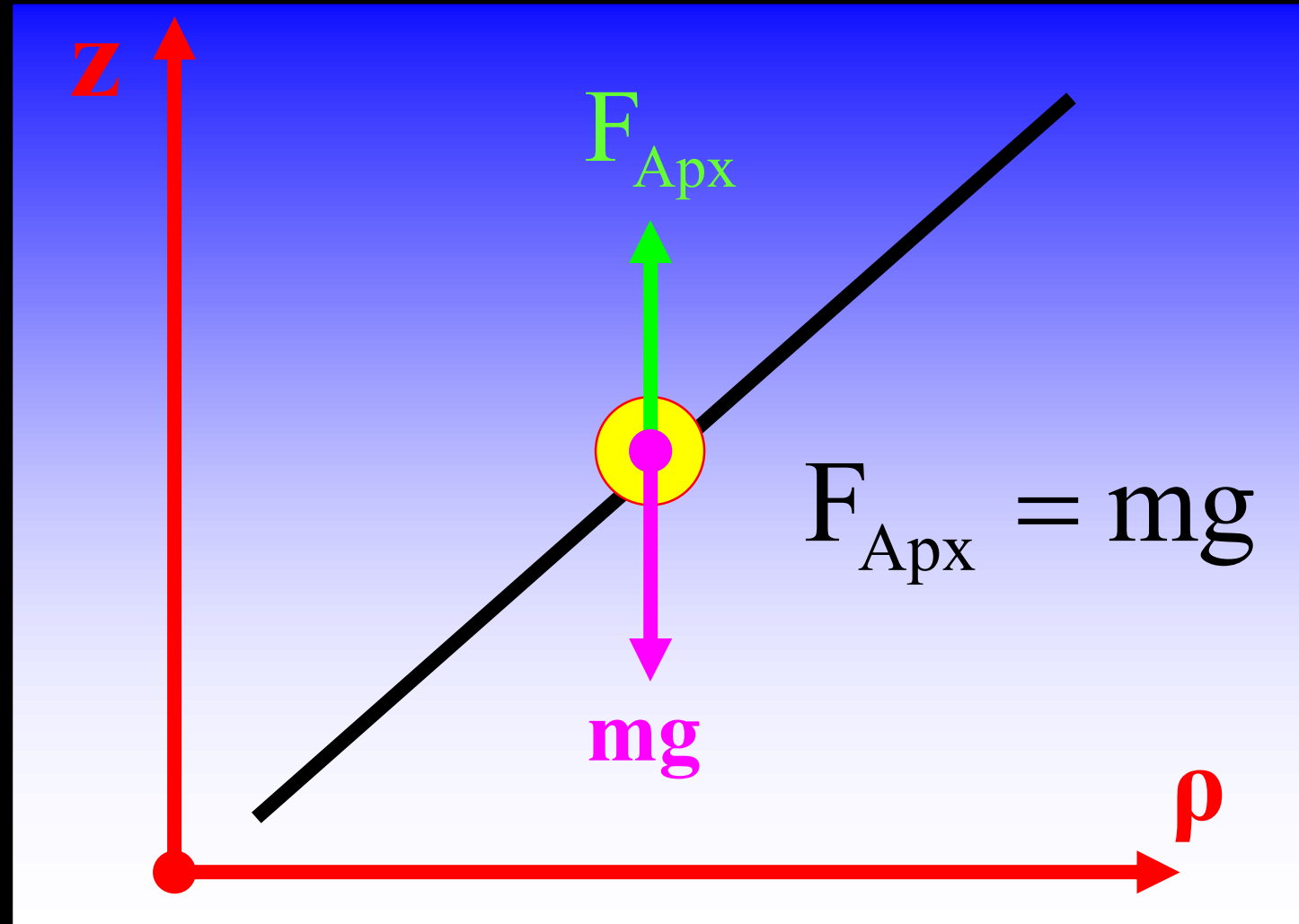


Разница сил возвращает частицу  
в исходное положение

$\rho$

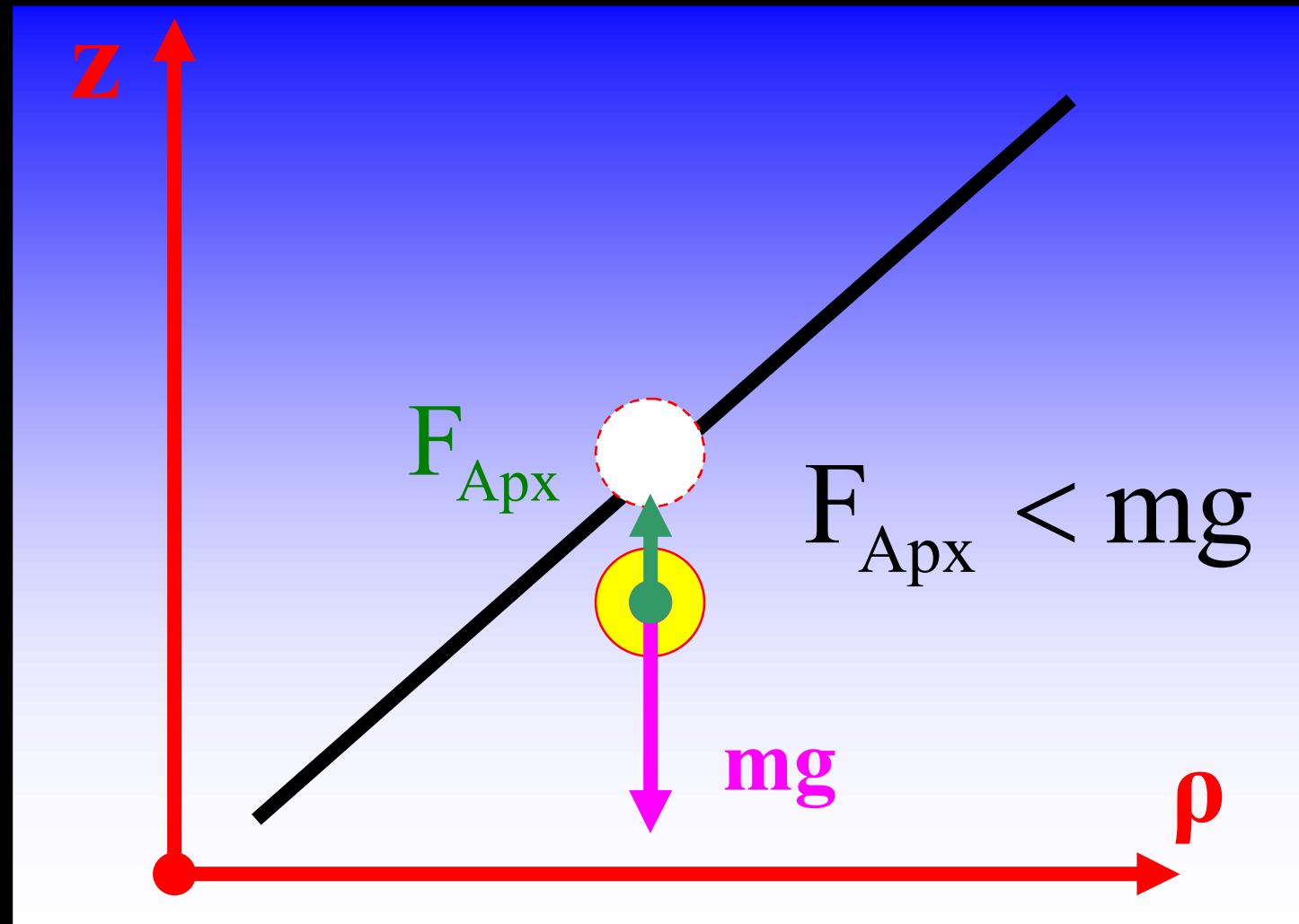


$g$



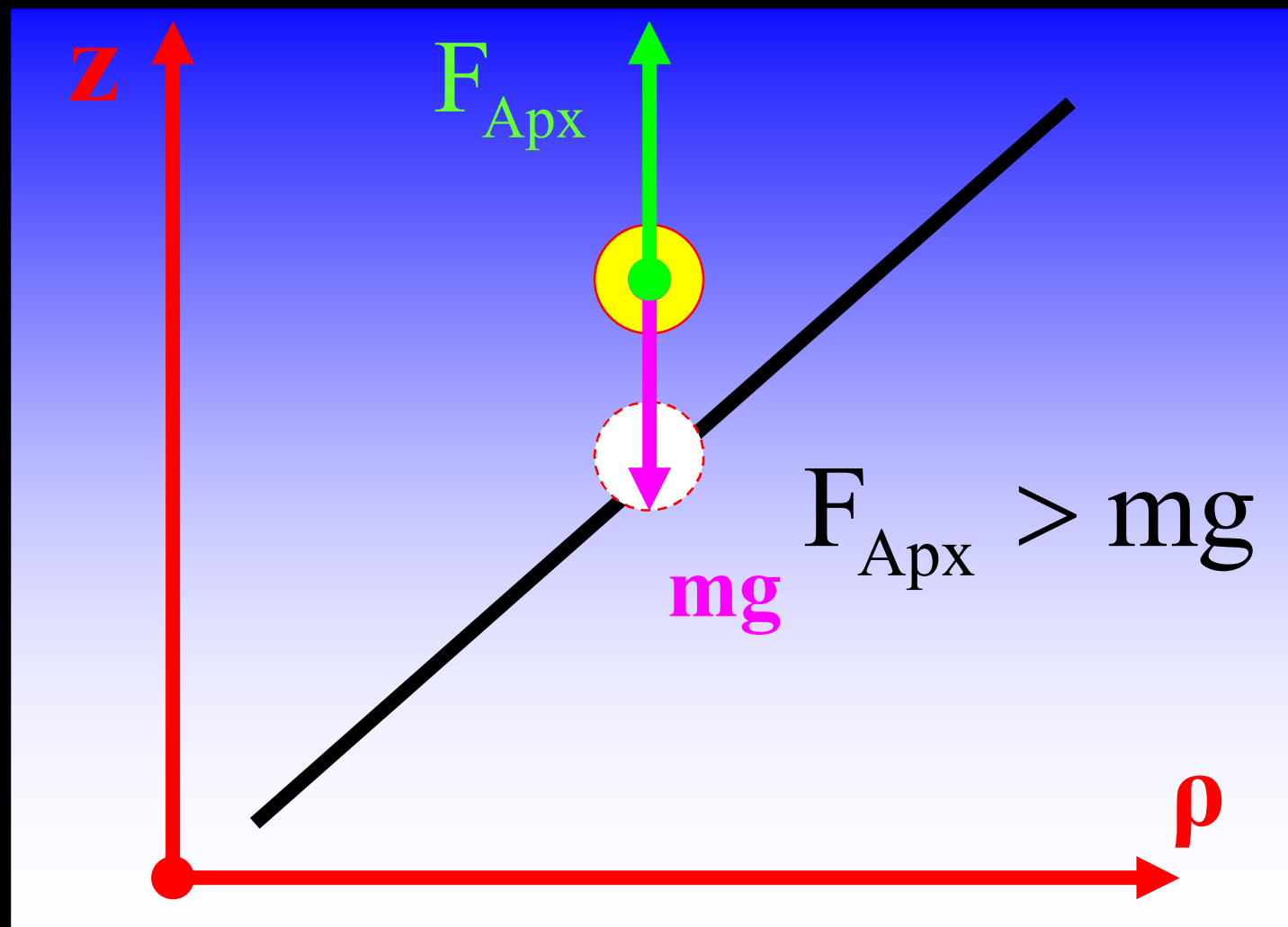
Разница сил способствует удалению  
частицы от положения равновесия

$\rho$

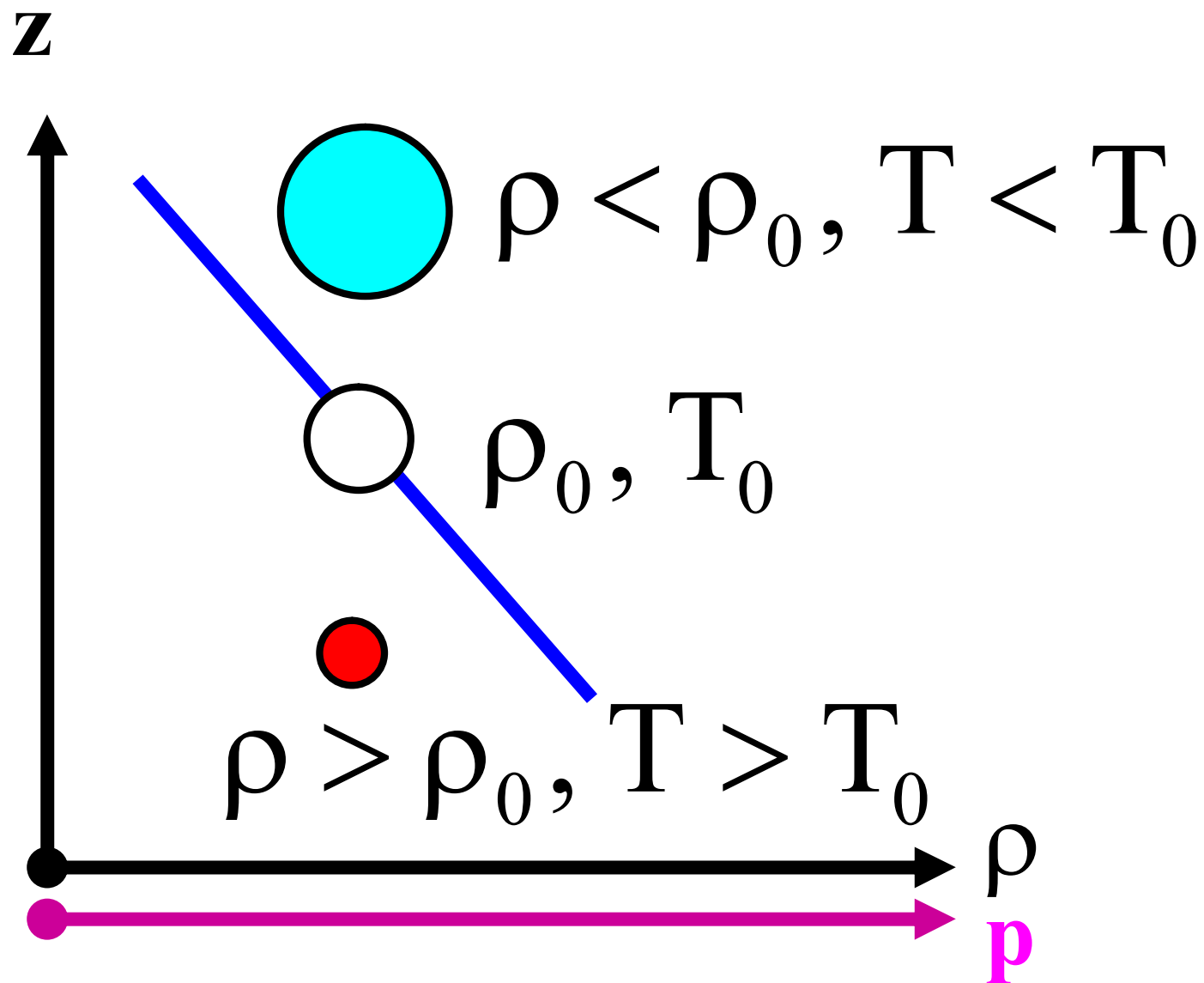


Разница сил способствует удалению  
частицы от положения равновесия

$\omega$



# Нейтральное состояние



## Нейтральное состояние

$$\left. \frac{d\rho}{dz} \right|_{\text{нейтр}} = \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s = \left( \frac{d\rho(p(z))}{dz} \right)_s = \left( \frac{d\rho}{dp} \right)_s \frac{dp}{dz}$$

$$\left( \frac{d\rho}{dp} \right)_s$$

$$= \frac{1}{c^2}$$

**скорость  
звука**

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

$$\left. \frac{d\rho}{dz} \right|_{\text{нейтр}} = -\frac{\rho g}{c^2}$$

**закон  
гидростатики**

# Критерий устойчивости

**устойчивое  
состояние**

$$\frac{d\rho}{dz} < \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

**нейтральное  
состояние**

$$\frac{d\rho}{dz} = \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

**неустойчивое  
состояние**

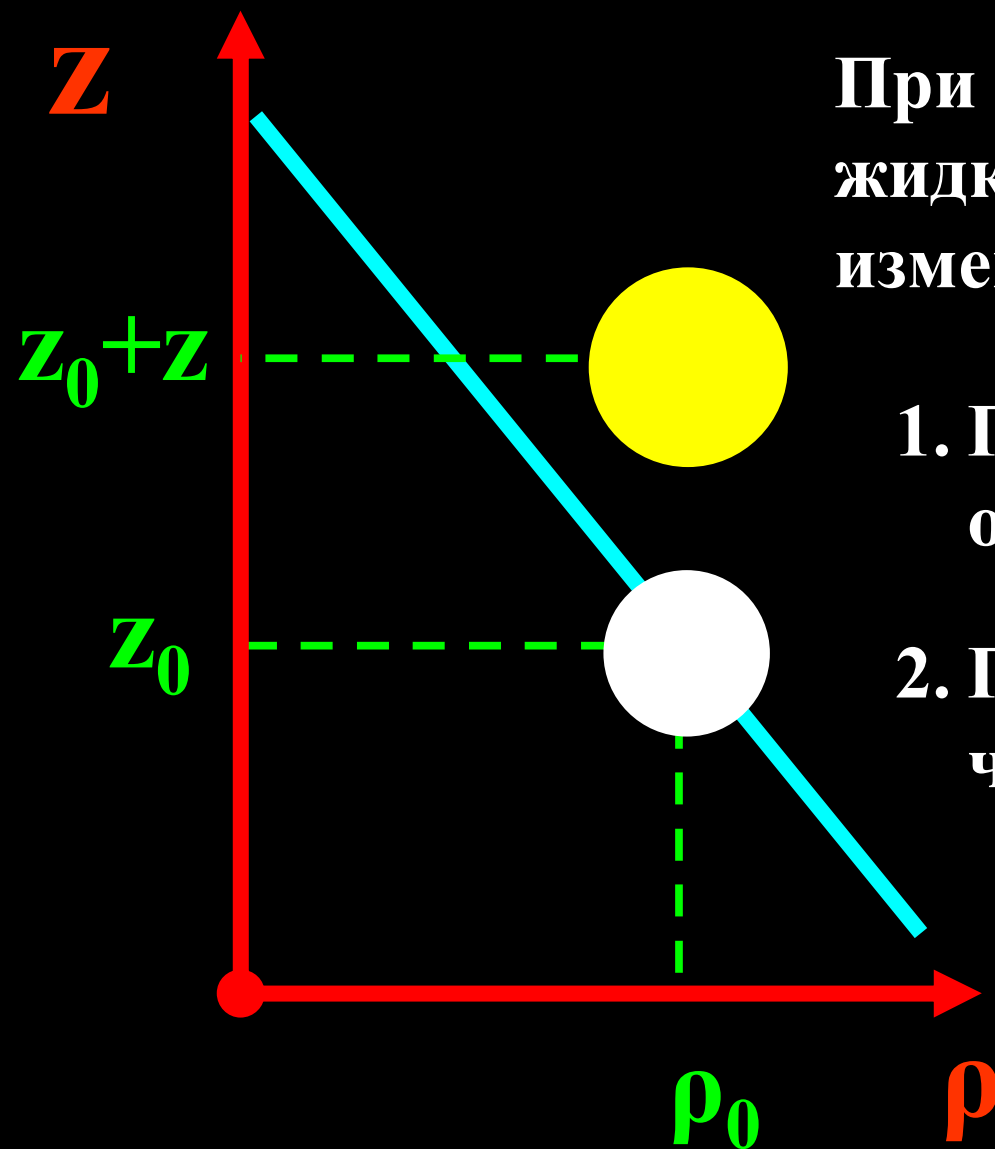
$$\frac{d\rho}{dz} > \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

$$\left. \frac{d\rho}{dz} \right|_{\text{нейтр}} = -\frac{\rho g}{c^2} \equiv \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

**адиабатический  
градиент**



# Частота малых колебаний устойчиво стратифицированной жидкости (газа)



При ее смещении частицы жидкости по вертикали на  $Z$  изменяются:

1. Плотность окружающей среды
2. Плотность самой частицы

$$m \ddot{z} = F_{\text{Арх}} - mg \quad dV = dx dy dz$$

$$\rho dV \ddot{z} = dV g (\rho_{\text{среды}} - \rho_{\text{частицы}})$$

$$\ddot{z} = g (\rho_{\text{среды}} - \rho_{\text{частицы}}) / \rho$$

$$\rho_{\text{среды}} = \rho_0 + \frac{d\rho}{dz} z \quad \rho_{\text{частицы}} = \rho_0 + \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s z$$

$$\ddot{z} - \frac{g}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dz} - \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s \right) z = 0$$

$$\ddot{z} - \frac{g}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dz} - \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s \right) z = 0$$

$$\ddot{z} + N^2 z = 0$$

**Частота  
Вяйсяля-  
Брента**

в океане / атмосфере

$$N \sim 10^{-4} - 10^{-1} \text{ Гц}$$

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dz} - \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s \right)$$

**или**

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dz} + \frac{\rho g}{c^2} \right)$$

$$\ddot{z} + N^2 z = 0 \quad N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dz} + \frac{\rho g}{c^2} \right)}$$

**N – действительная величина**

**Устойчивая  
стратификация**

$$z(t) = A \cdot \sin(N \cdot t) + B \cdot \cos(N \cdot t)$$

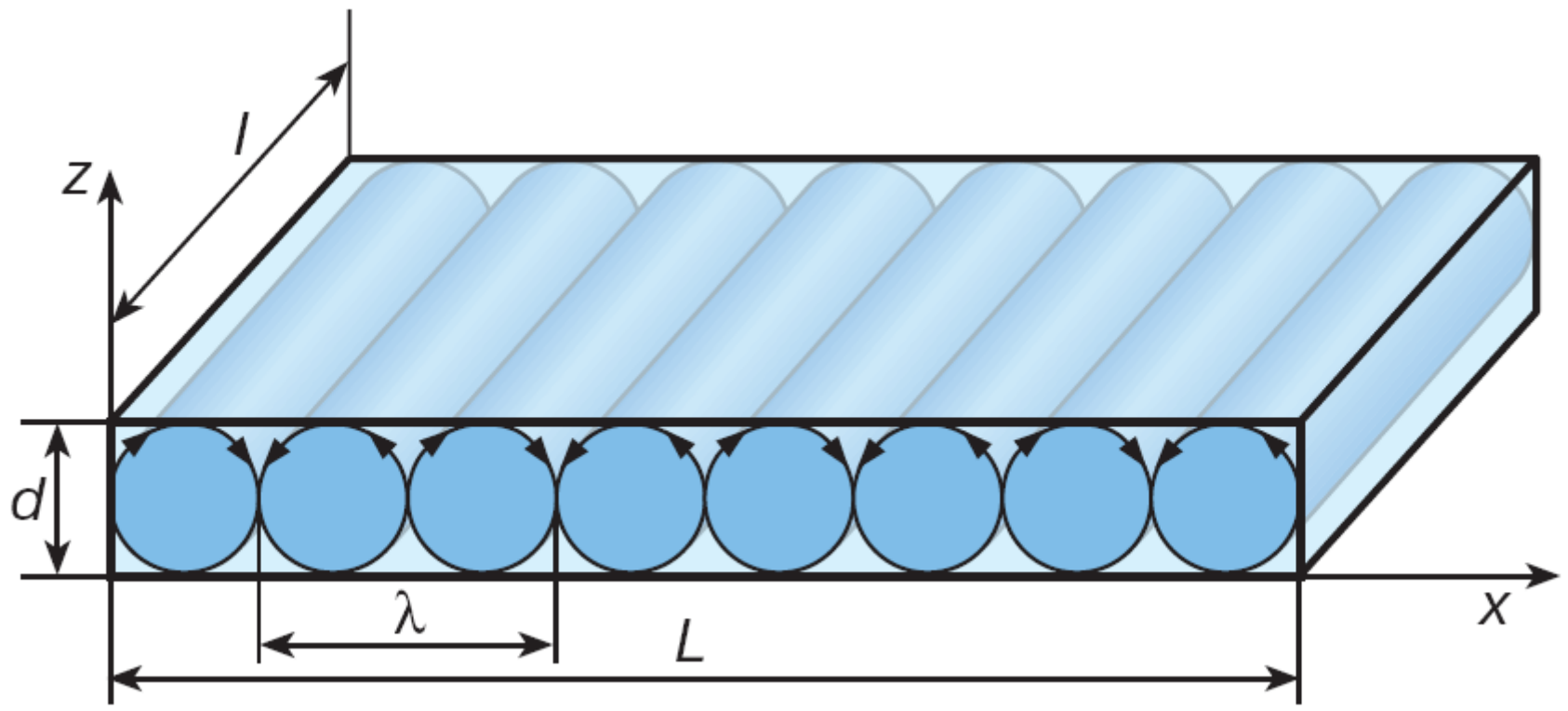
**N – мнимая величина**

**Неустойчивая  
стратификация**

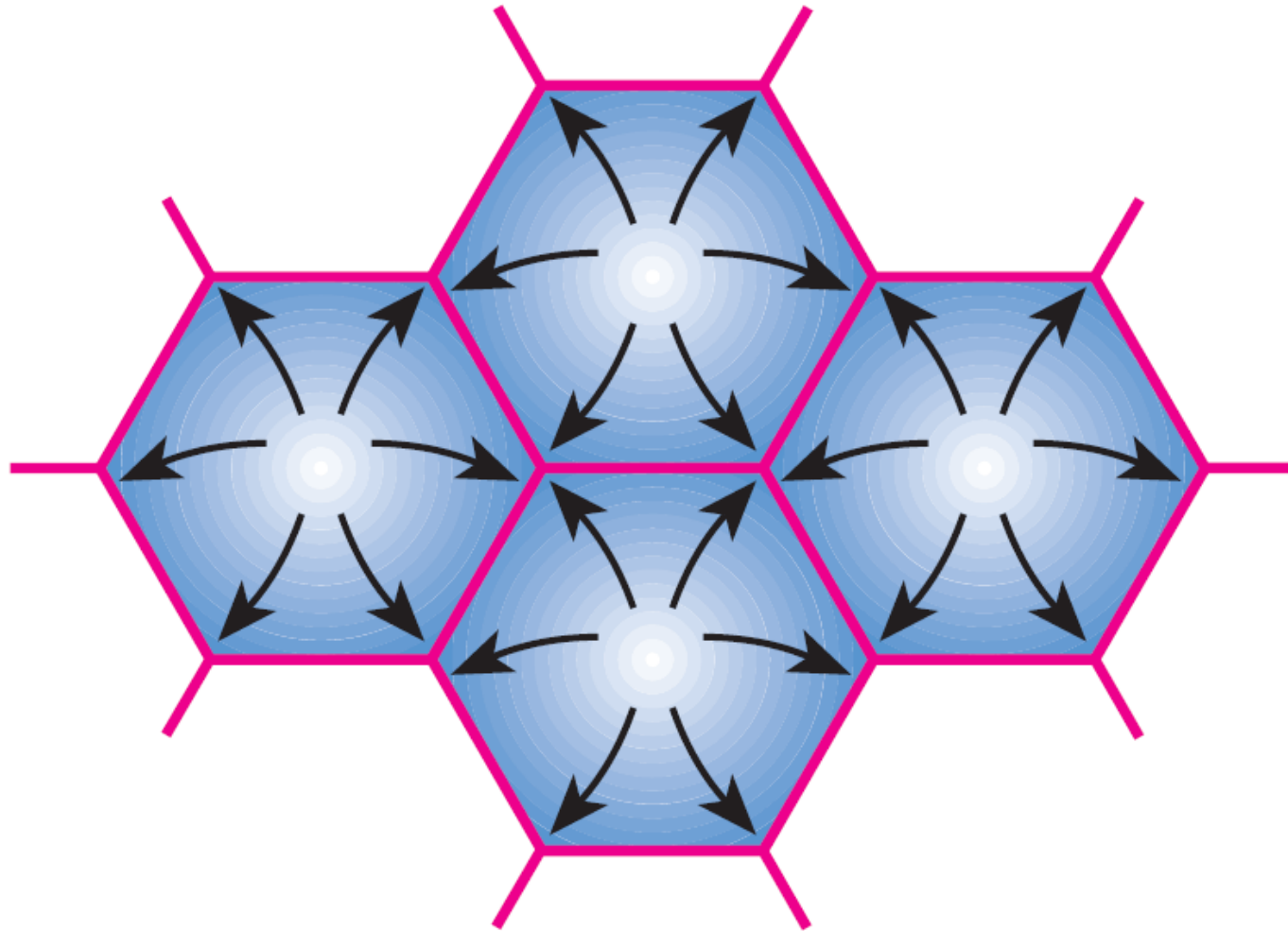
$$z(t) = A \cdot \exp(N \cdot t) + B \cdot \exp(-N \cdot t)$$

# **Термогравитационная конвекция**

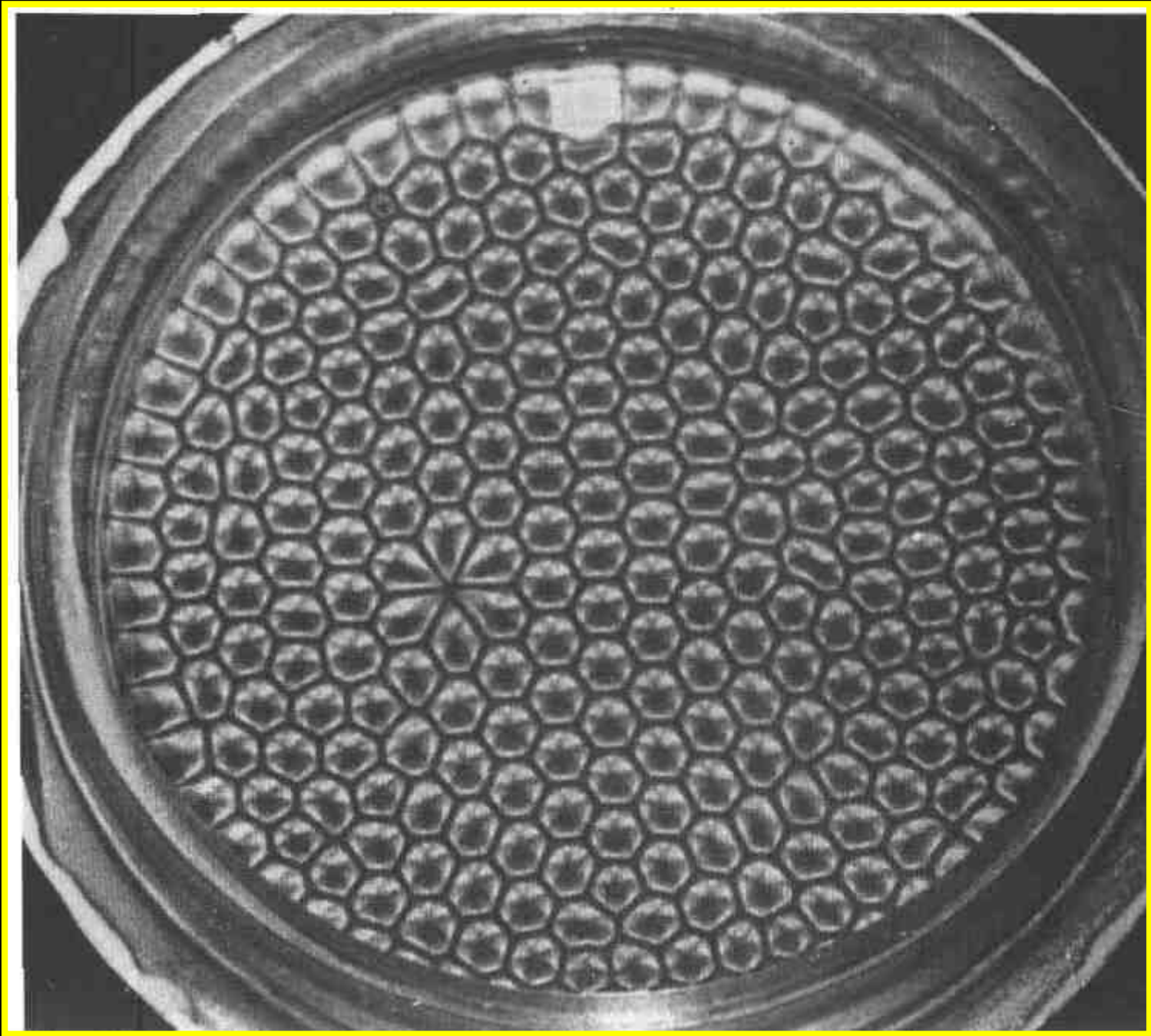
**Конвективной неустойчивостью**  
**называется неустойчивость в**  
**газовой или жидкой среде,**  
**находящейся в поле силы тяжести,**  
**которая пронизывается потоком**  
**тепла в направлении**  
**противоположном вектору  $g$**



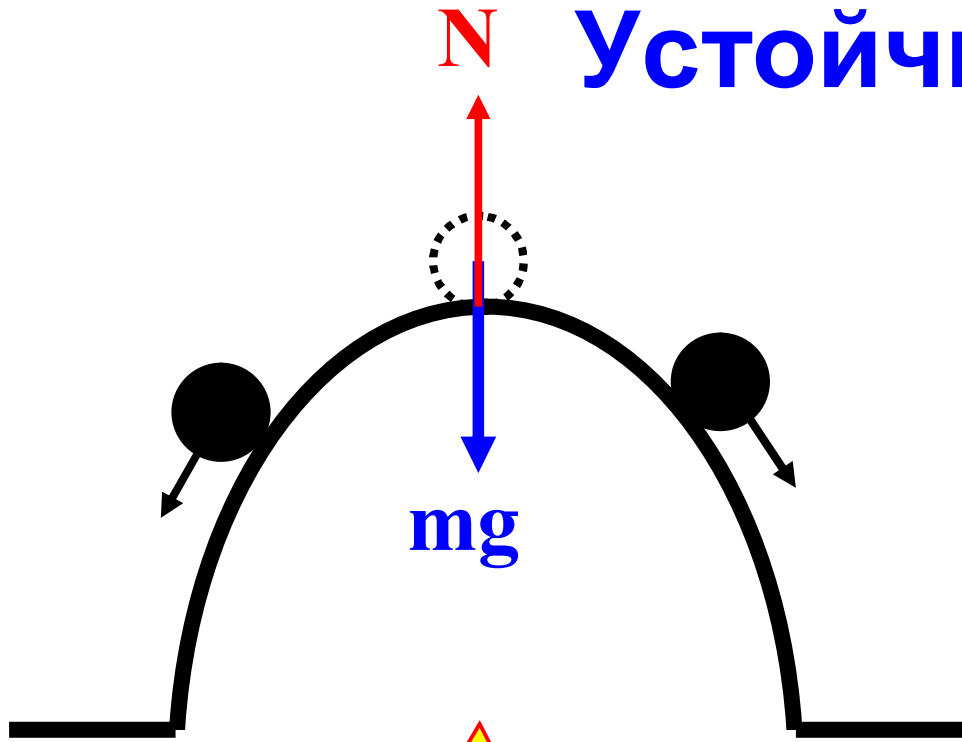
# Конвективные ячейки Бенара с восходящим потоком в центре



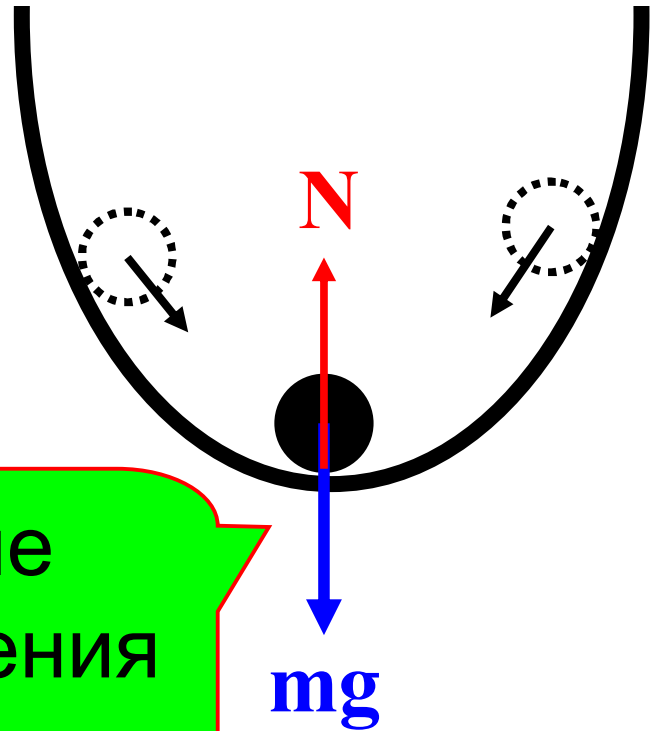




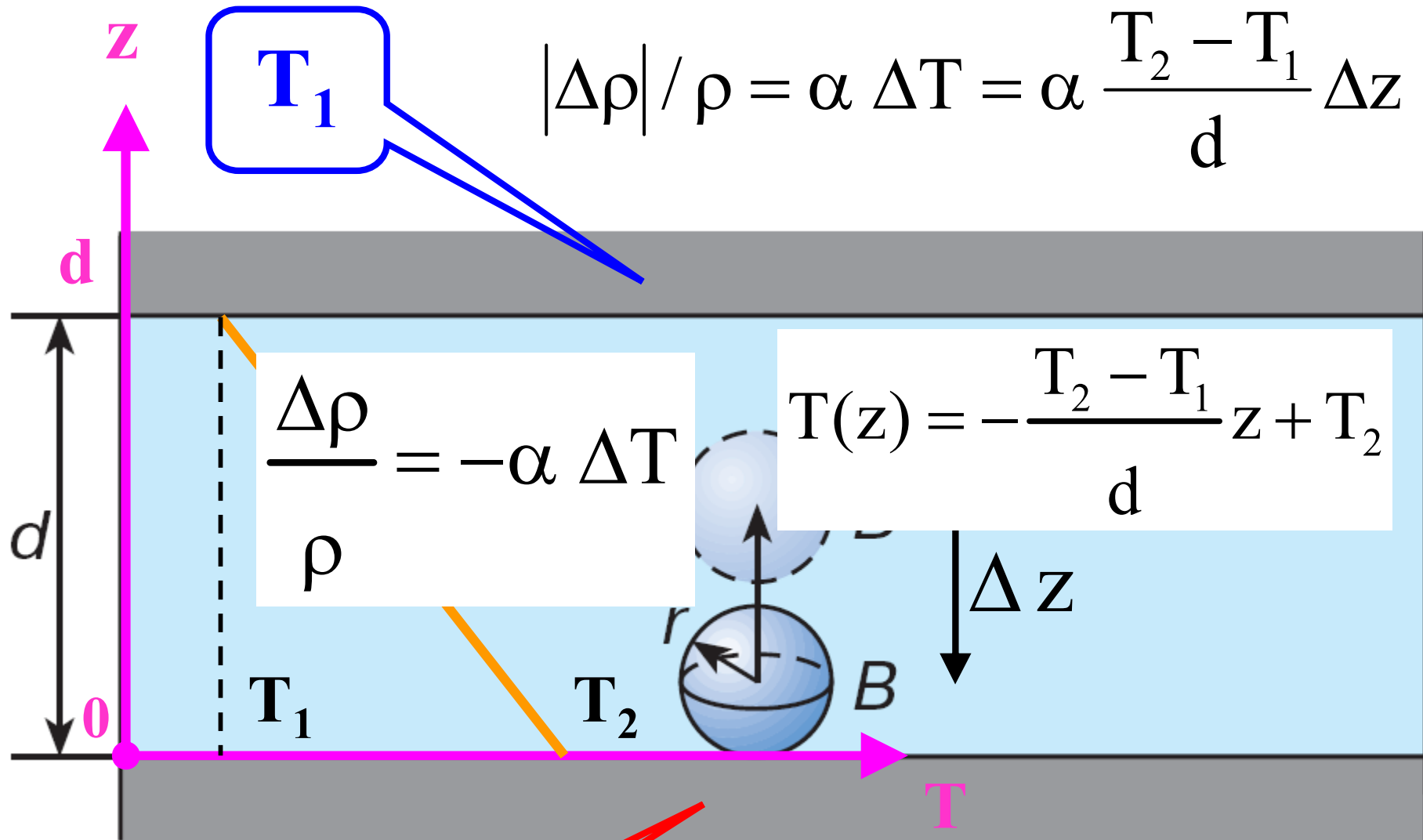
# N Устойчивость



Малые  
возмущения  
нарастают со  
временем



Малые  
возмущения  
затухают



$T_2$

$\alpha$  – коэффициент объемного температурного расширения

$$F_A - mg = g \Delta \rho V \sim g \Delta \rho r^3$$

$$F_C = 6\pi \rho \nu r U \sim \rho \nu r U$$

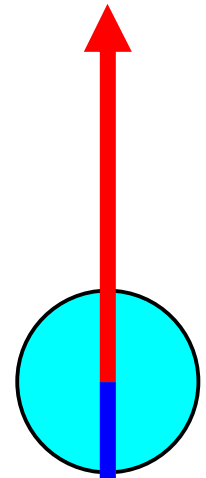
$$F_A - mg = F_C$$

$$U \sim \frac{\Delta \rho g r^2}{\rho \nu} = \frac{\alpha g r^2 (T_2 - T_1)}{\nu d} \Delta z$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \alpha \frac{T_2 - T_1}{d} \Delta z$$

$$\tau_{\Delta z} \sim \frac{\Delta z}{U} = \frac{\nu d}{g \alpha (T_2 - T_1) r^2}$$

$F_{\text{Архимеда}}$



$F_{\text{Стокса}}$

$mg$

$$\tau_{\Delta z} \sim \frac{\nu d}{g \alpha (T_2 - T_1) r^2}$$

?

$$\tau_T \sim \frac{r^2}{\chi}$$

$$\frac{\tau_T}{\tau_{\Delta z}} = \frac{g \alpha (T_2 - T_1) r^4}{\chi \nu d}$$

Температуро-проводность

$$r \sim d$$

$$Ra = \frac{g \alpha (T_2 - T_1) d^3}{\chi \nu}$$

Число Рэлея

Характер границ поверхности	$Ra_{кр}$
Обе свободные	657,11
Обе жесткие	1707,76
Верхняя свободная, нижняя жесткая	1100,65

## Вода

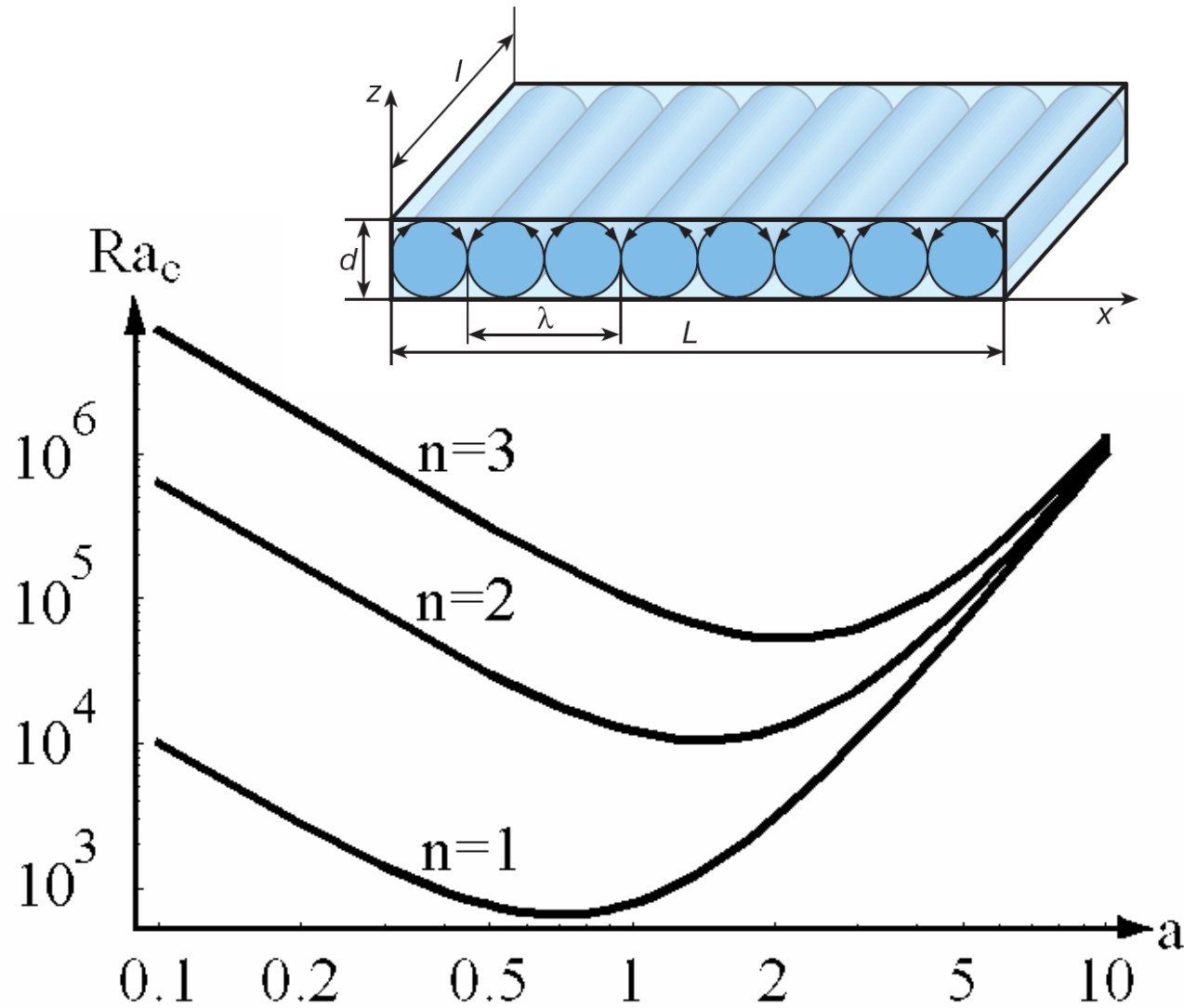
1 м  $T_2 - T_1 \sim 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}$

1 см  $T_2 - T_1 \sim 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$

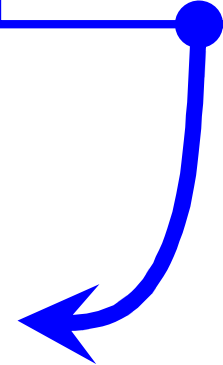
1 мм  $T_2 - T_1 \sim 100 \text{ } ^\circ\text{C}$

**Абсолютная  
устойчивость!**

# Нейтральные кривые для конвекции Рэлея

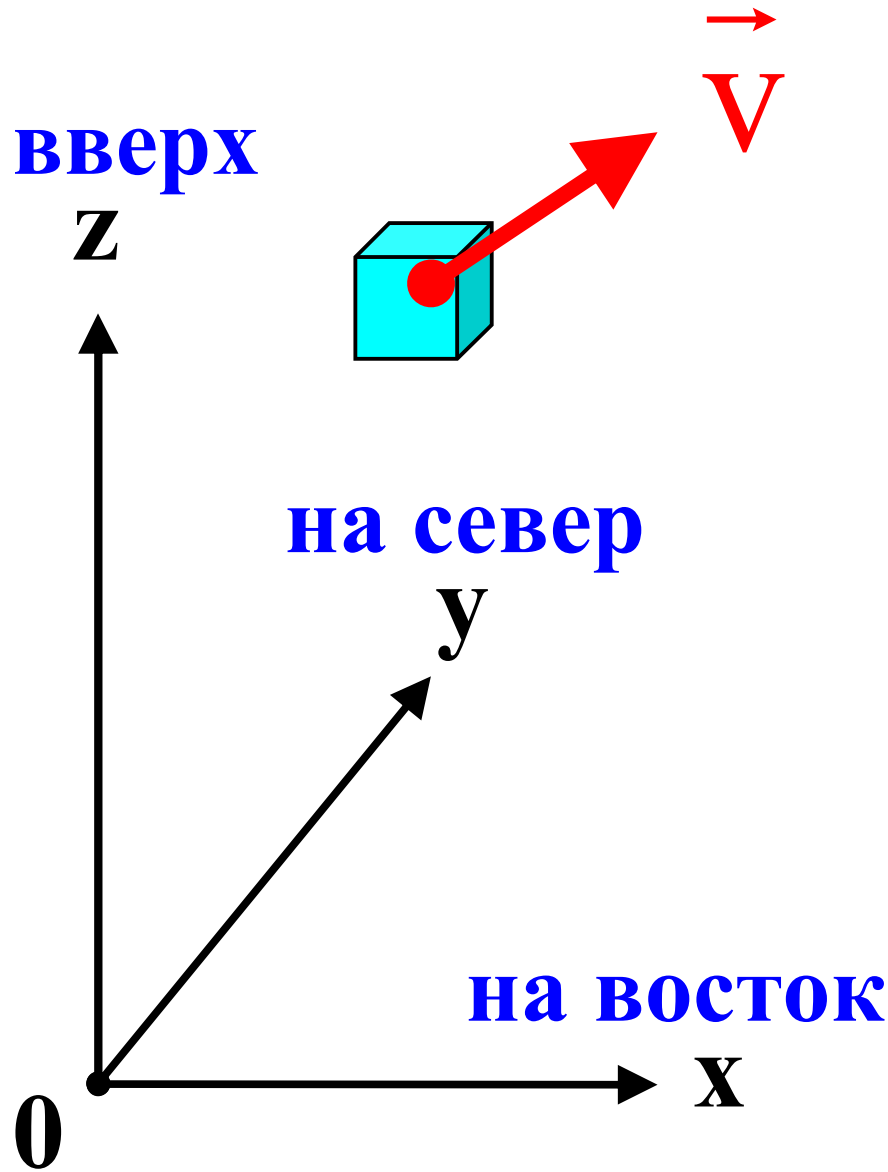


$$a = \frac{1}{\lambda}$$



**Уравнения  
гидродинамики  
(аэрогидромеханики)**





$$\vec{v} = (u_x, u_y, u_z)$$

$$\vec{v} \equiv (u, v, w)$$

$$\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$$

$$p = p(x, y, z, t)$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

**ВВЕРХ**

**Z**



**на север**

**y**

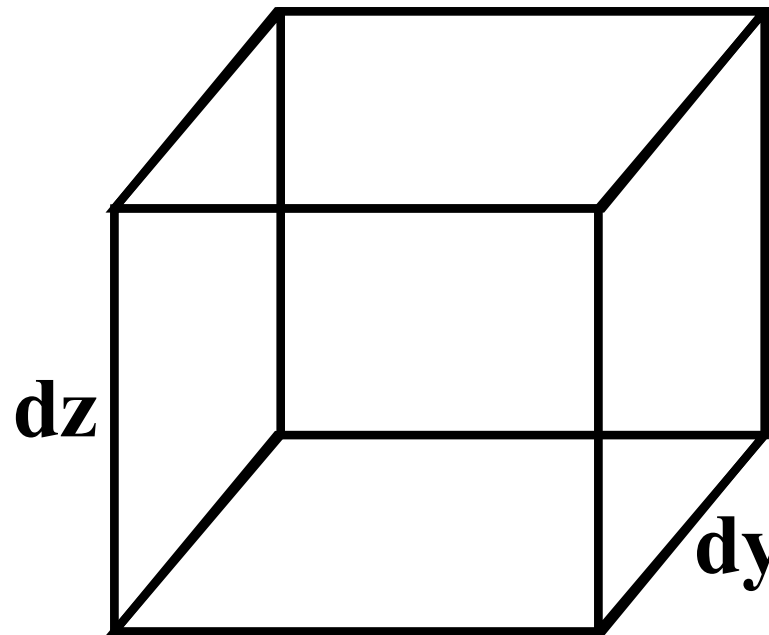


**на восток**

**x**



**0**



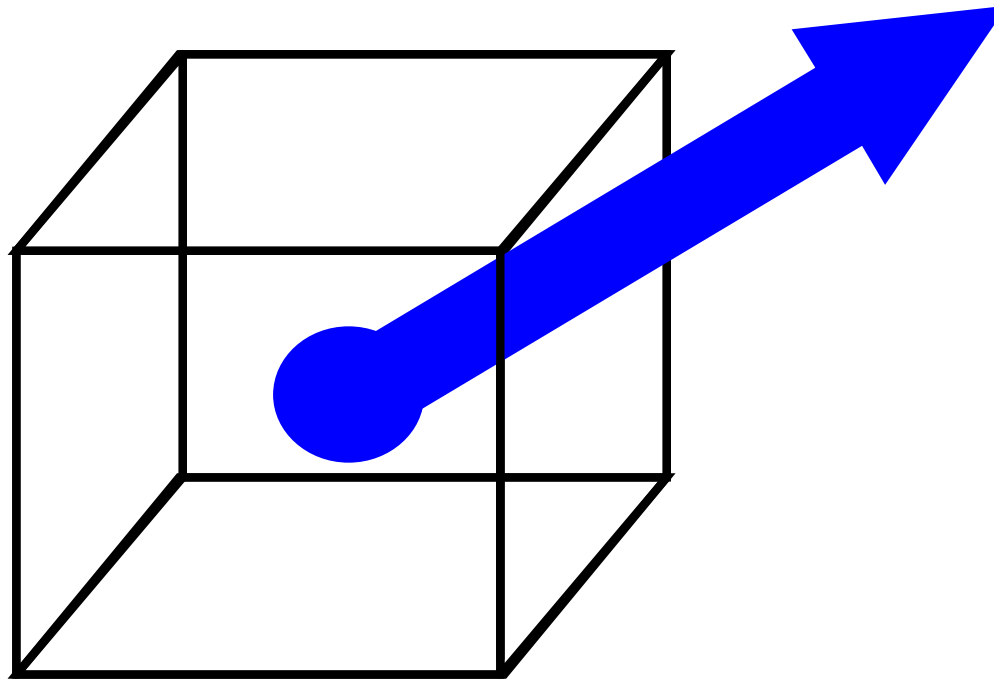
**dz**

**dx**

**dy**

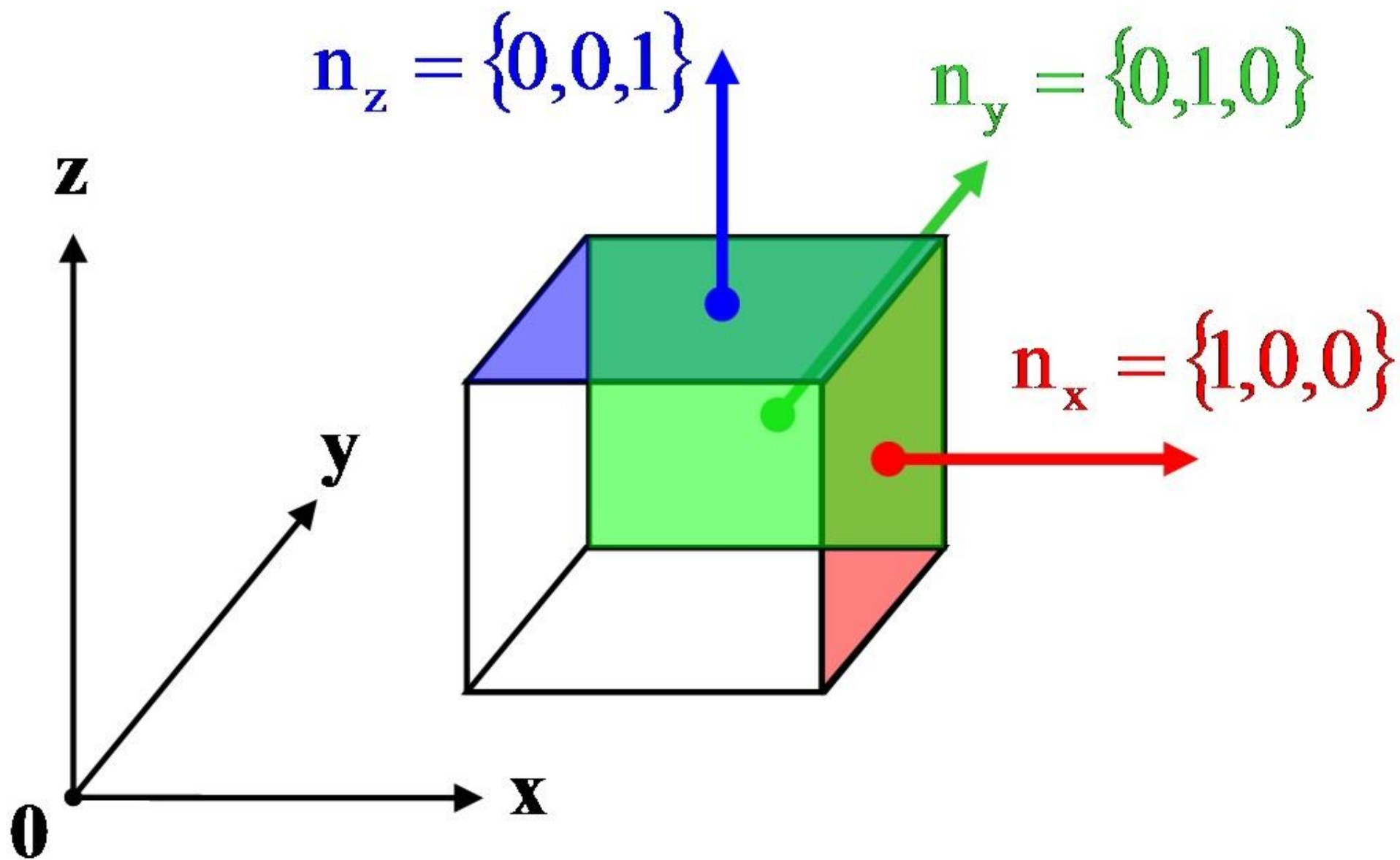
# Массовые силы

$$F_{\text{масс}} \sim dm = dx dy dz \rho$$



- сила притяжения (Земля, Луна, Солнце, ...)
- силы инерции (Кориолиса, центробежная)

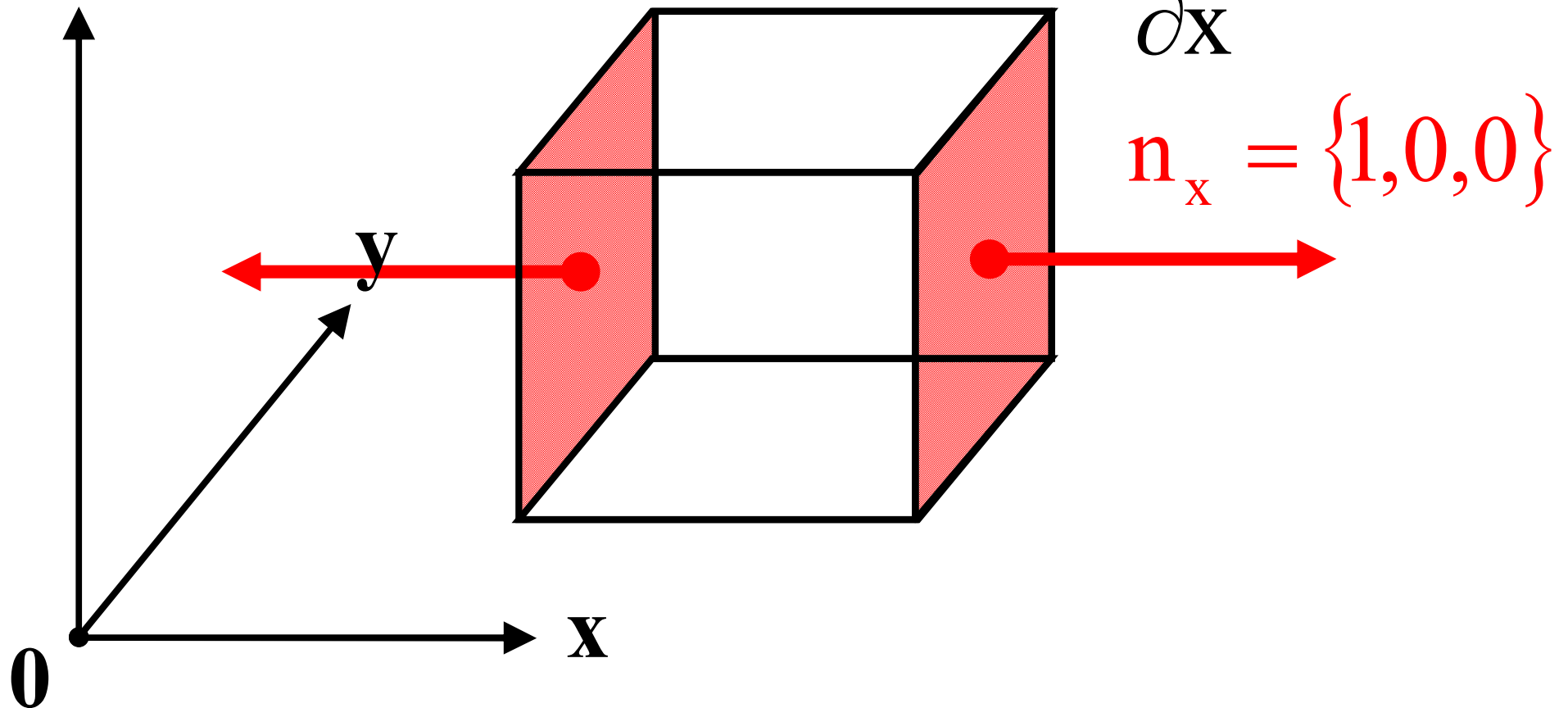
# «Поверхностные» силы



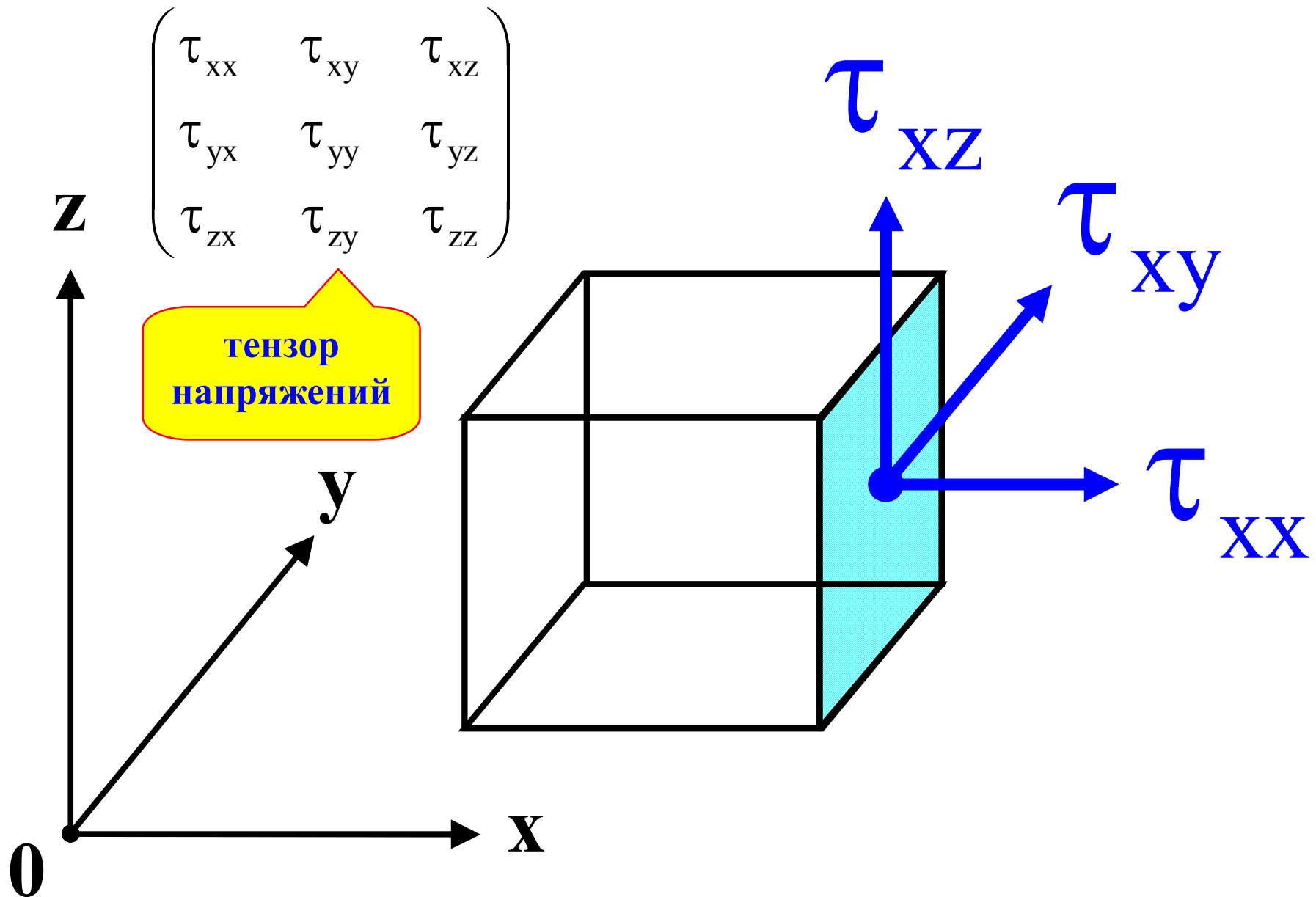
# «Поверхностные» силы

$$F_{\text{поверхни}} = [\tau(x + dx) - \tau(x)] dydz$$

$$n_x' = \{-1, 0, 0\} \quad F_{\text{поверхни}} = \frac{\partial \tau}{\partial x} dx dy dz$$



# «Поверхностные» силы



$$m\vec{a} = \sum \vec{F}_{\text{масс}} + \sum \vec{F}_{\text{поверхни}}$$

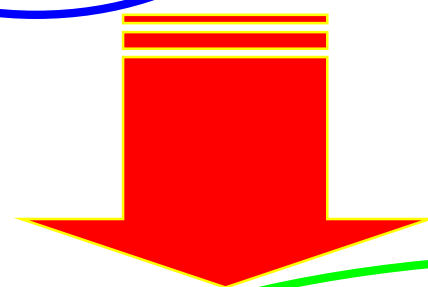
$$dx \, dy \, dz \, \rho$$

$$\sim dx \, dy \, dz \, \rho$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} dx \, dy \, dz$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau}{\partial x} \right)$$

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}_{\text{масс}} + \sum \vec{F}_{\text{поверхни}}$$



$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] - \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v} + \left( \zeta + \frac{\nu}{3} \right) \text{grad div } \vec{v}$$

**сила  
тяжести**

**сила  
Кориолиса**

**сила  
градиента  
давления**

**сила  
вязкого  
трения**



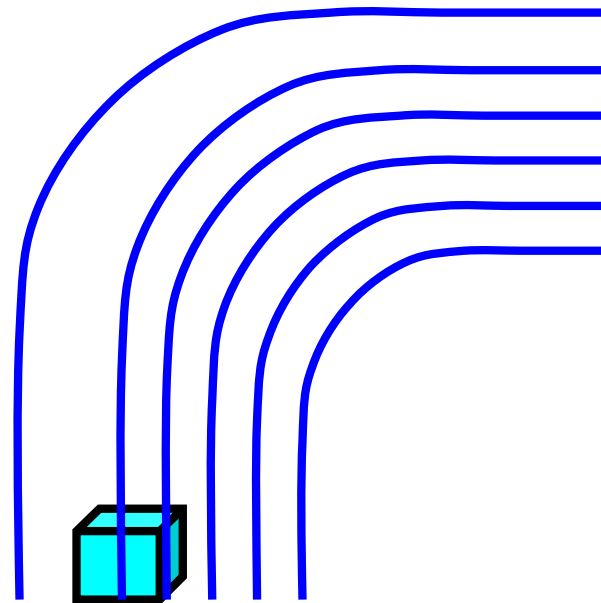
$$\vec{v} = \vec{v}(x(t), y(t), z(t), t)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left( \vec{v}, \vec{\nabla} \right) \vec{v}$$

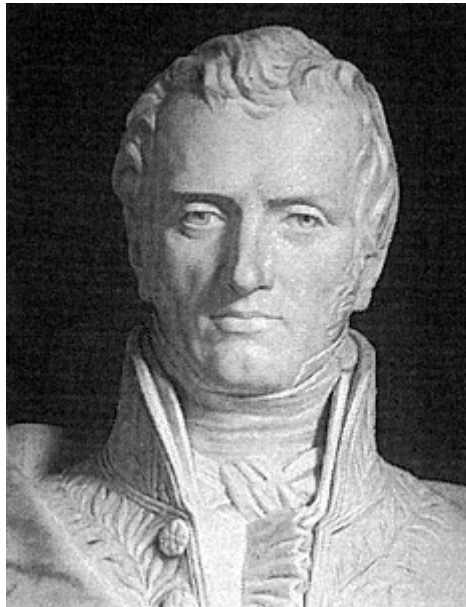
субстациональная производная

материальная производная

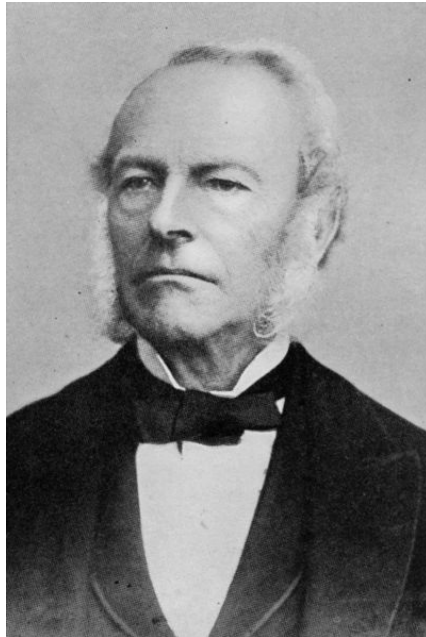
полная производная



$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] - \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v} + \left( \zeta + \frac{\nu}{3} \right) \text{grad div } \vec{v}$$



**Анри Навье**  
1785-1836  
французский  
механик и инженер

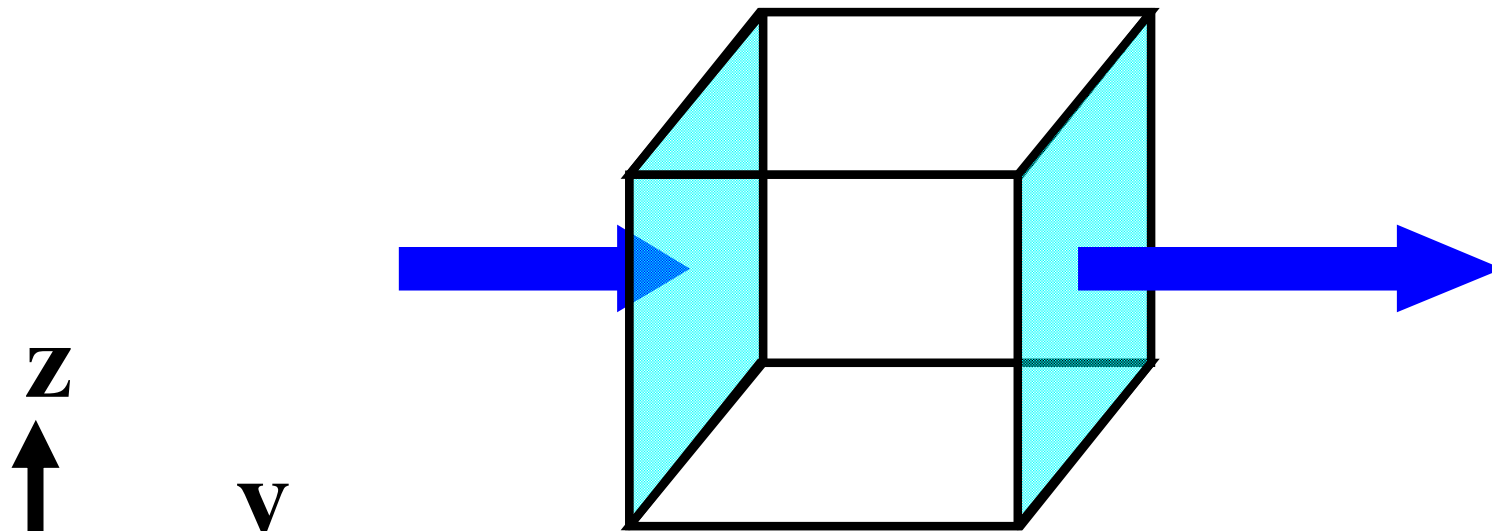


**Джордж Стокс**  
1819-1903  
английский физик и  
математик

уравнение  
**Навье-Стокса**

# Уравнение неразрывности (закон сохранения массы)

$$\rho(x)u(x)dydz$$



$$\rho(x + dx)u(x + dx)dydz$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = dx dy dz \frac{\partial \rho}{\partial t} =$$

$$= -[\rho(x + dx)u(x + dx) - \rho(x)u(x)] dy dz$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial[\rho u]}{\partial x} - \frac{\partial[\rho v]}{\partial y} - \frac{\partial[\rho w]}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}[\rho \vec{v}] = 0$$

**уравнение  
неразрывности**

# Система уравнений гидродинамики (аэрогидромеханики)

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] - \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v} + \left( \zeta + \frac{\nu}{3} \right) \text{grad div } \vec{v}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (\rho \vec{v}) = 0$$

**5 уравнений**

**5 неизвестных функций**

$$\rho = \rho(p)$$

уравнение  
Навье-Стокса

уравнение  
неразрывности

уравнение  
состояния

**Система уравнений гидродинамики**

**+уравнение переноса температуры**

**+уравнение переноса соли/водяного пара**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla})T = \chi \Delta T$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla})s = \vartheta \Delta s$$

$$\rho = \rho(p, T, s)$$

**система  
остается  
замкнутой!!!**

# Граничные условия на поверхностях, ограничивающих область решения задачи

условие прилипания

$$\vec{V} = 0 \text{ или } \vec{V} = \vec{V}_0$$

заданное напряжение  
(поток импульса)

$$\eta \frac{\partial u}{\partial z} = \tau$$

заданное давление

$$p = p_0$$

заданный поток тепла

$$-C_p \chi \frac{\partial T}{\partial z} = Q$$

заданная температура

$$T = T_0$$

# Граничные условия на поверхностях, ограничивающих область решения задачи

**Поверхности** могут быть **подвижными и неизвестными**, т.е. их положение определяется из решения задачи

## Примеры:

- волны на поверхности воды
- течения с возможностью фазовых переходов (лед-вода, мантия-ядро Земли)
- размыв или выветривание
- etc.



## Начальные условия (при $t=0$ )

$$\vec{v} = \vec{v}_0(x, y, z)$$

$$p = p_0(x, y, z)$$

$$T = T_0(x, y, z)$$

$$s = s_0(x, y, z)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{a}_0(x, y, z)$$

«ВЫСОКАЯ»  
теория

геофизическая  
практика

**Проблема ассимиляции данных  
наблюдений в численные модели**

# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №6

---

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

**Основные  
подходы к  
упрощению  
уравнений  
гидродинамики**

# Приближение №1:

## «несжимаемая жидкость (газ)»

$$\rho = \rho_0 = \text{const}$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{v} = - \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] + \nu \Delta \vec{v} +$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (\rho \vec{v}) = 0$$

$$+ \left( \zeta + \frac{\nu}{3} \right) \text{grad div } \vec{v}$$

$$\rho = \rho(p)$$

$\rho_0$

$$\text{div } \vec{v} = 0$$

# Приближение №1:

## «несжимаемая жидкость (газ)»

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left( \vec{v}, \vec{\nabla} \right) \vec{v} = - \frac{\vec{\nabla} p}{\rho_0} + \vec{g} + 2 \left[ \vec{v} \times \vec{\omega} \right] + \nu \Delta \vec{v}$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \sim \frac{u_{\text{гориз}}}{L}$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} \sim \frac{w_{\text{верт}}}{H}$$

В крупномасштабных  
течениях атмосферы и  
океана  $H \ll L$

$$\Rightarrow w_{\text{верт}} \ll u_{\text{гориз}}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial w}{\partial z}$$



$$\left| w_{\text{верт}} \right| \sim \frac{H}{L} \left| u_{\text{гориз}} \right|$$

## Приближение №2:

### «стационарное течение несжимаемой жидкости»

$$\cancel{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] + \nu \Delta \vec{v}$$

$$\cancel{\frac{\partial \rho}{\partial t}} + \operatorname{div} (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\rho = \rho(p)$$

# Приближение №3:

## «идеальная (невязкая) жидкость»

понижается порядок уравнения

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] + \cancel{v \Delta \vec{v}}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\rho = \rho(p)$$

**Изменение граничного условия:**

"прилипание"  $\Rightarrow$  "непротекание"

граница – плоскость  $0xy$

$$\{u = v = w = 0\} \Rightarrow \{w = 0\}$$

## Приближение №4:

«идеальная несжимаемая жидкость,  
линейное приближение»

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \cancel{\left( \vec{v}, \vec{\nabla} \right) \vec{v}} = - \frac{\vec{\nabla} p}{\rho_0} + \vec{g} + 2 \left[ \vec{v} \times \vec{\omega} \right]$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

если  $\left\{ \begin{array}{l} \vec{v}_1, p_1 \\ \vec{v}_2, p_2 \end{array} \right\}$  – решения системы, то  $\Rightarrow$

$A\vec{v}_1 + B\vec{v}_2, Ap_1 + Bp_2$  – решения системы

где  $A, B$  – константы



# «Геофизические» приближения:

1. Гидростатическое приближение

2. Геострофическое приближение

*strophe* (греч.) – вращение, поворот

Крупномасштабные течения атмосферы и океана обычно происходят в условиях **гидростатического** (по вертикали) и **геострофического** (по горизонтали) баланса

$$z : -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} = 0 \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} : -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] = 0$$

# «Геофизические» приближения:

## 1. Гидростатическое приближение

$$\cancel{\frac{dw}{dt}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

$$\rho = \rho_0 = \text{const}$$
$$g = \text{const}$$

$$\left| w_{\text{верт}} \right| \sim \frac{H}{L} \left| u_{\text{гориз}} \right|$$
$$H \ll L$$

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \Rightarrow p(z) = p_0 - \rho_0 g z$$

# Барометрическая формула



g



z

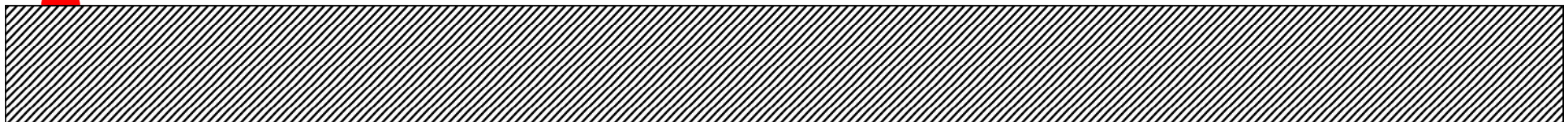
0

$$\frac{dp}{dz} = -g \rho(z) \quad \rho(z) = \frac{p(z)}{R_a T}$$

$$\frac{dp}{dz} = -g \frac{p}{R_a T} \quad \Rightarrow \quad \frac{dp}{p} = -\frac{g}{R_a T} dz$$

$$\{T, g, R_a\} \neq f(z)$$

$$H = \frac{R_a T}{g}$$



# Барометрическая формула



$$\frac{dp}{p} = -\frac{dz}{H}$$

$$\ln p \Big|_{p_0}^{p(z)} = -\frac{z}{H} \Big|_0^z$$

$$\ln p(z) - \ln p_0 = -\frac{z}{H}$$

$$\ln \frac{p(z)}{p_0} = -\frac{z}{H}$$

$$p(z) = p_0 e^{-z/H}$$

$$H = \frac{R_a T}{g}$$

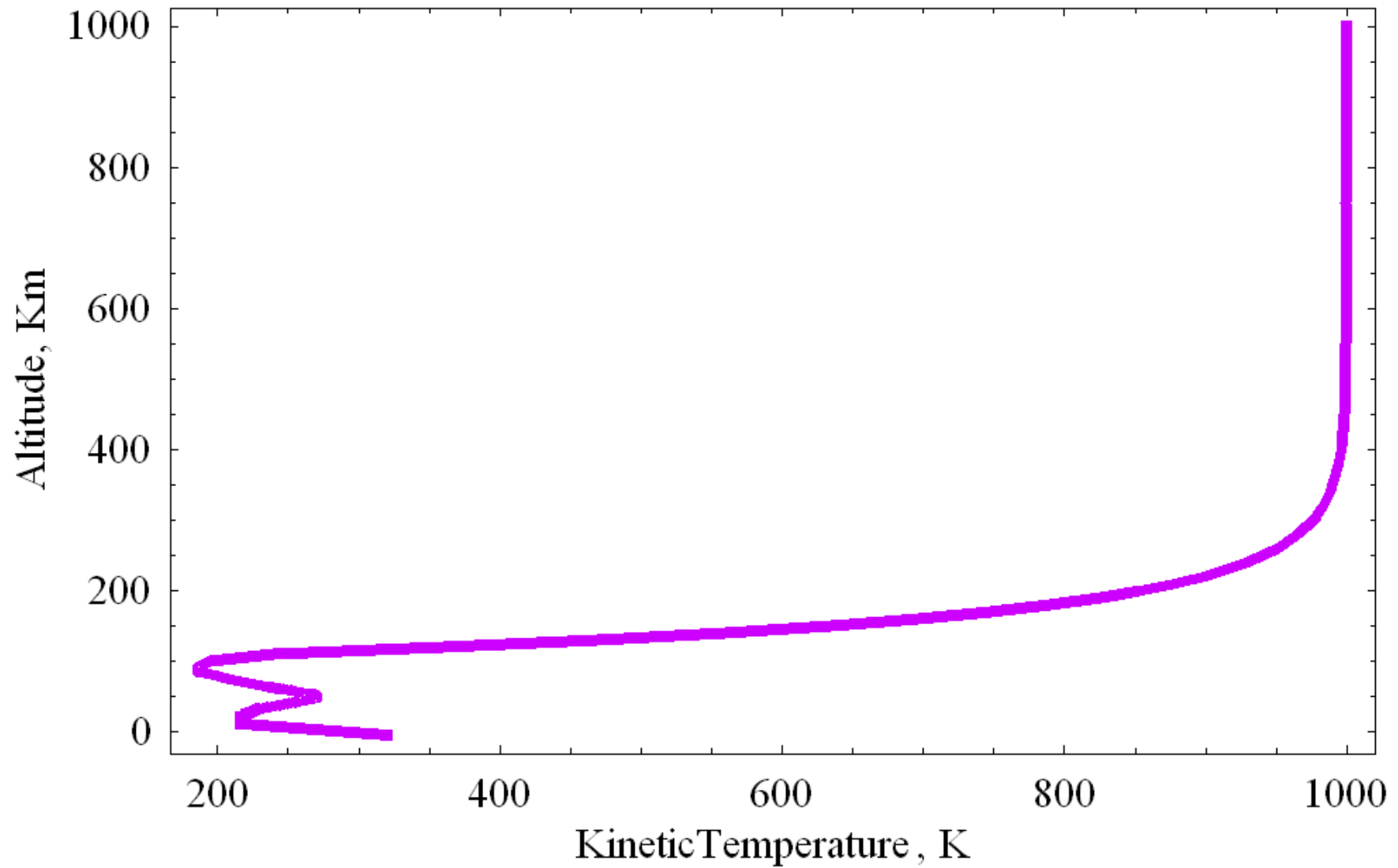
**H – высота однородной атмосферы**

## Высота однородной атмосферы

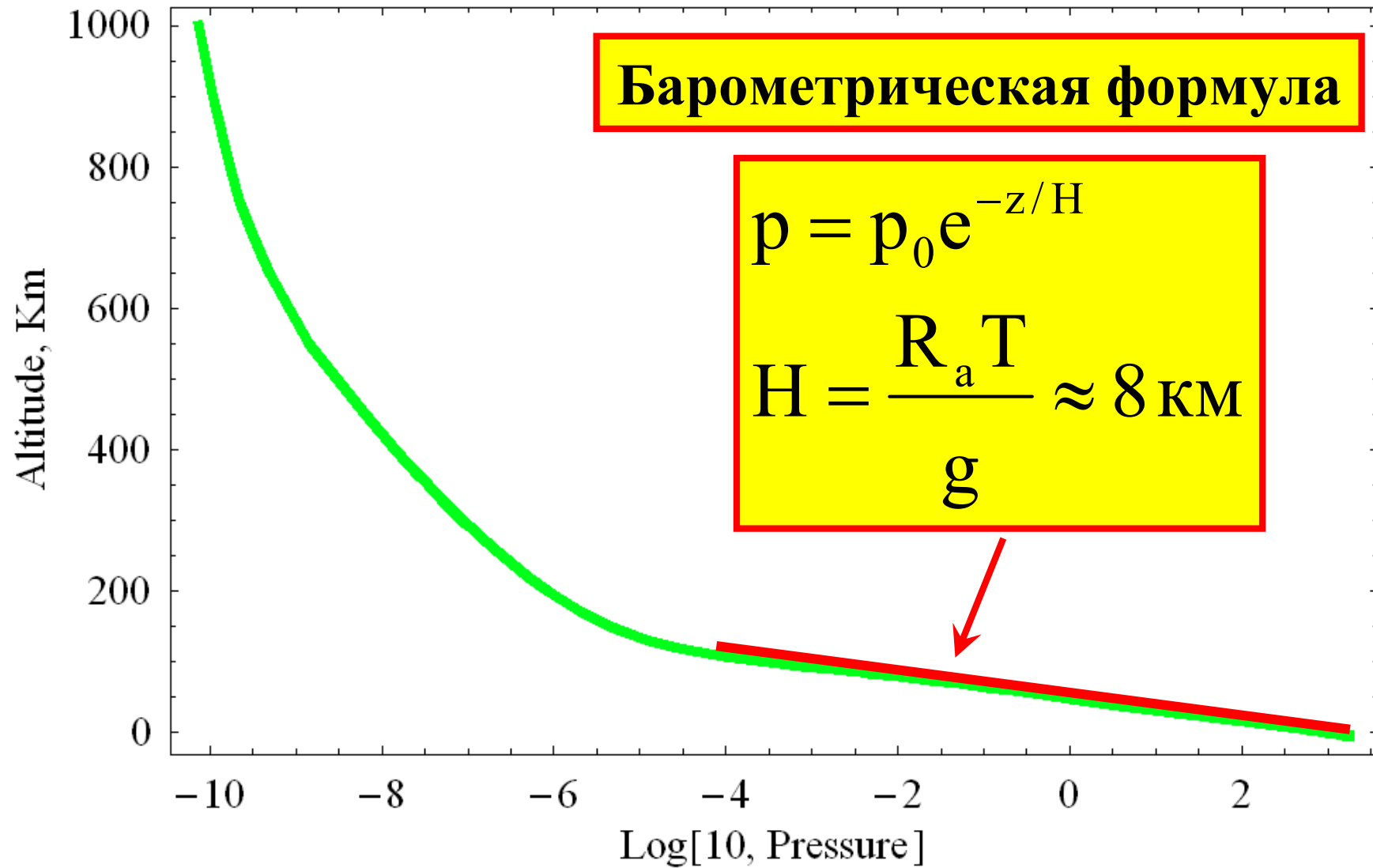
$$R_a = \frac{R}{\mu} = \frac{8.31 \text{ [Дж / моль} \cdot \text{К]}}{0.029 \text{ [кг / моль]}} \approx$$
$$\approx 287 \text{ [Дж / кг} \cdot \text{К]}$$

$$H = \frac{R_a T}{g} = \frac{287 \text{ [Дж / кг} \cdot \text{К]} \cdot 288 \text{ [К]}}{9.8 \text{ [м / с}^2\text{]}} \approx$$
$$\approx 8434 \text{ [м]}$$

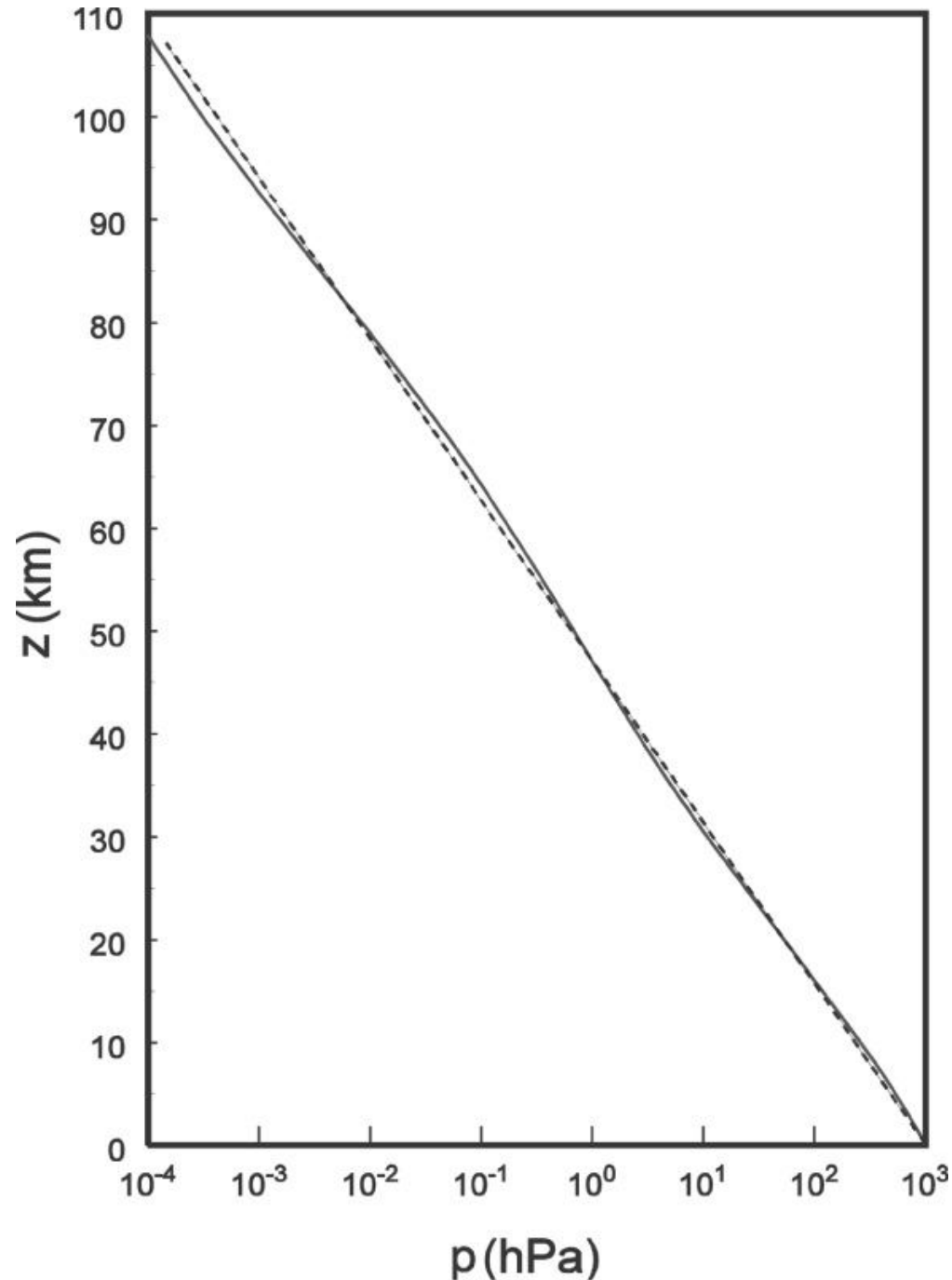
# Зависимость температуры воздуха от высоты



# Зависимость давления воздуха от высоты



## Зависимость давления воздуха от высоты



————— наблюдения  
( $40^\circ\text{N}$ , декабрь)

.....  $p = p_0 e^{-z/H}$

$H = 6.8$  км

$\approx 232$  К



# «Геофизические» приближения:

## 2. Геострофическое приближение

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho_0} + \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}]$$

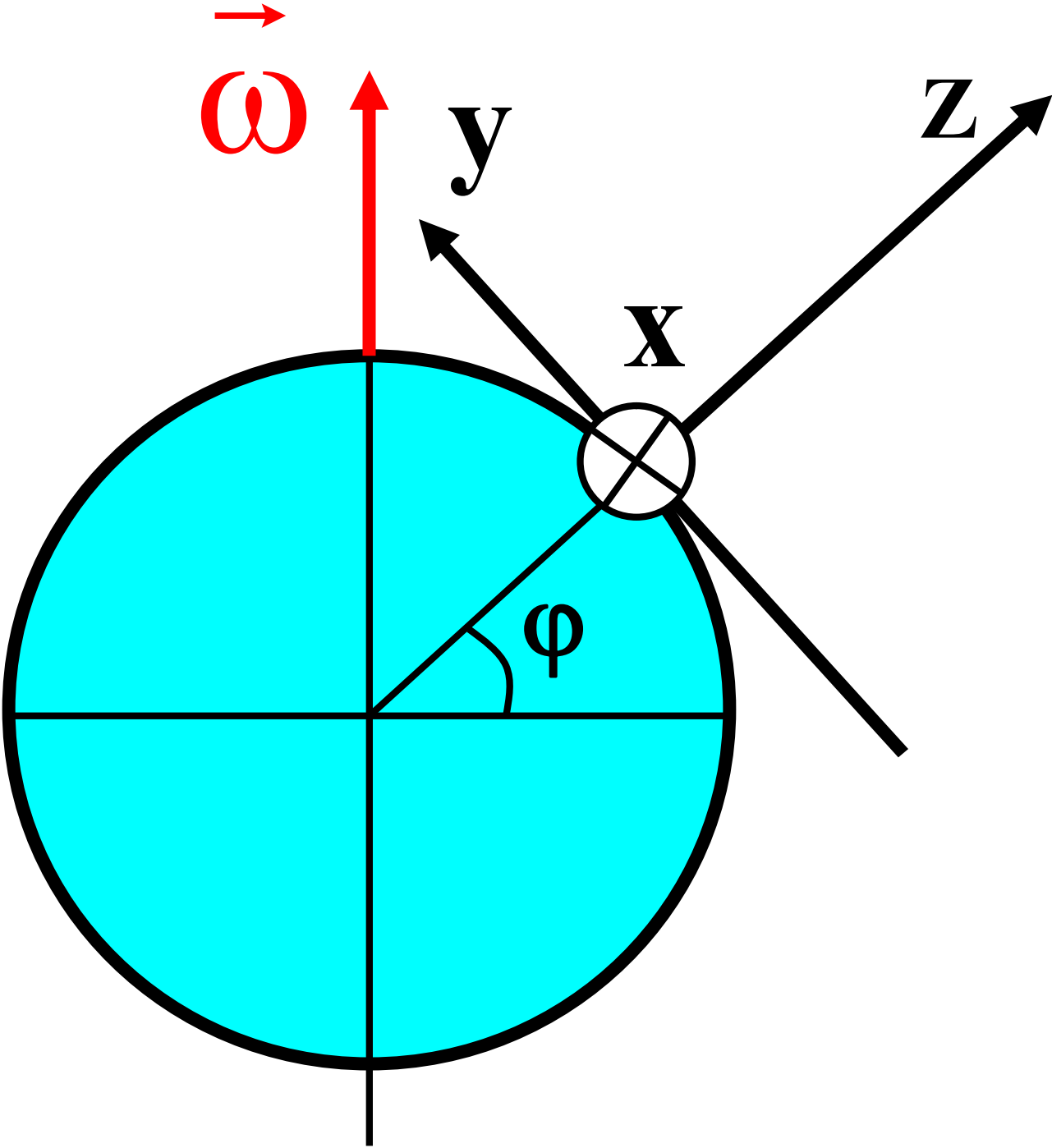
$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0$$

по  
горизонтали  
не действует!

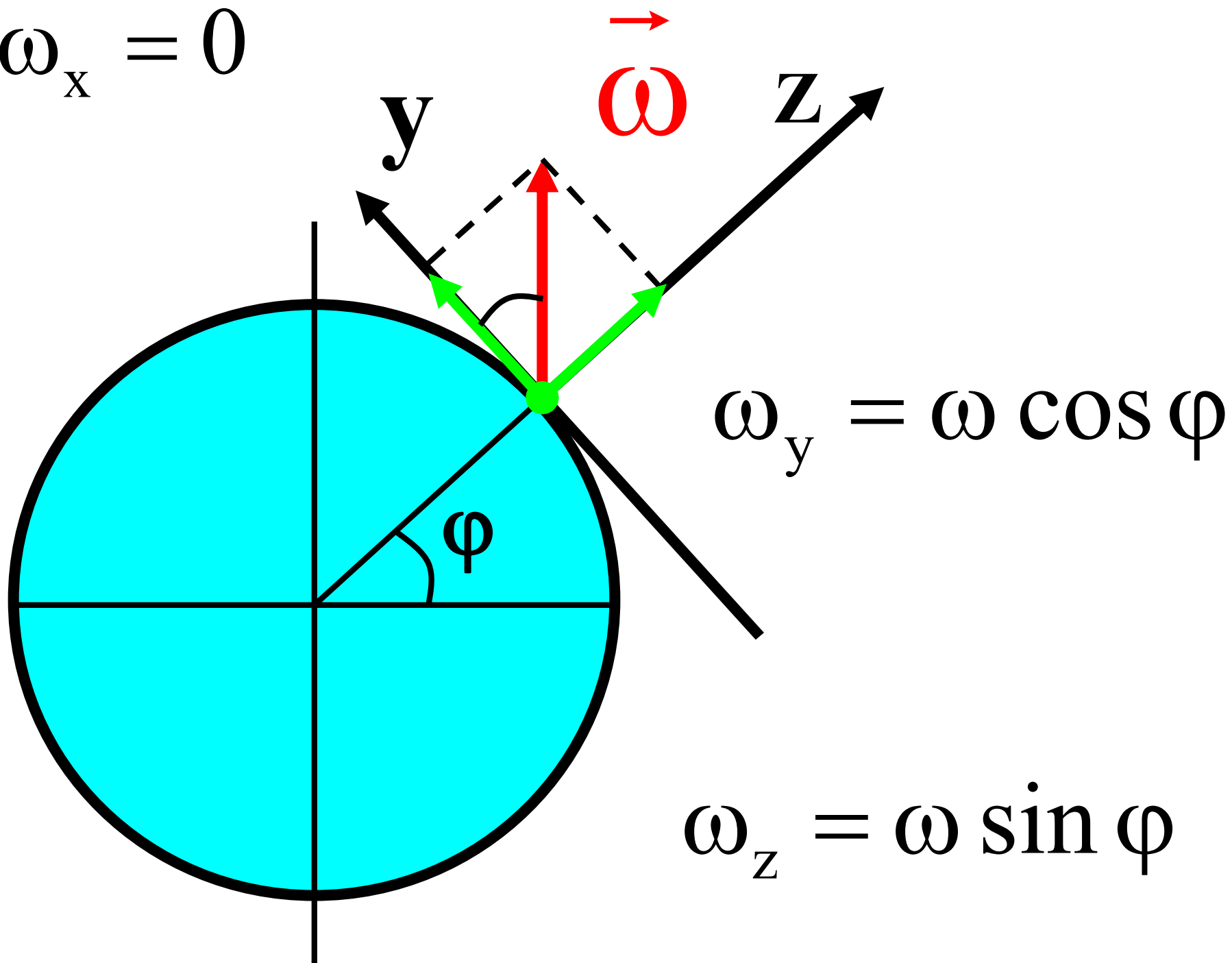


**Gaspard-Gustave de Coriolis**  
**French, Mathematics, Physics**  
**1792-1843**

$$\mathbf{F}_{\text{Kop}} = 2m[\vec{v} \times \vec{\omega}]$$



$$\omega_x = 0$$



$$\vec{v} = (u, v, w)$$

$$\vec{\omega} = (0, \omega \cos \varphi, \omega \sin \varphi)$$

$$2[\vec{v} \times \vec{\omega}] = 2 \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ u & v & w \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{vmatrix} = 2 \begin{pmatrix} v\omega_z - w\omega_y \\ w\omega_x - u\omega_z \\ u\omega_y - v\omega_x \end{pmatrix} =$$

традиционное приближение

1.  $w \ll \{u, v\}$

2.  $F_z^{\text{Кор}} = 0$

$$= 2 \begin{pmatrix} v\omega \sin \varphi - w\omega \cos \varphi \\ -u\omega \sin \varphi \\ u\omega \cos \varphi \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2v\omega \sin \varphi \\ -2u\omega \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$2[\vec{v} \times \vec{\omega}] \approx \begin{pmatrix} 2v\omega \sin \varphi \\ -2u\omega \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f v \\ -f u \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

**параметр  
Кориолиса**

**Масштаб  
времени  
течения**

$$\tau = \frac{L}{U}$$



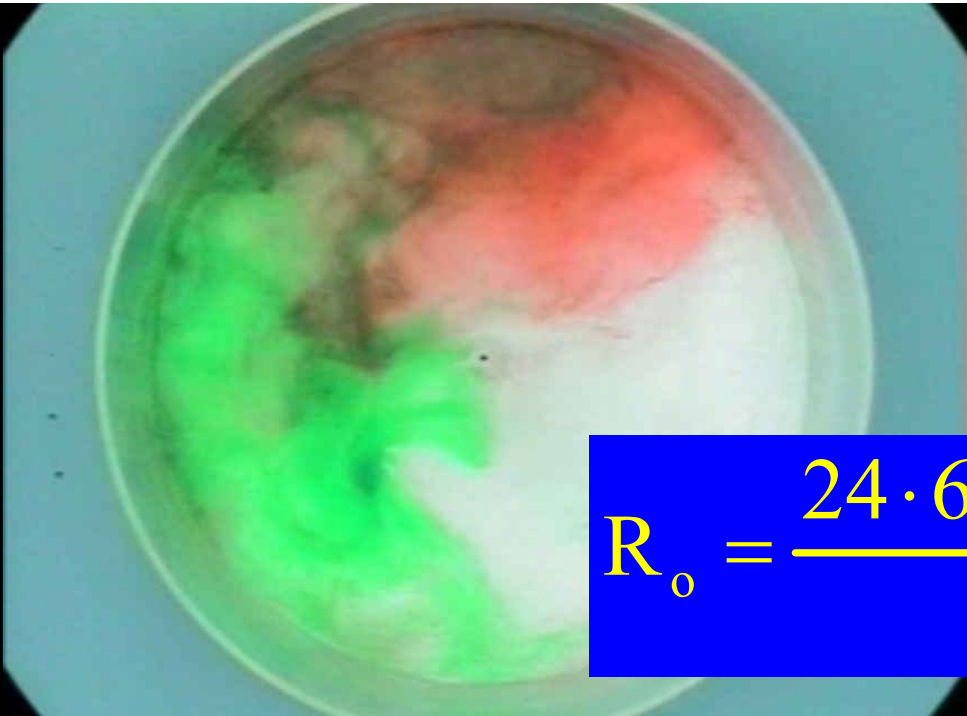
**Carl-Gustaf Rossby**  
**Swedish-US meteorologist**  
**1898-1957**

**Период  
вращения**

**T**

**Число  
Россби**

$$\frac{T}{\tau} = \frac{T \cdot U}{L}$$

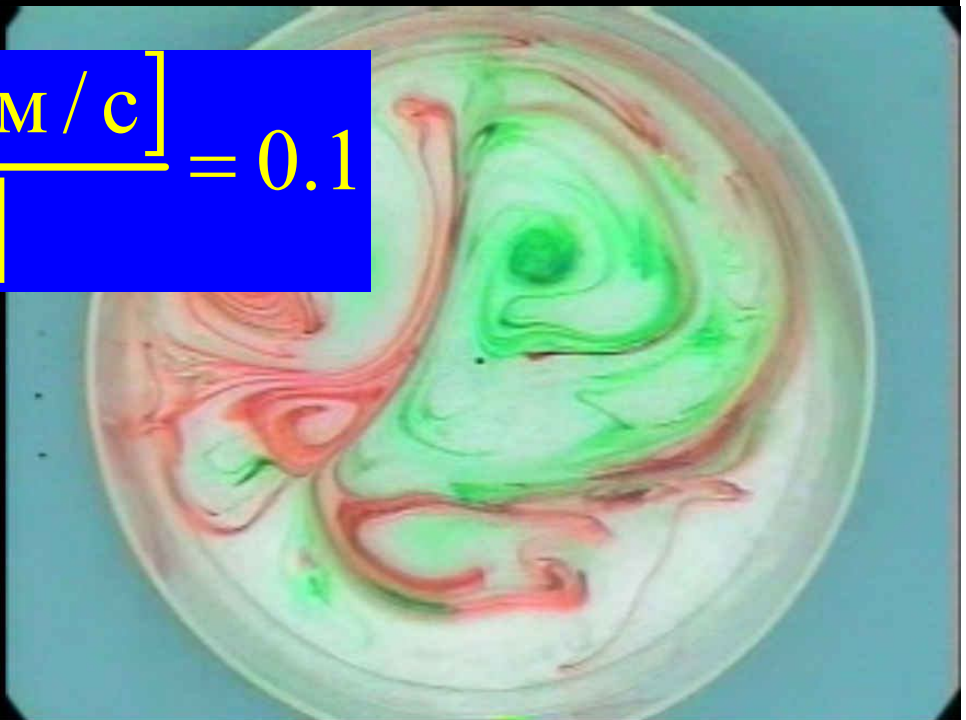


A petri dish containing a mixture of red and green dyes. The dyes are mostly smooth and diffuse, with some faint, irregular patterns. The background is a light blue surface.

$$R_o = \frac{T \cdot U}{L}$$

$$R_o = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60 [c] \times 0.01 [M/c]}{0.3 [M]} \approx 3000$$

$$R_o = \frac{3 [c] \times 0.01 [M/c]}{0.3 [M]} = 0.1$$





$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left( \vec{v}, \vec{\nabla} \right) \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}]$$

на экваторе  $R_0 \rightarrow \infty$

$$\frac{U}{T} \sim \frac{UU}{L}$$

$$T \sim L/U$$

**сила Кориолиса  
значима при**

$$R_0 \ll 1$$

$$U \cdot f$$

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

$$R_0 = \frac{\left| \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left( \vec{v}, \vec{\nabla} \right) \vec{v} \right|}{|2[\vec{v} \times \vec{\omega}]|} \sim \frac{UU}{U \cdot f} = \frac{U}{L \cdot f}$$

**число  
Росси**

# Типичные значения числа Россби для атмосферы и океана

$$R_o = \frac{U}{L \cdot f}$$

$$f = 2\omega \sin \varphi = \frac{4\pi}{T} \sin \varphi \sim 10^{-4} \text{ c}^{-1}$$

**атмосфера**

$$R_o = \frac{10[\text{м/с}]}{10^6[\text{м}] \times 10^{-4}[\text{с}^{-1}]} \approx 0.1$$

**океан**

$$R_o = \frac{1[\text{м/с}]}{10^6[\text{м}] \times 10^{-4}[\text{с}^{-1}]} \approx 0.01$$

## 2. Геострофическое приближение

$$-\frac{\vec{\nabla} p}{\rho_0} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] = 0$$

$x: 2\omega v \sin \varphi$   
 $y: -2\omega u \sin \varphi$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad \vec{v} = (u, v, w)$$

## 2. Геострофическое приближение

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f v = 0$$

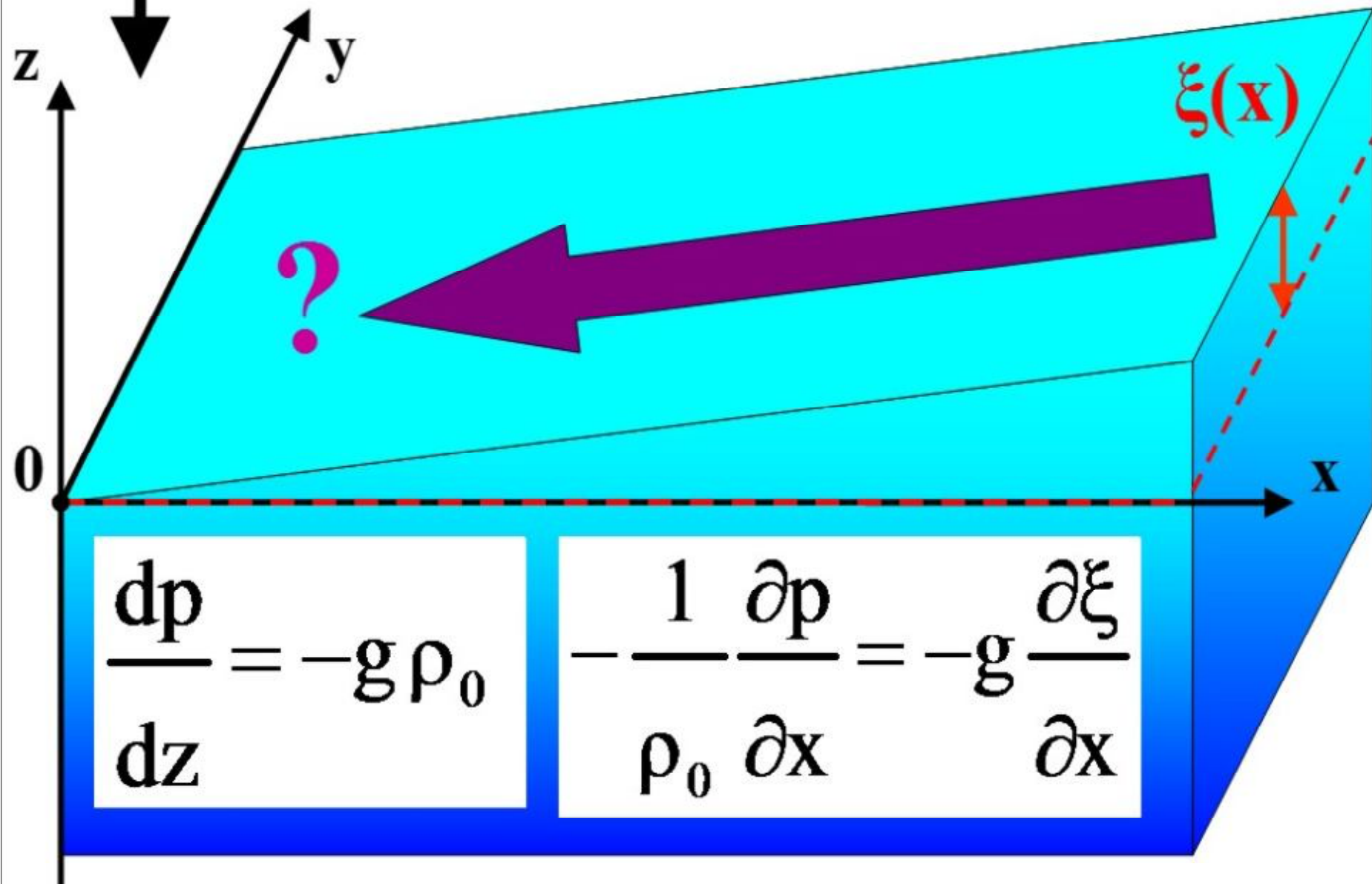
$$\rho_0$$

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f u = 0$$

$$\rho_0$$

$$p(x, y, z) = p_{\text{atm}} + \rho_0 g [\xi(x, y) - z]$$

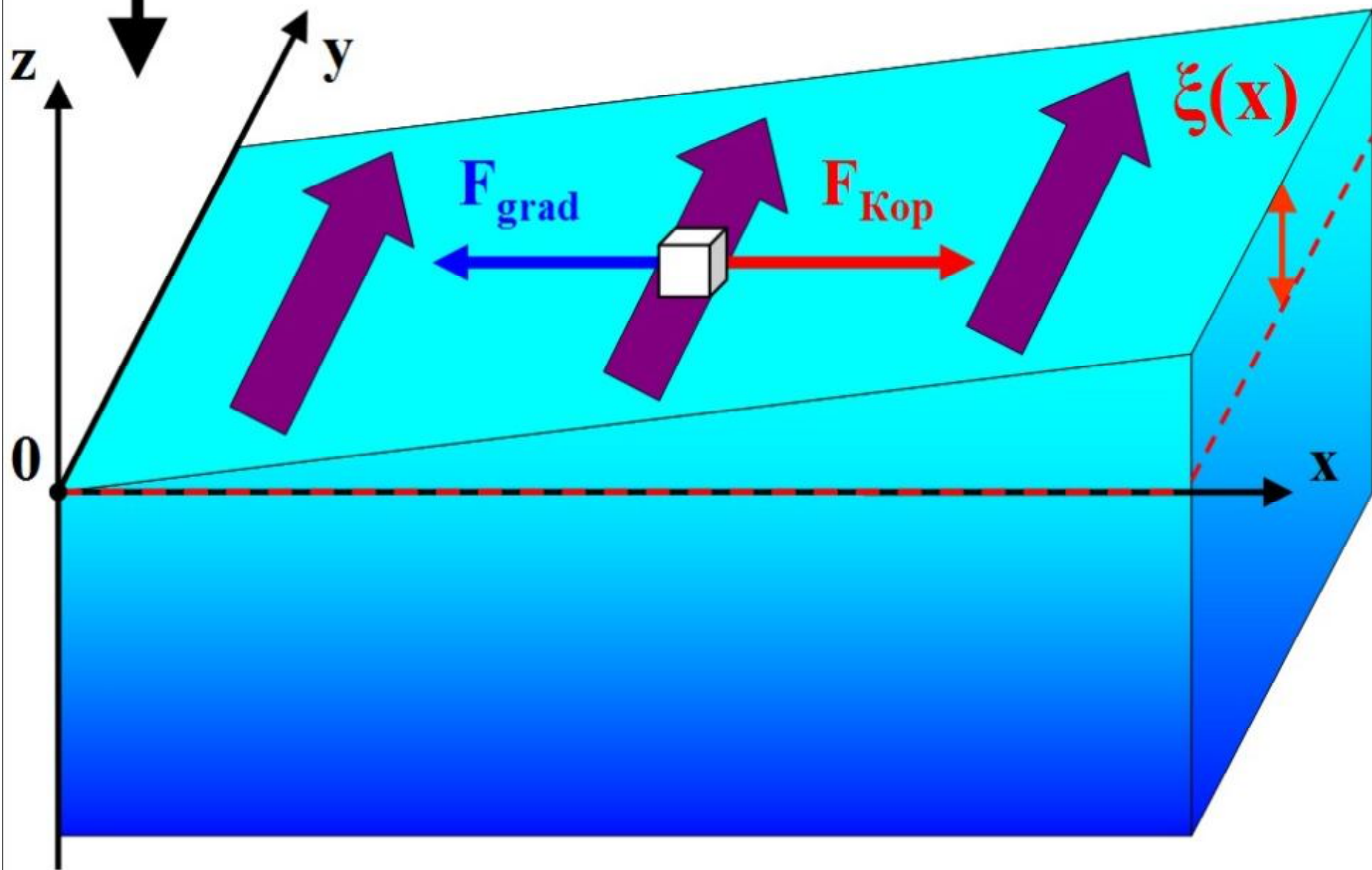


$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f v = 0 \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f u = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

$$x : u = 0$$

$$y : v = \frac{g}{2\omega \sin \varphi} \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

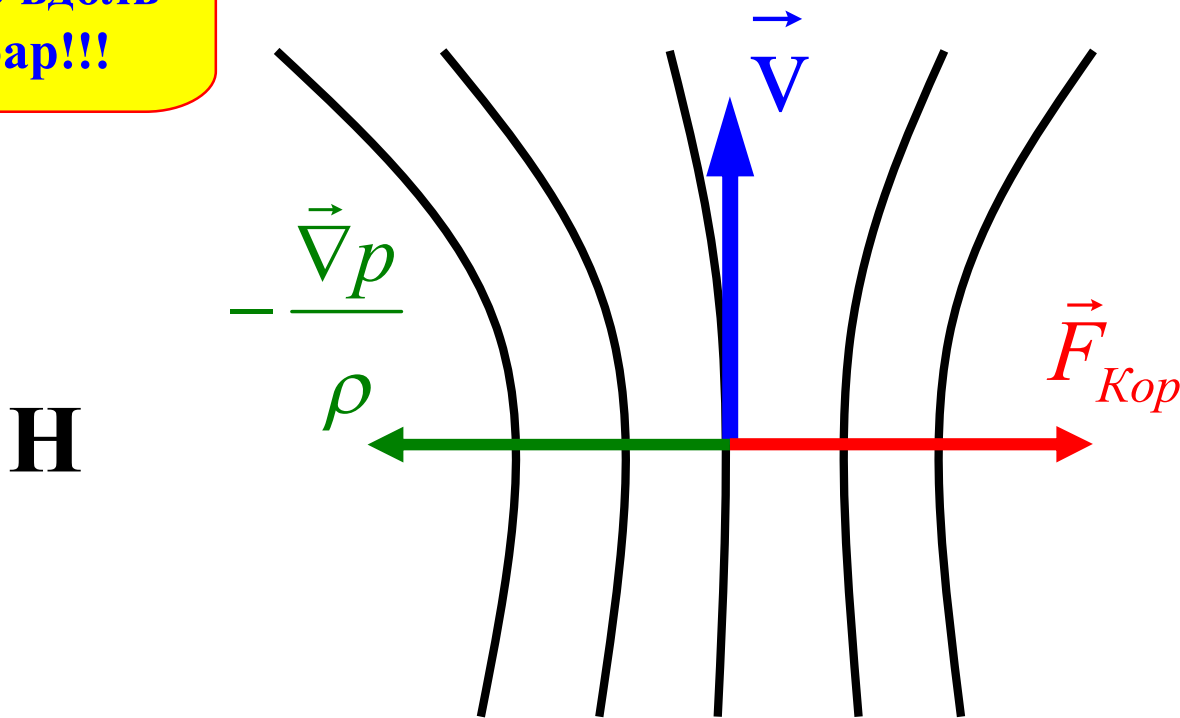
# Геострофическое течение (Градиентное течение)



# Геострофический ветер

(Сев. полушарие)

Движение  
строго вдоль  
изобар!!!



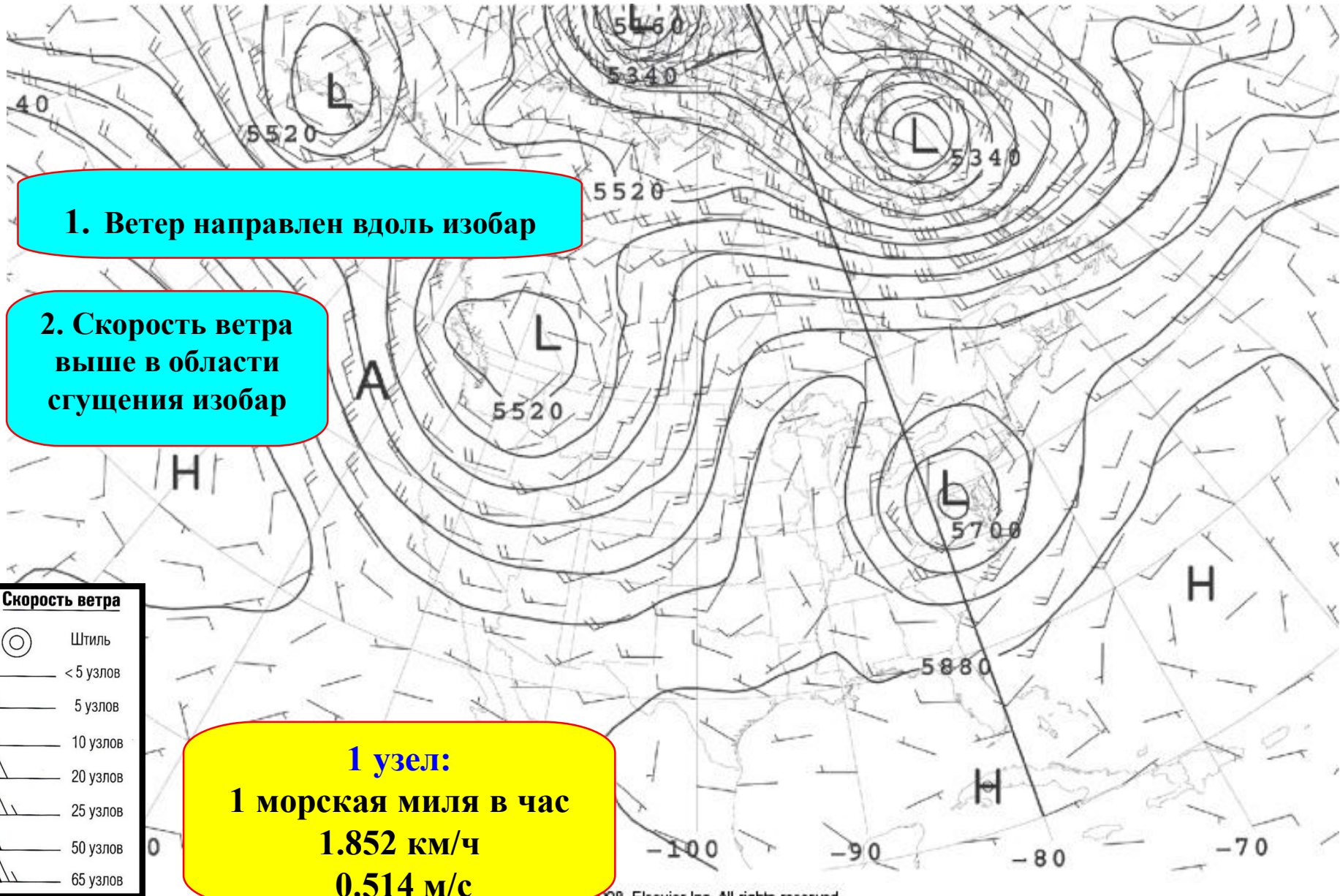
Правило Бейс-Балло, 1857 (Бёйс-Баллот):

*«Если в северном полушарии вы встанете спиной к ветру, зона депрессии будет слева от вас, а в южном полушарии – наоборот»*

Христофор Бёйс-  
Баллот  
1817-1890  
голландский  
метеоролог



# Поля атмосферного давления (изолинии) и скорости ветра на высоте 500 мбар ( $\approx 5.5$ км)



1. Ветер направлен вдоль изобар

2. Скорость ветра выше в области сгущения изобар

Скорость ветра	
	Штиль
	< 5 узлов
	5 узлов
	10 узлов
	20 узлов
	25 узлов
	50 узлов
	65 узлов

1 узел:  
1 морская миля в час  
1.852 км/ч  
0.514 м/с

# «Геофизические» приближения:

## 3. Циклострофическое приближение

$$\frac{v^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = 0$$

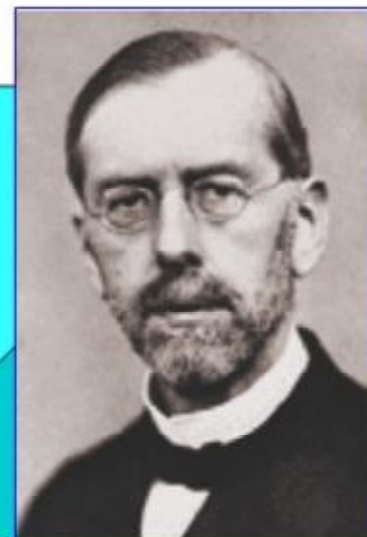
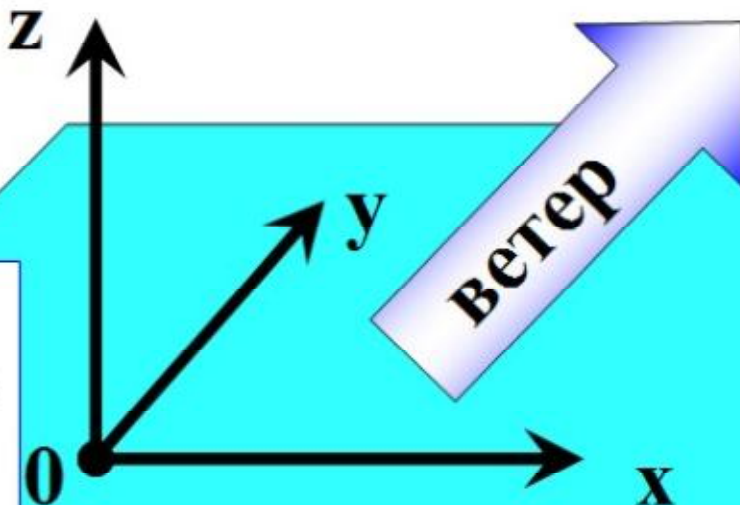


# Задача Экмана о дрейфовом течении

течение, вызываемое ветром



*Fridtjof Wedel-Jarlsberg Nansen*  
(1861 –1930)  
Norwegian scientist



*Vagn Walfrid Ekman*  
(1874-1954), a  
Swedish physical  
oceanographer

Задача поставлена Фритъофом Нансеном, который наблюдал необычный дрейф льда во время экспедиции на борту «Фрама» в Гренландском море

# Предположения:

• стационарно  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

• однородно и безгранично  
по горизонтали  $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0$

•  $\rho = \text{const}$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0, \quad \rho = \text{const}$$

$$\cancel{\frac{\partial \rho}{\partial t}} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{div} \vec{v} = 0$$

$$\cancel{\frac{\partial u}{\partial x}} + \cancel{\frac{\partial v}{\partial y}} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$w = \text{const}$$

$$w(z = -H) = 0 \quad \Rightarrow \quad w = 0$$

$$\cancel{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}} + \cancel{(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho_0} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}$$

$$x: \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$y: \quad u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$z: \quad u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\cancel{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}} + \cancel{(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \cancel{-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}} + 2\nu\omega \sin \varphi + \nu \left( \cancel{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0, \\ \cancel{-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}} - 2u\omega \sin \varphi + \nu \left( \cancel{\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = 0, \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 2v\omega \sin \varphi + v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0 \\
 -2u\omega \sin \varphi + v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = 0 \\
 -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \quad \Rightarrow \quad p(z) = p_{\text{atm}} - \rho g z
 \end{array} \right.$$



$$\begin{cases} f v + v \frac{d^2 u}{dz^2} = 0 \\ -f u + v \frac{d^2 v}{dz^2} = 0 \end{cases}$$

Система  
обыкновенных  
дифференциальных  
уравнений

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

# Граничные условия

Поверхность воды:

Поведение решения  
на глубине:

$$\rho \nu \frac{du}{dz} \Big|_{z=0} = 0$$

$$u_{z \rightarrow -\infty} = 0$$

$$\rho \nu \frac{dv}{dz} \Big|_{z=0} = \tau$$

$$v_{z \rightarrow -\infty} = 0$$

Напряжение  
трения ветра

# Решение (спираль Экмана)

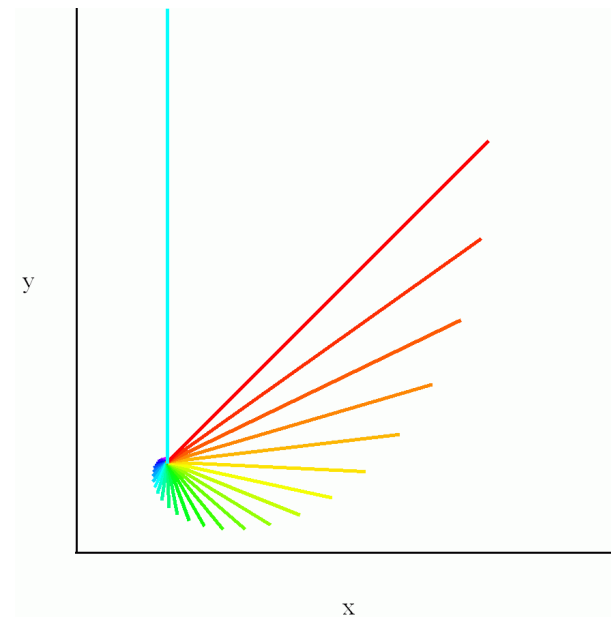
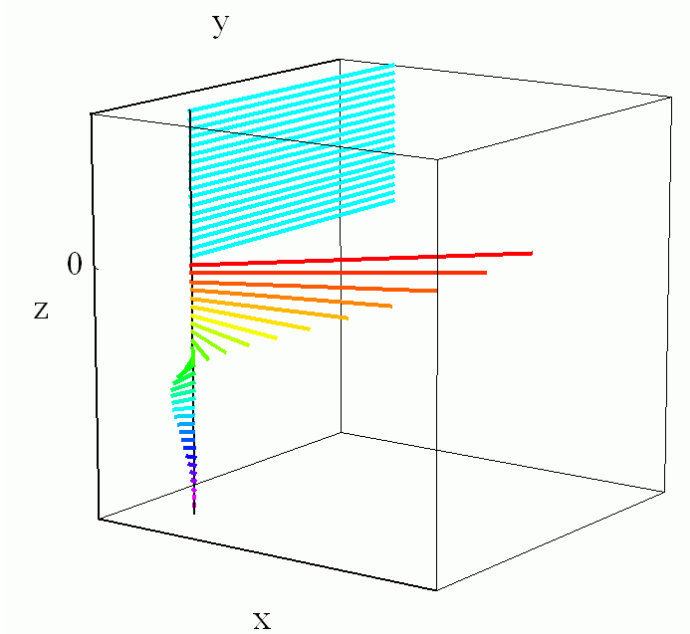
$$u(z) = V_0 e^{z/d} \cos(z/d + \pi/4)$$

$$v(z) = V_0 e^{z/d} \sin(z/d + \pi/4)$$

$$V_0 = \frac{\tau d}{\sqrt{2} \rho \nu}$$

$$d = \sqrt{\frac{2\nu}{f}} = \sqrt{\frac{\nu}{\omega \sin \varphi}}$$

глубина  
Экмана или  
глубина  
трения



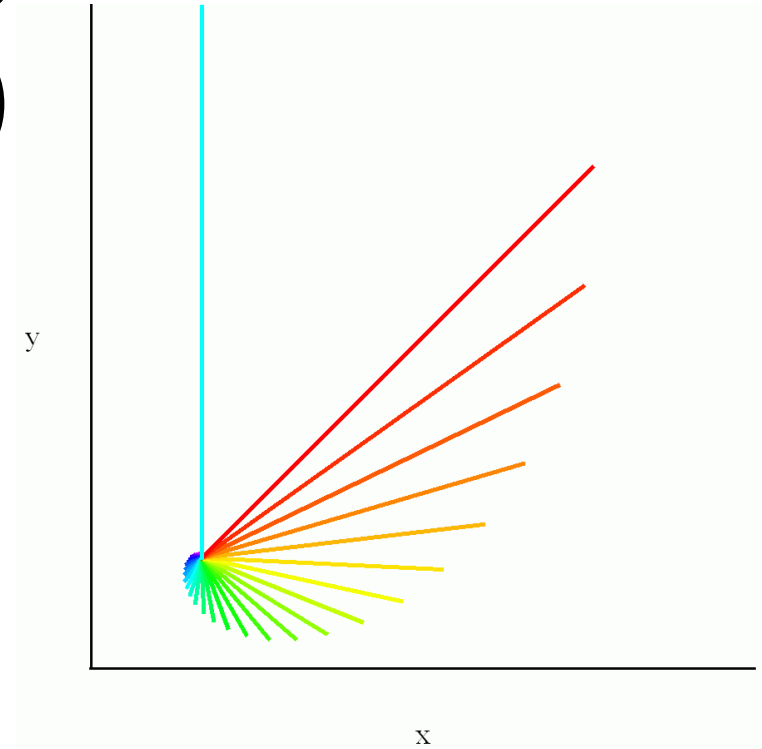
# Направление интегрального переноса вод

$$u(z) = V_0 e^{z/d} \cos(z/d + \pi/4)$$

$$v(z) = V_0 e^{z/d} \sin(z/d + \pi/4)$$

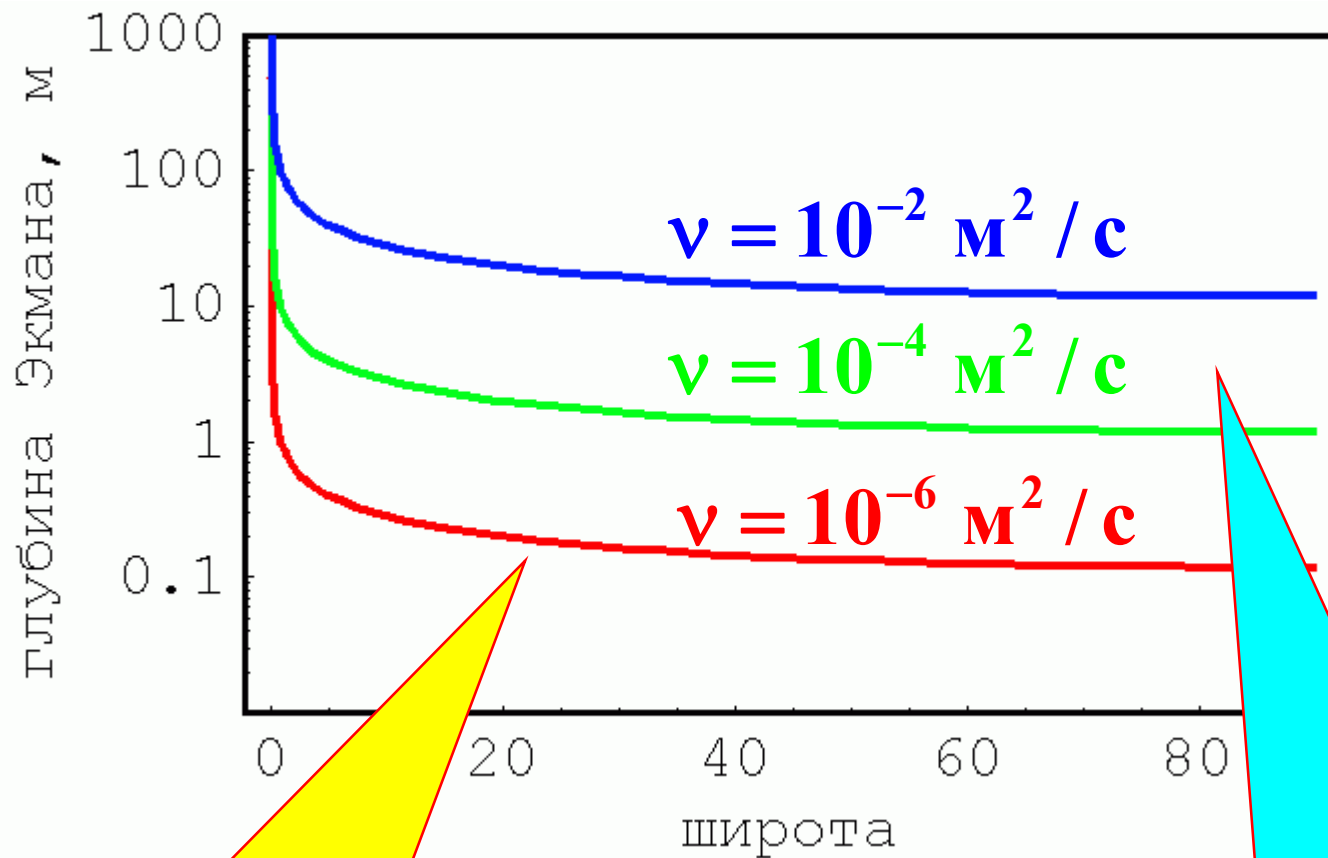
$$\int_{-\infty}^0 u(z) dz = \frac{V_0 d}{\sqrt{2}} > 0$$

$$\int_{-\infty}^0 v(z) dz = 0$$



**Интегральный перенос вод  
перпендикулярен направлению ветра!!!**

Глубина Экмана  $d = \sqrt{\frac{\nu}{\omega \sin \varphi}}$



молекулярная вязкость

турбулентная вязкость

# Влияние глубины океана на течение Экмана

$$\begin{cases} f v + \nu \frac{d^2 u}{dz^2} = 0 \\ -f u + \nu \frac{d^2 v}{dz^2} = 0 \end{cases}$$

Граничные условия:

*поверхность*

$$\rho \nu \left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = 0$$

$$\rho \nu \left. \frac{dv}{dz} \right|_{z=0} = \tau$$

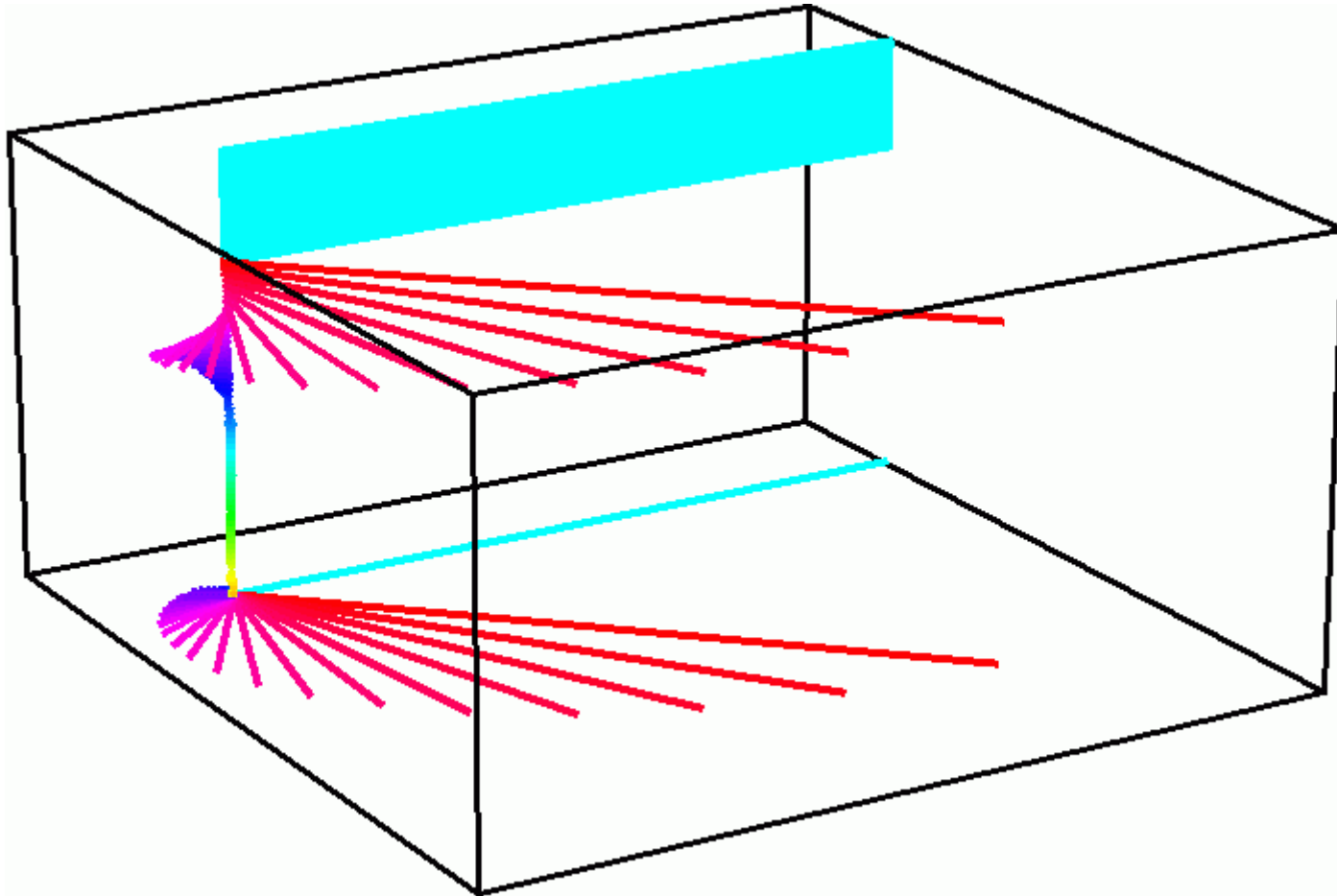
*дно*

$$u(-H) = 0$$

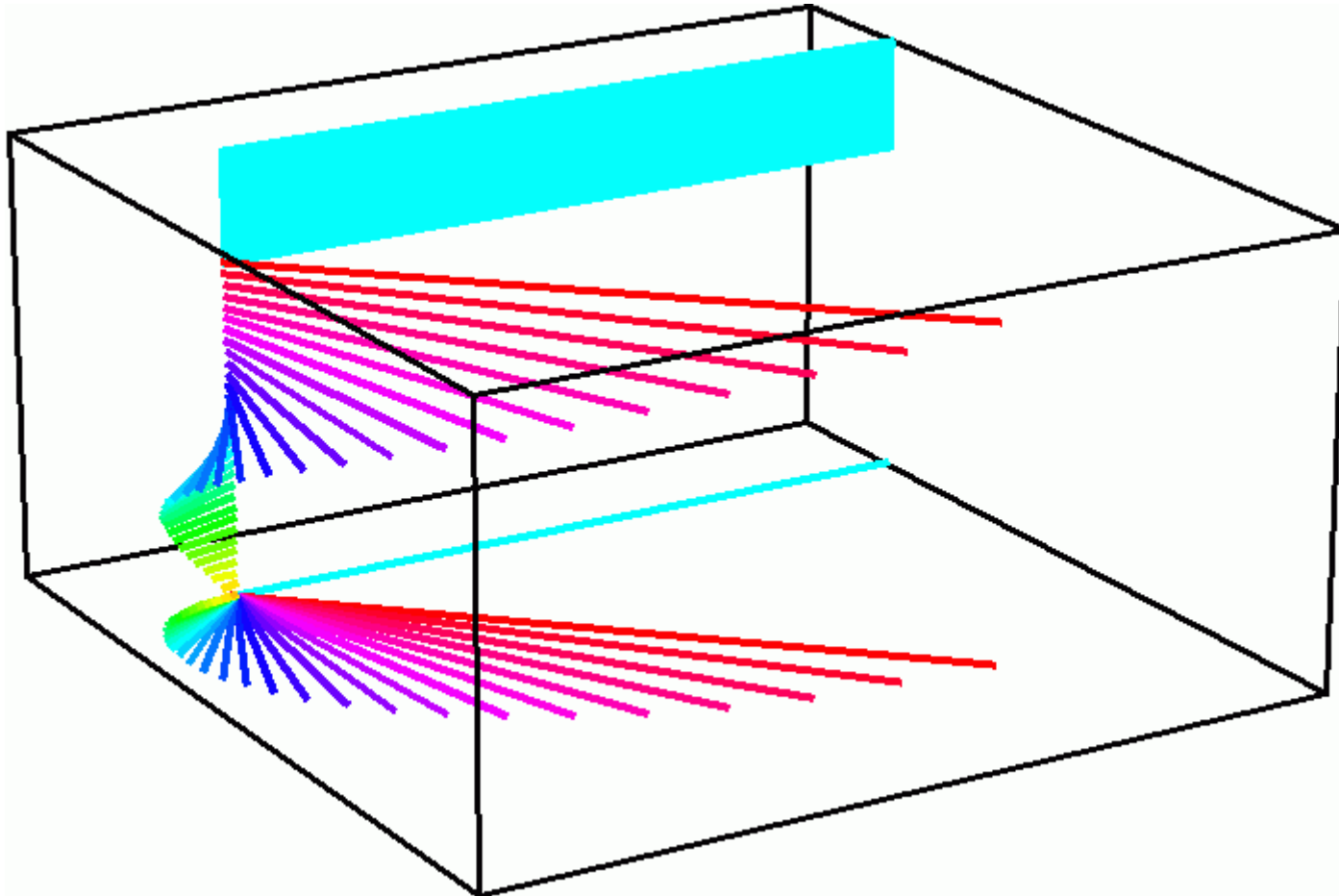
$$v(-H) = 0$$

**условие прилипания**

**H=10d**

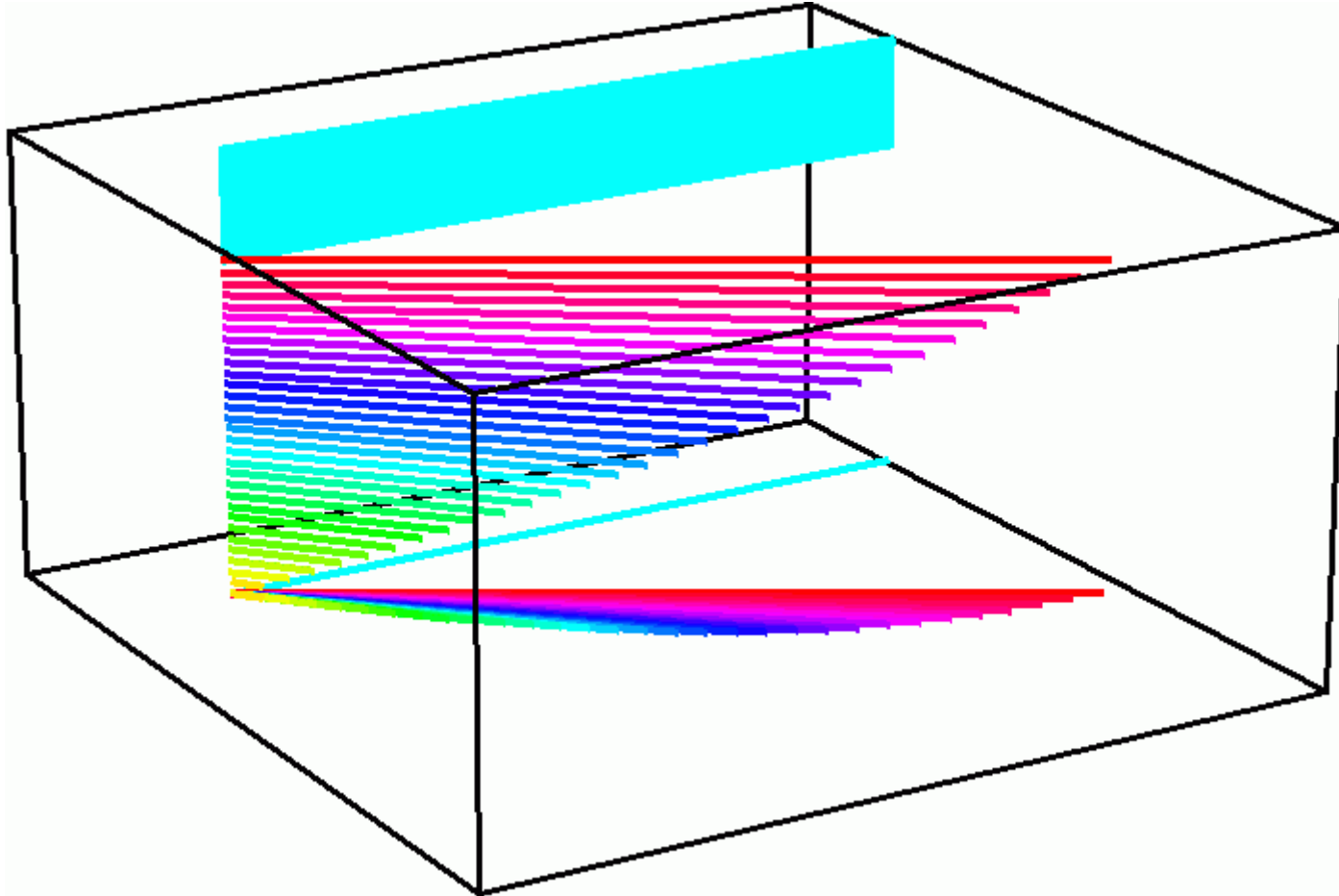


$H=3d$

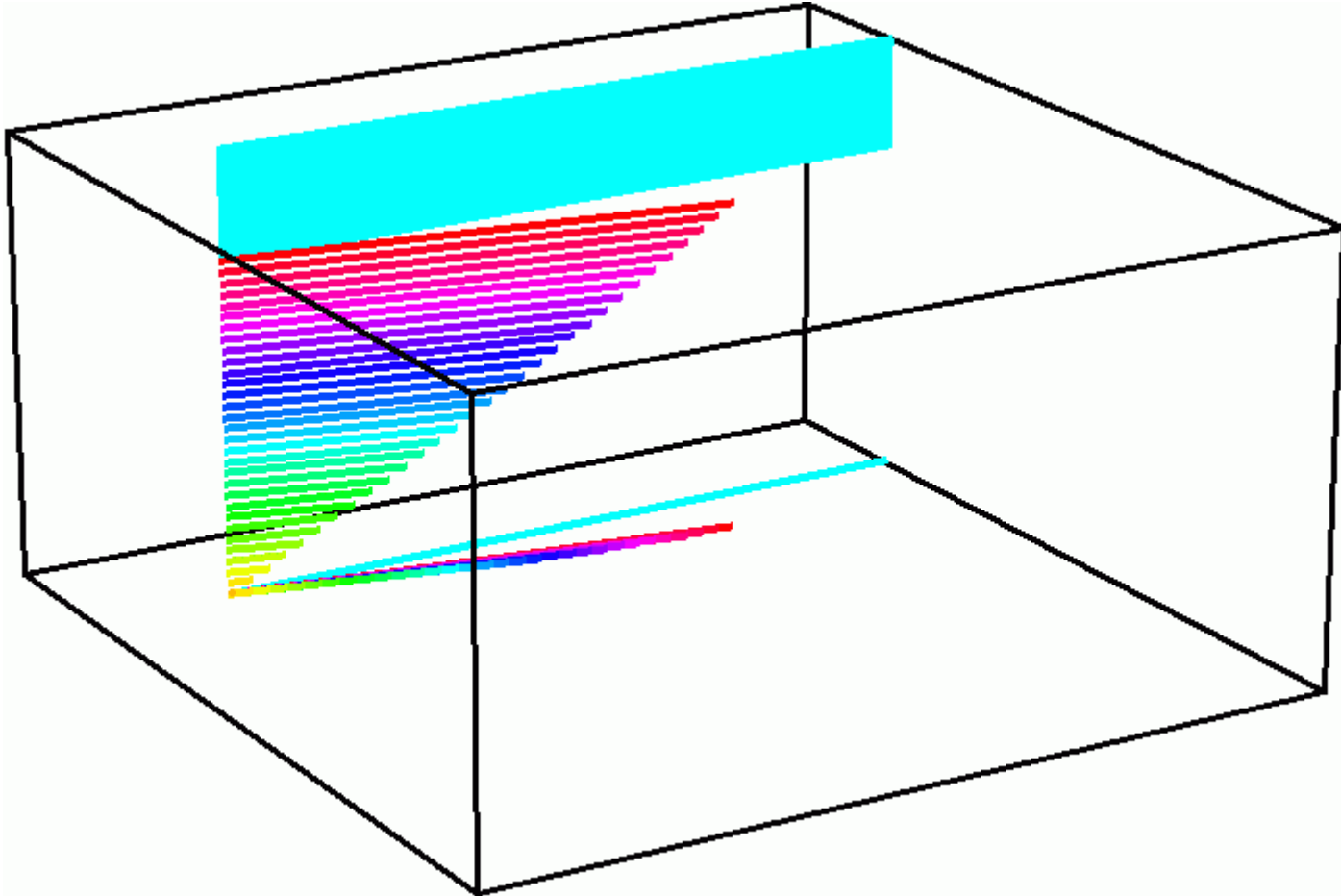




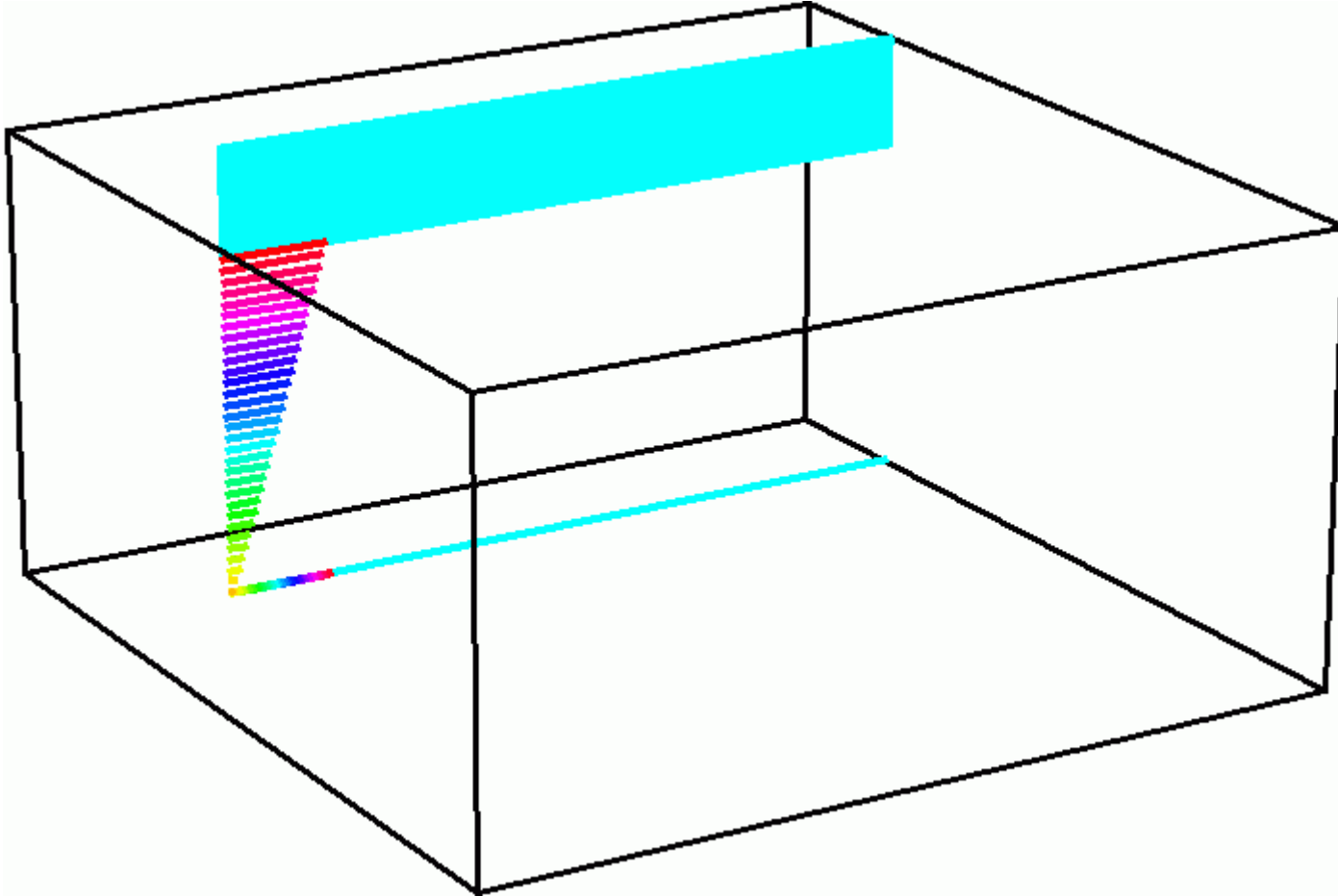
$$H=d$$



$$H=d/2$$



$$H=d/10$$

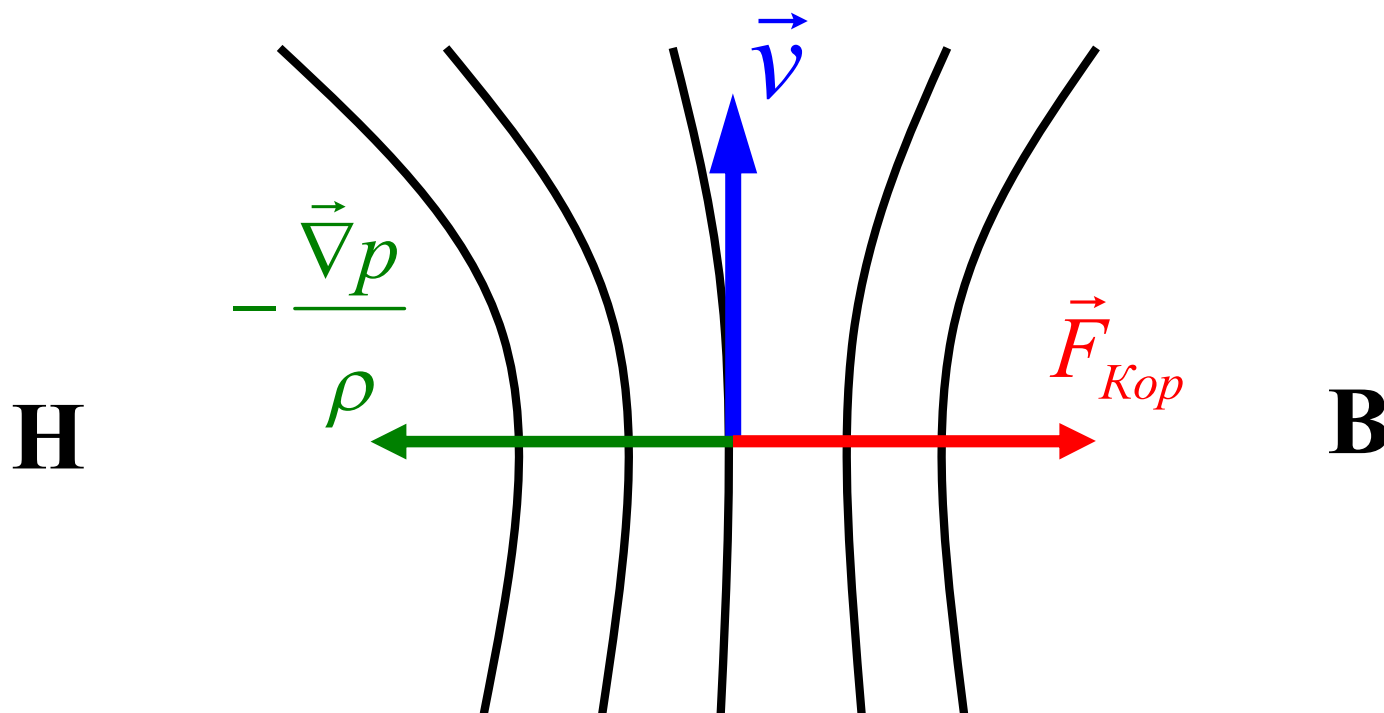


A satellite image of a cyclone over the ocean. The cyclone is a large, circular storm system with a distinct eye in the center, surrounded by dense, swirling clouds. The surrounding ocean is dark blue, and the sky is filled with white and grey clouds. The text is overlaid on the left side of the image.

**ЦИКЛОНЫ И  
АНТИЦИКЛОНЫ  
(СИНОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ)**

# Геострофический ветер/течение

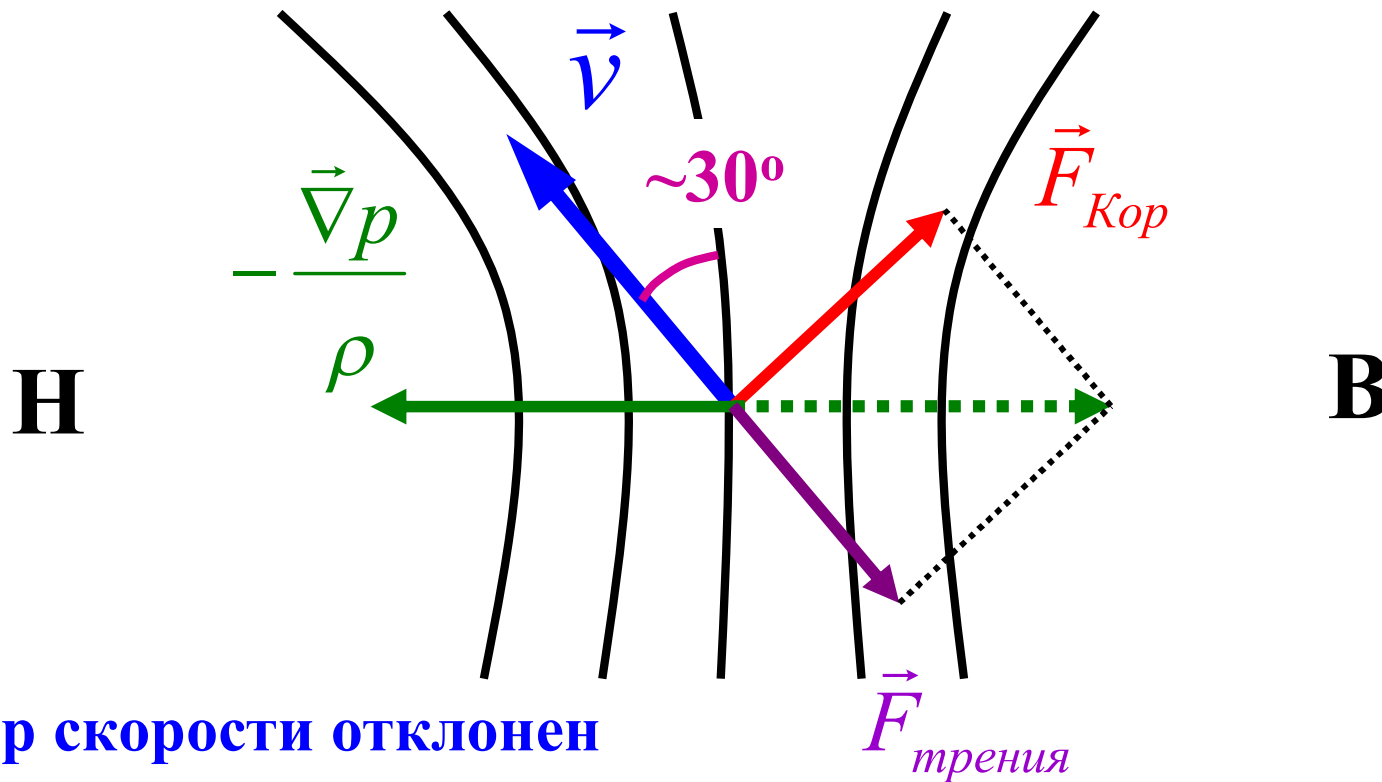
(Сев. полушарие)



**Движение строго  
вдоль изобар!!!**

# Ветер/течение с учетом сил трения

(Сев. полушарие)

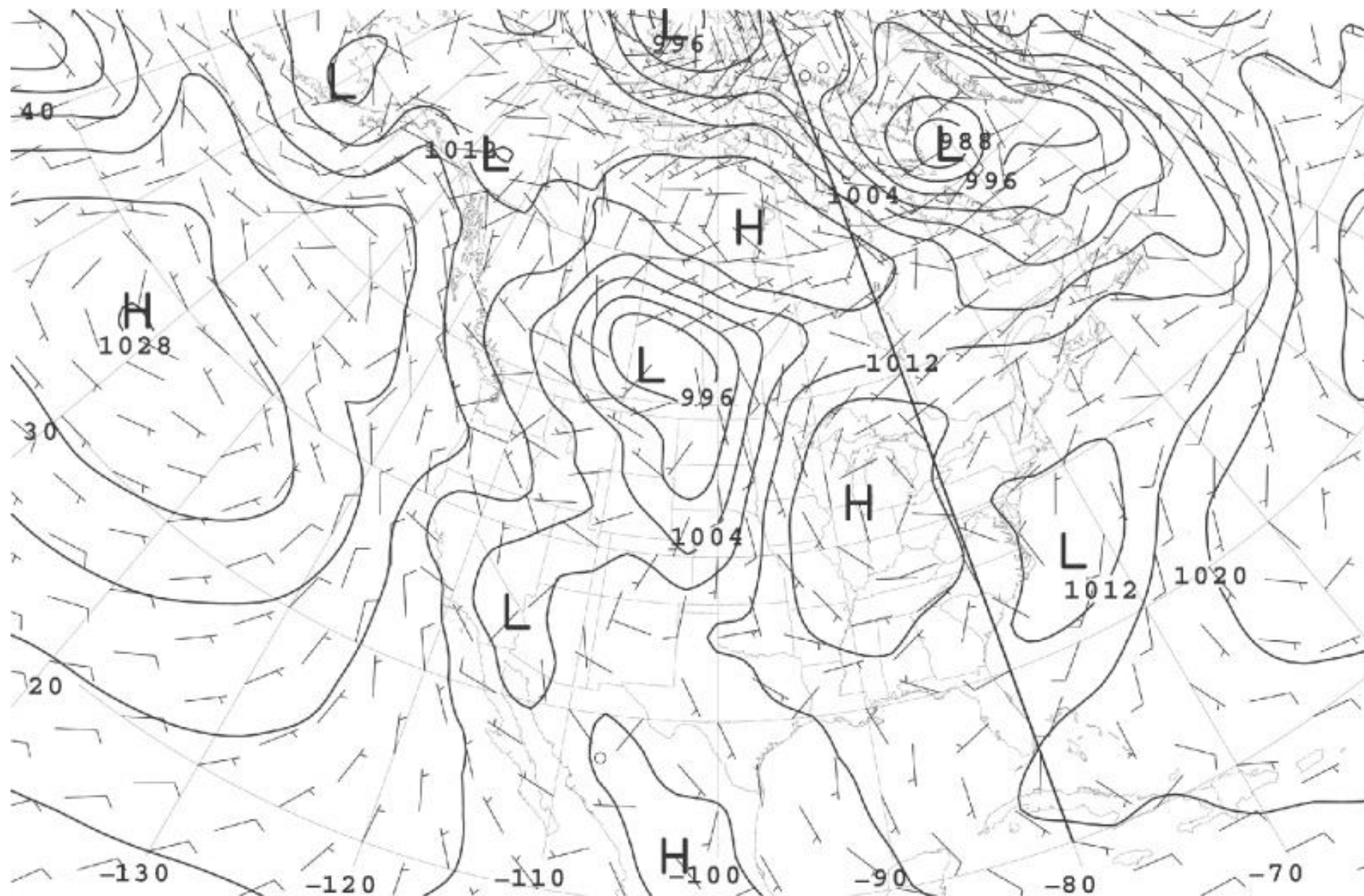


Вектор скорости отклонен  
влево от изобары

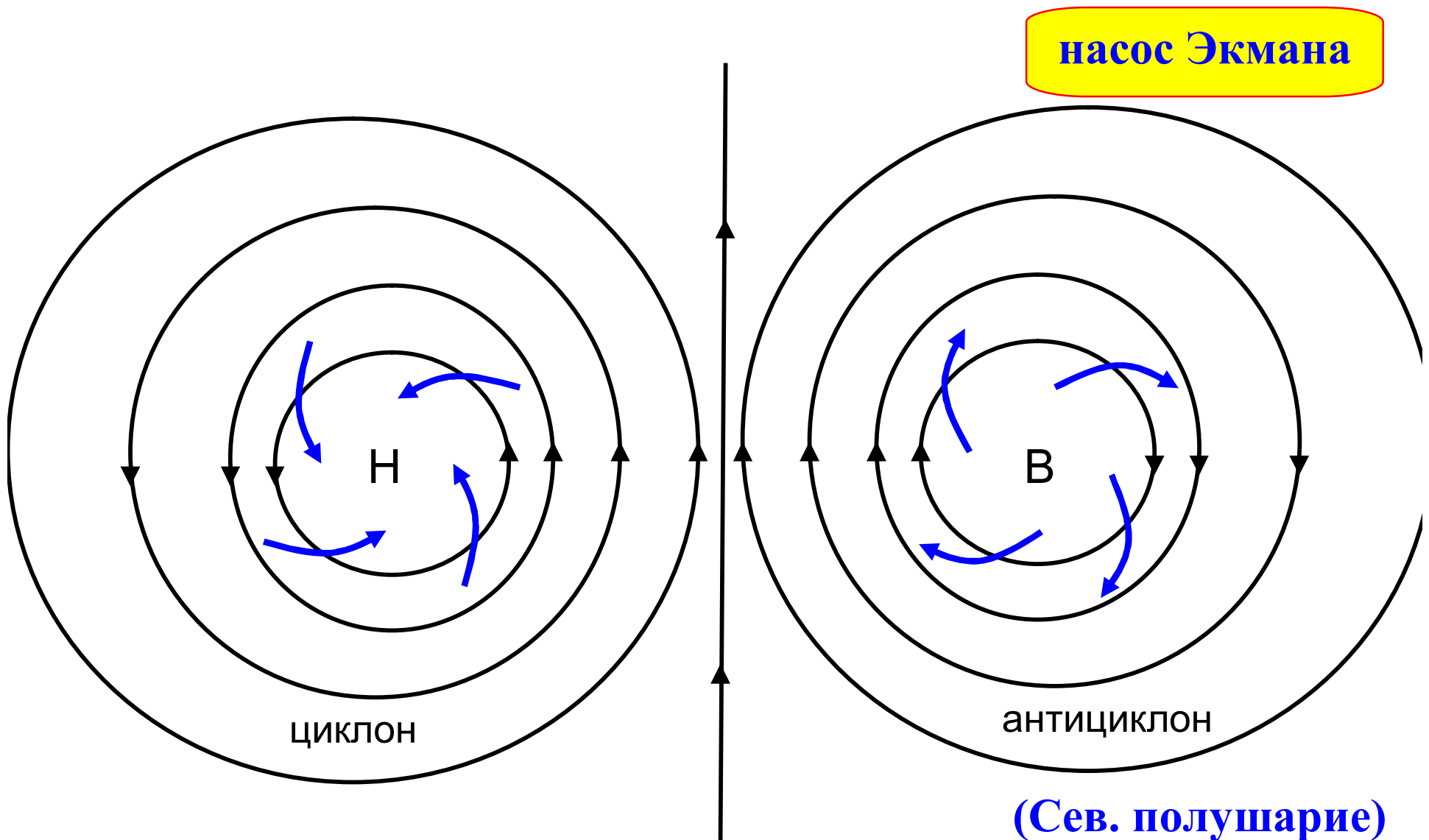
Отклонение существенно до  
высот  $\sim 1500$  м

Отклонение у поверхности  
земли  $\sim 30^\circ$

# Поля атмосферного давления (изолинии) и скорости ветра у поверхности земли



**У поверхности земли, где сила трения велика,  
происходит заток воздуха в область низкого давления  
и отток воздуха из области высокого давления**

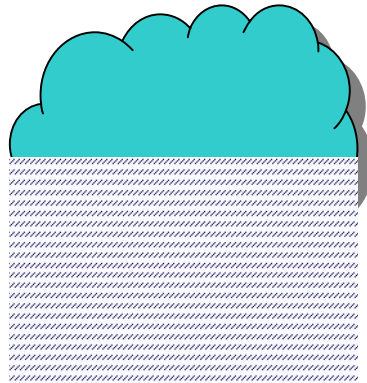




# Синоптические вихри

## ЦИКЛОН

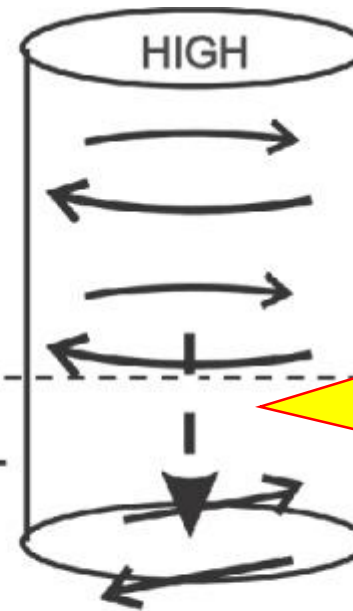
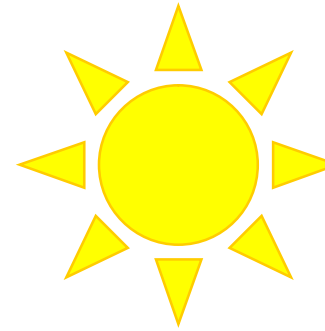
вращение  
против  
часовой  
стрелки  
(Сев.  
полушарие)



Восходящий  
поток со  
скоростями  
сотни м/сут

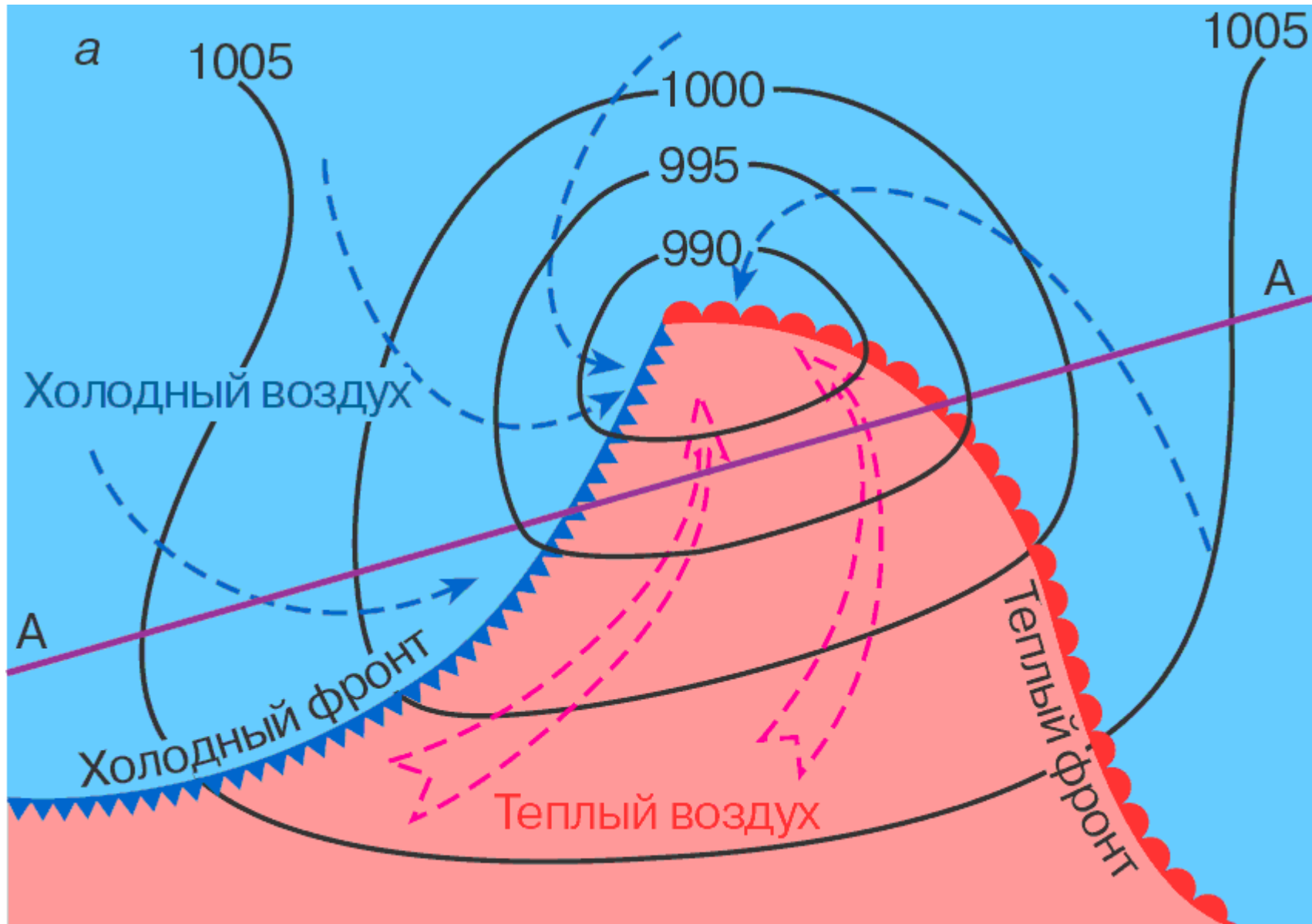
## АНТИЦИКЛОН

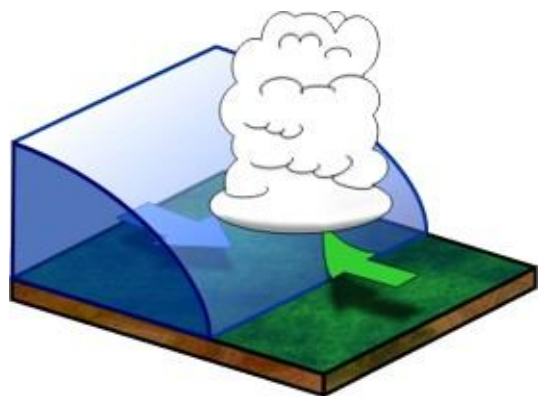
вращение по  
часовой  
стрелке  
(Сев.  
полушарие)



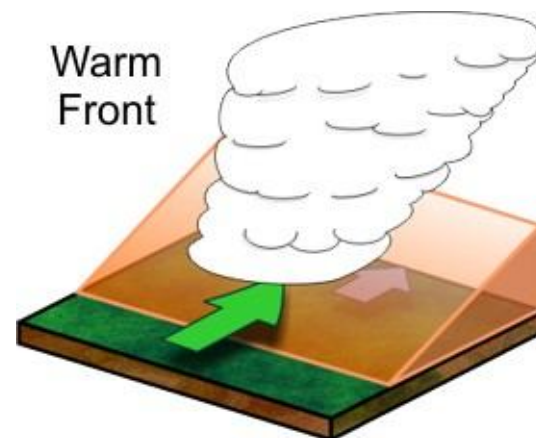
Нисходящий  
поток со  
скоростями  
от десятков  
до сотен  
м/сут

# Синоптические вихри - механизм междуширотного воздухообмена

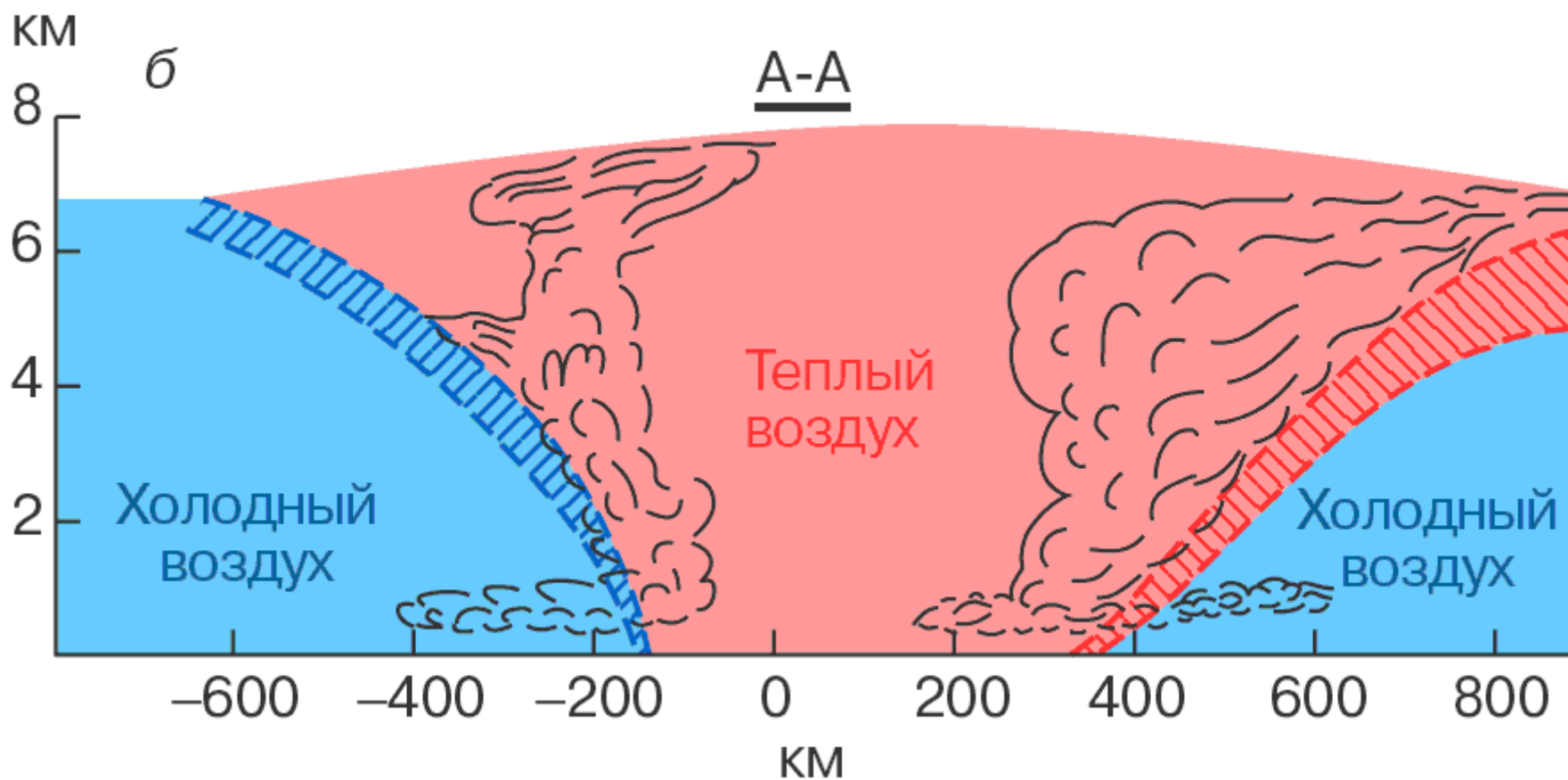




Cold Front



Warm Front



# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №7

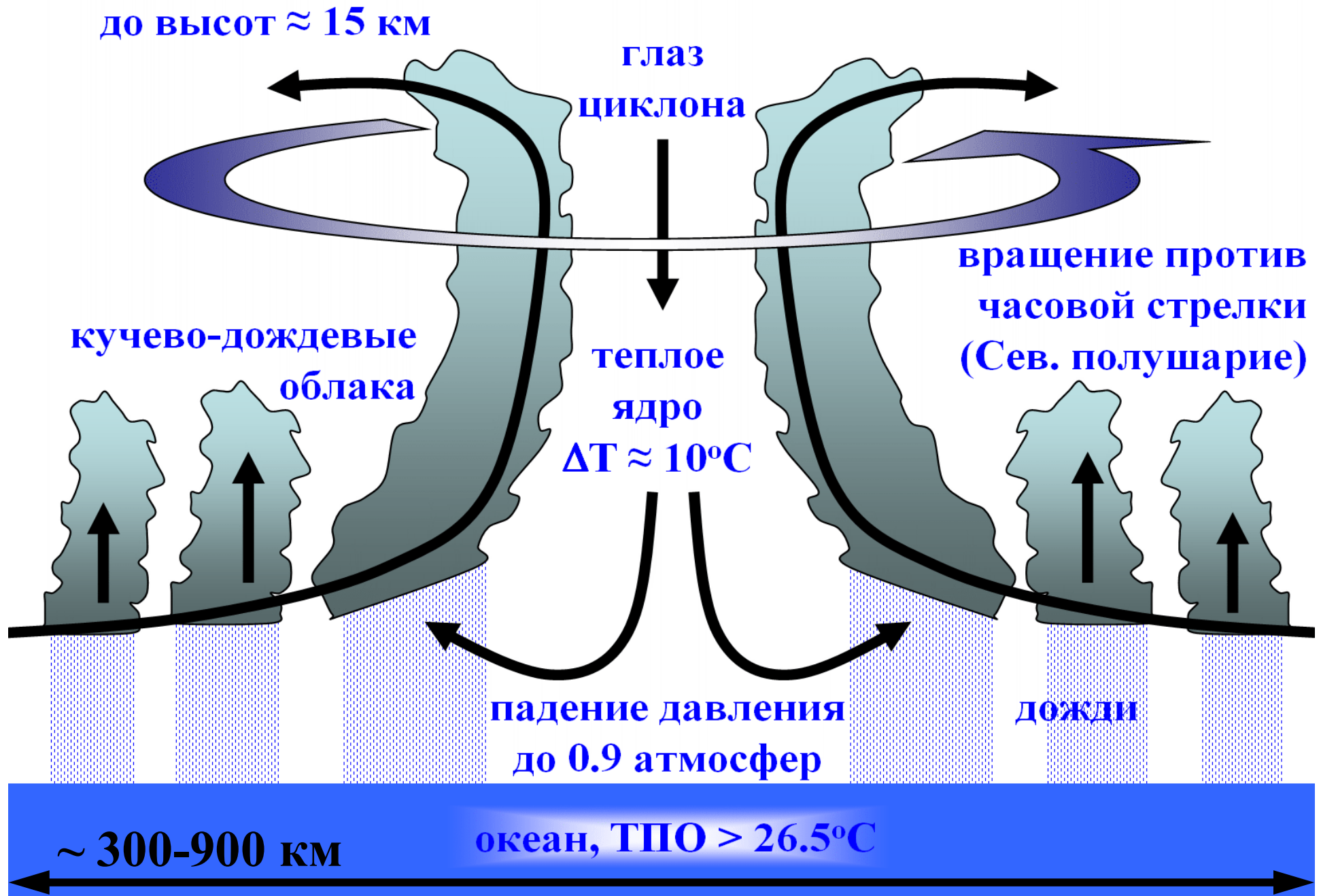
---

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

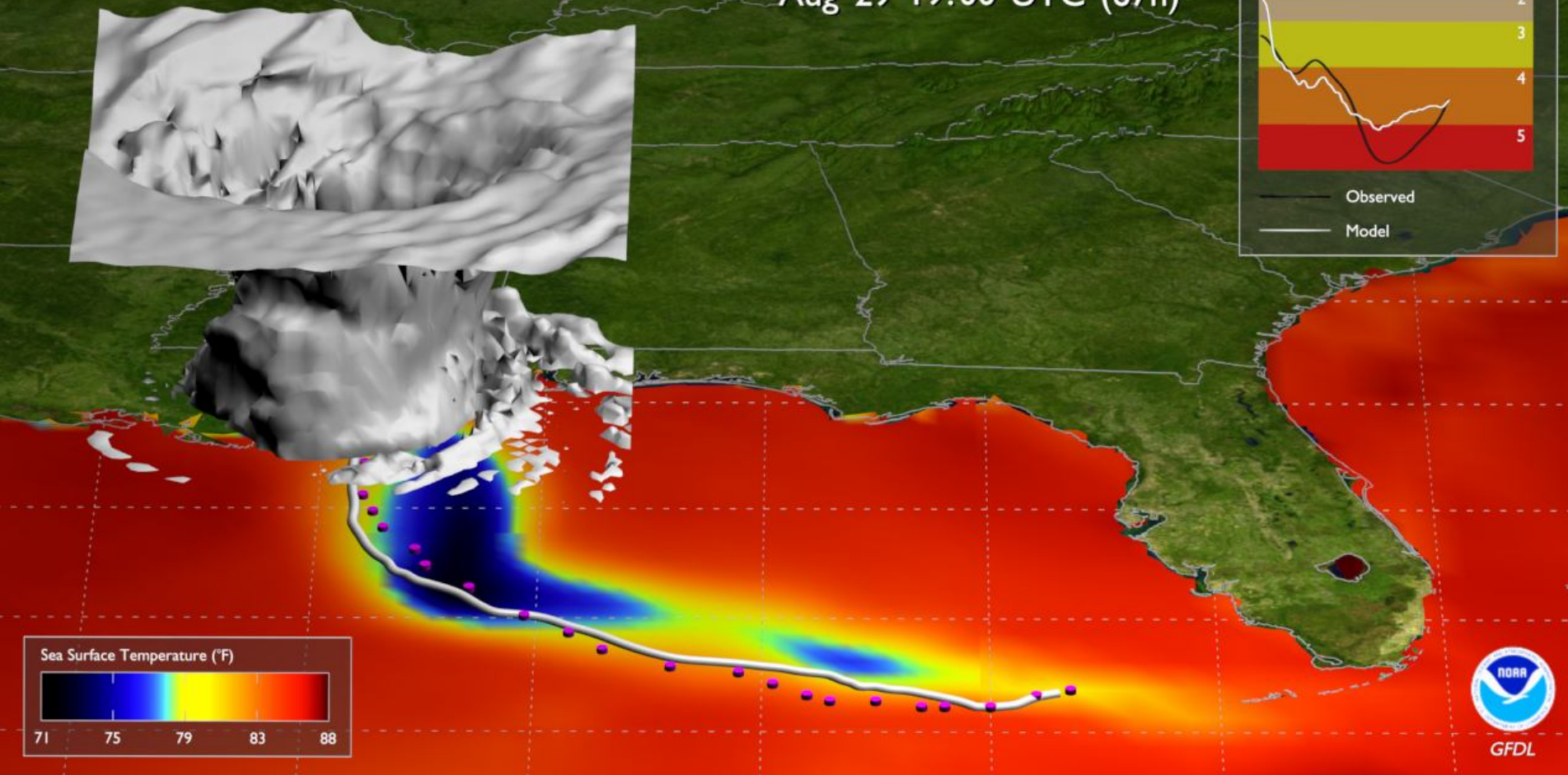
*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

# Схема тропического циклона



# Hurricane Katrina Coupled Model Forecast

Aug 29 19:00 UTC (67h)



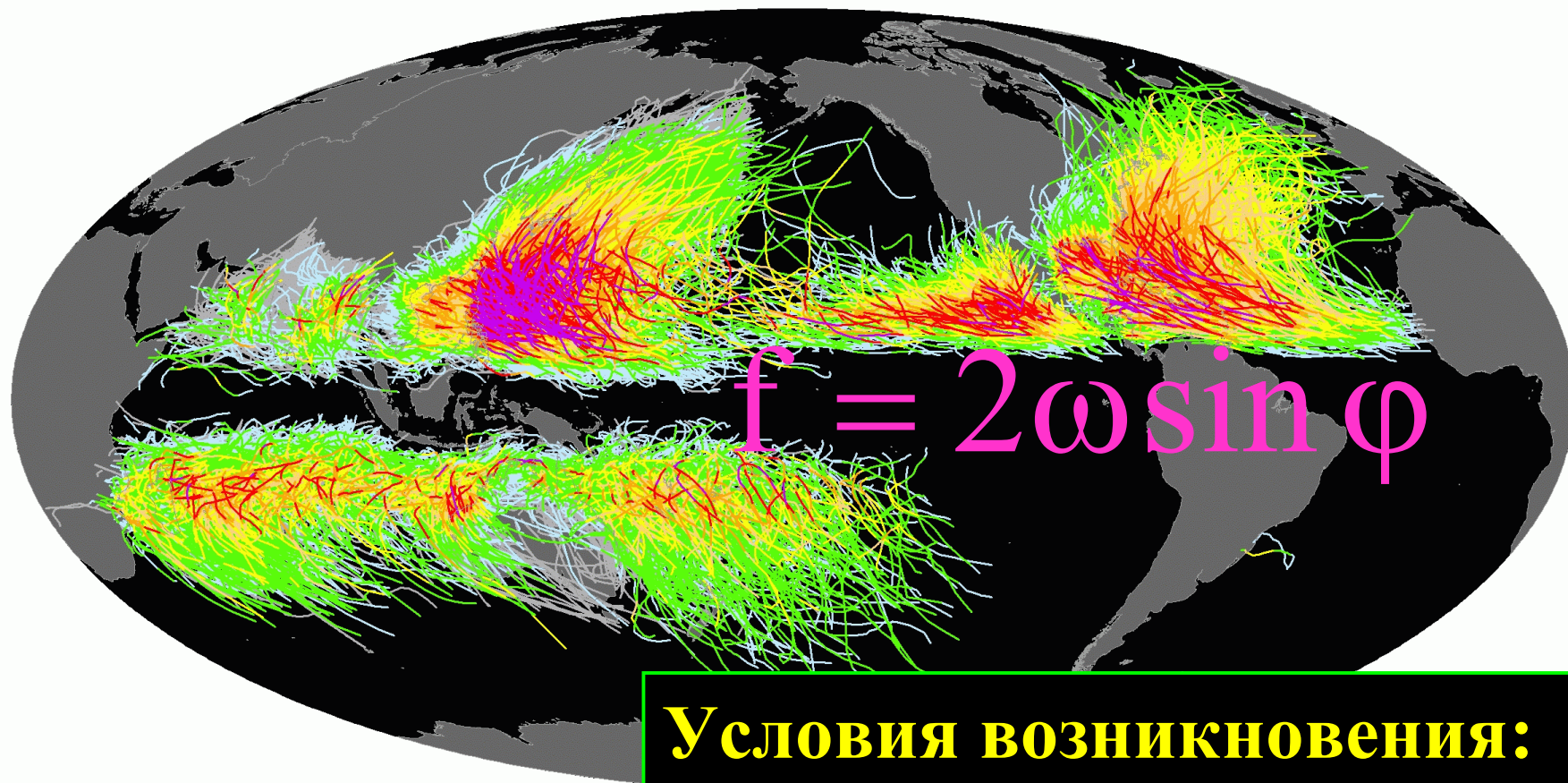
**+ обратная связь:**

**«ветер –**

**ПОТОК ЯВНОГО И СКРЫТОГО ТЕПЛА С ПОВ-ТИ ОКЕАНА»**

# Треки всех известных к 2010 г. тропических циклонов

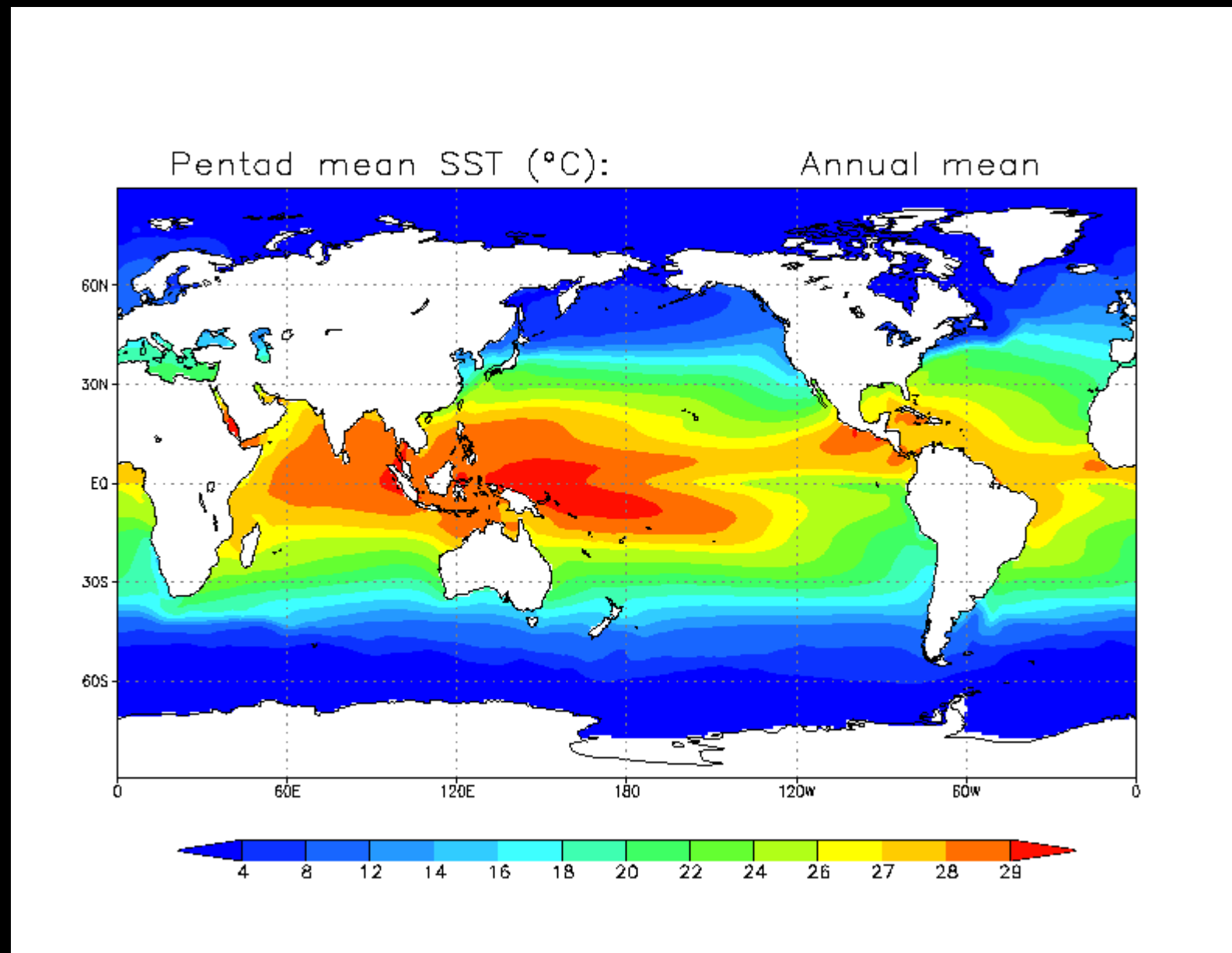
<http://www.climatewatch.noaa.gov/>



## Условия возникновения:

- ☐ широты выше 5-10°
- ☐ ТПО > 26.5 °C

# Температура поверхности океана (ТПО)





# Шкала ураганов Саффира — Симпсона

Категория	Скорость ветра, км/ч (м/с)	Штормовой нагон (м)
1	119- 153 (33-43)	1.2 - 1.5
2	154-177 (43-49)	1.8 – 2.4
3	178-208 (49-58)	2.7 – 3.7
4	209-251 (58-70)	4.0 – 5.5
5	≥ 251 (70)	> 5.5

«Оружие» тропического циклона:

- Ветер («...сделан из металла...»)
- Дожди (0.5 м за сутки и более)
- Волны (до 30 м)
- Штормовые нагоны

Общая  
циркуляция  
атмосферы и  
океана

# Местные ветры

## Бриз

## Муссон

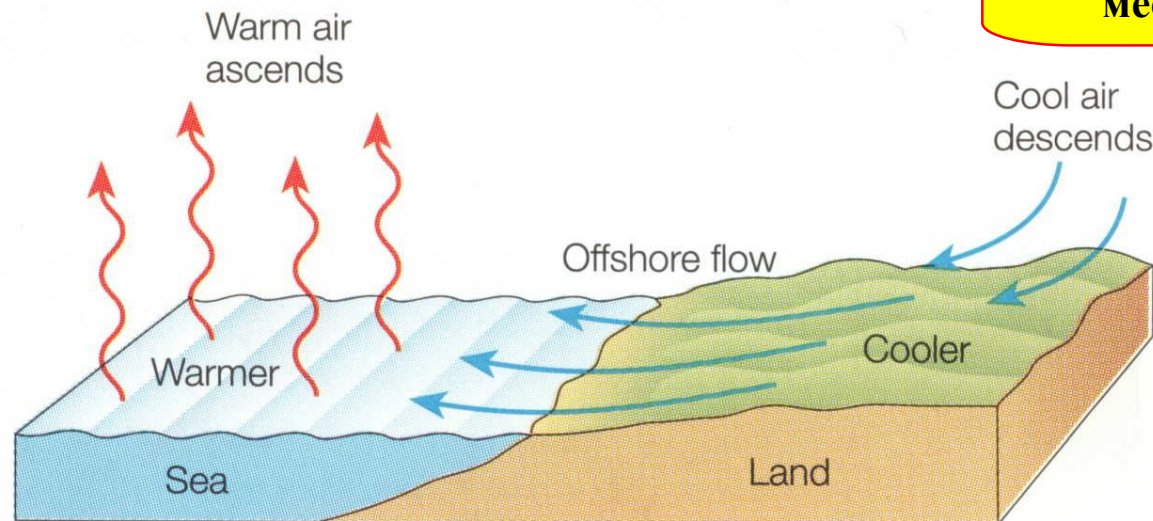
день



лето

Существуют и другие местные ветры

ночь

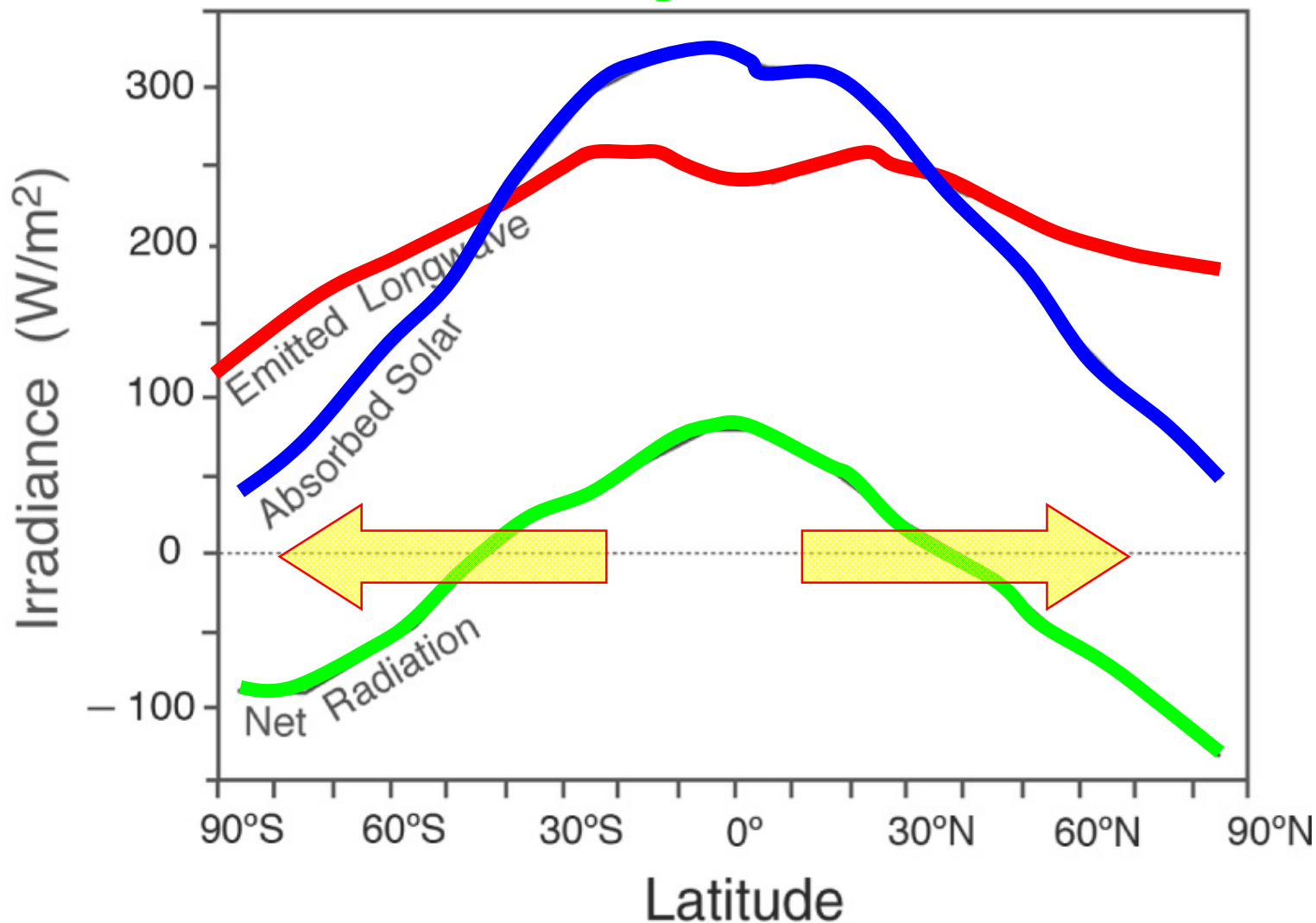


зима

a

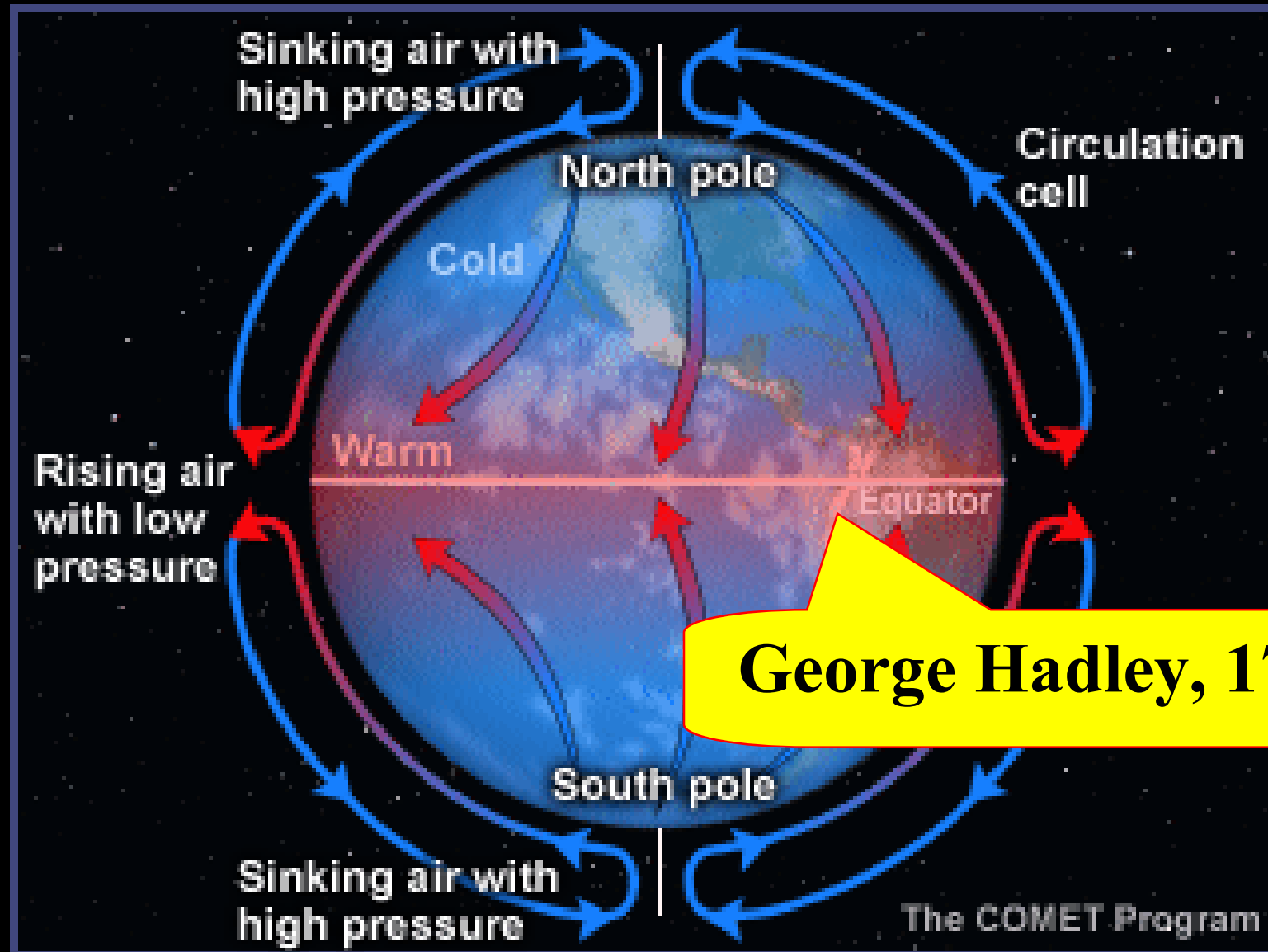
b

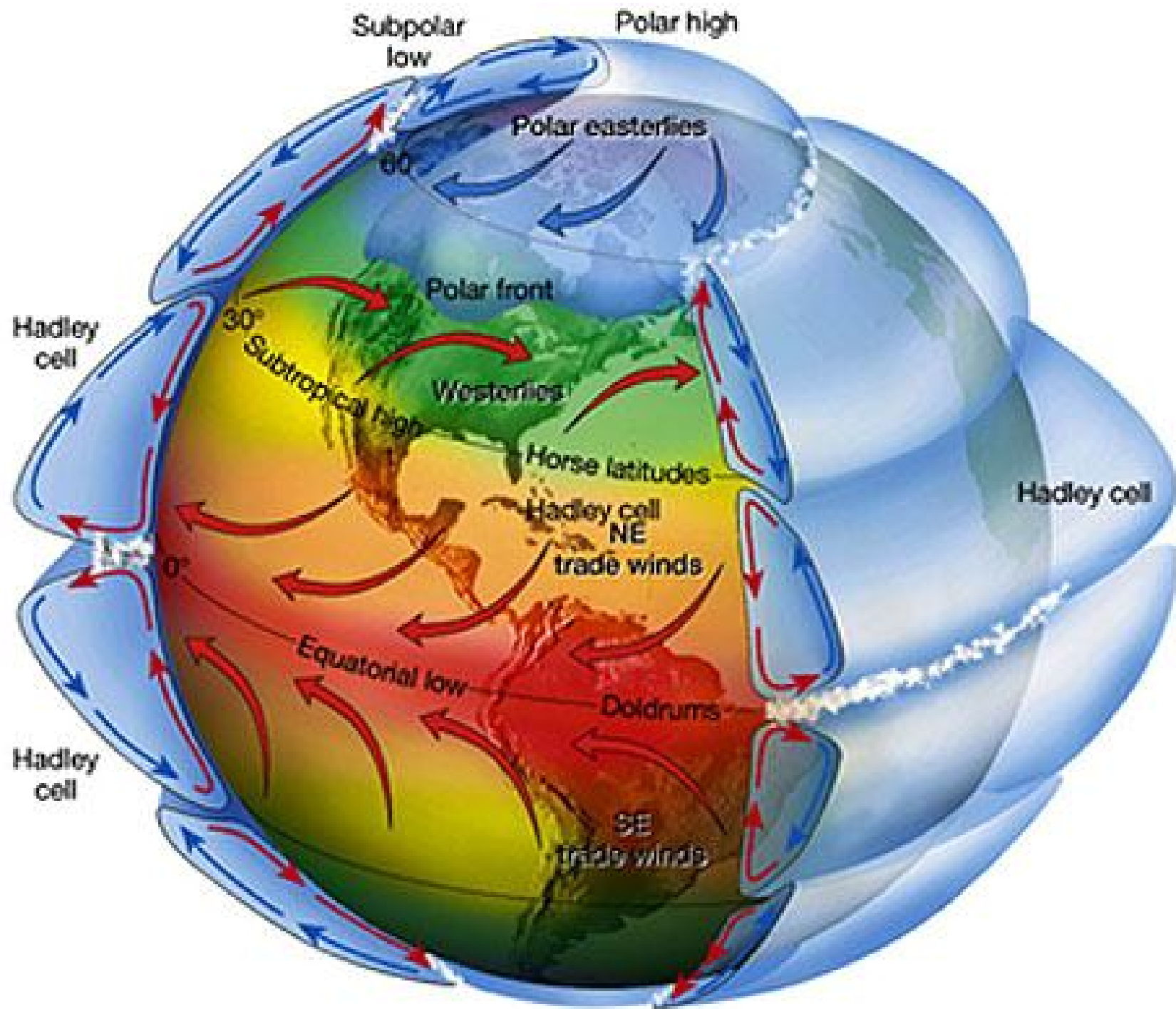
Среднегодовые широтные распределения радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ):  
поглощенной солнечной, излученной длинноволновой  
и их разница



Существует поток тепла от экватора к полюсам

# Упрощенная модель циркуляции атмосферы





Струйное течение (до 100 м/с)

Попытки «боевого»  
применения во время 2-й  
мировой войны



Слабый  
восточный  
перенос

Западный  
перенос

Зона  
пассатов

Пояс низкого  
давления

Конские широты

Пояс высокого  
давления

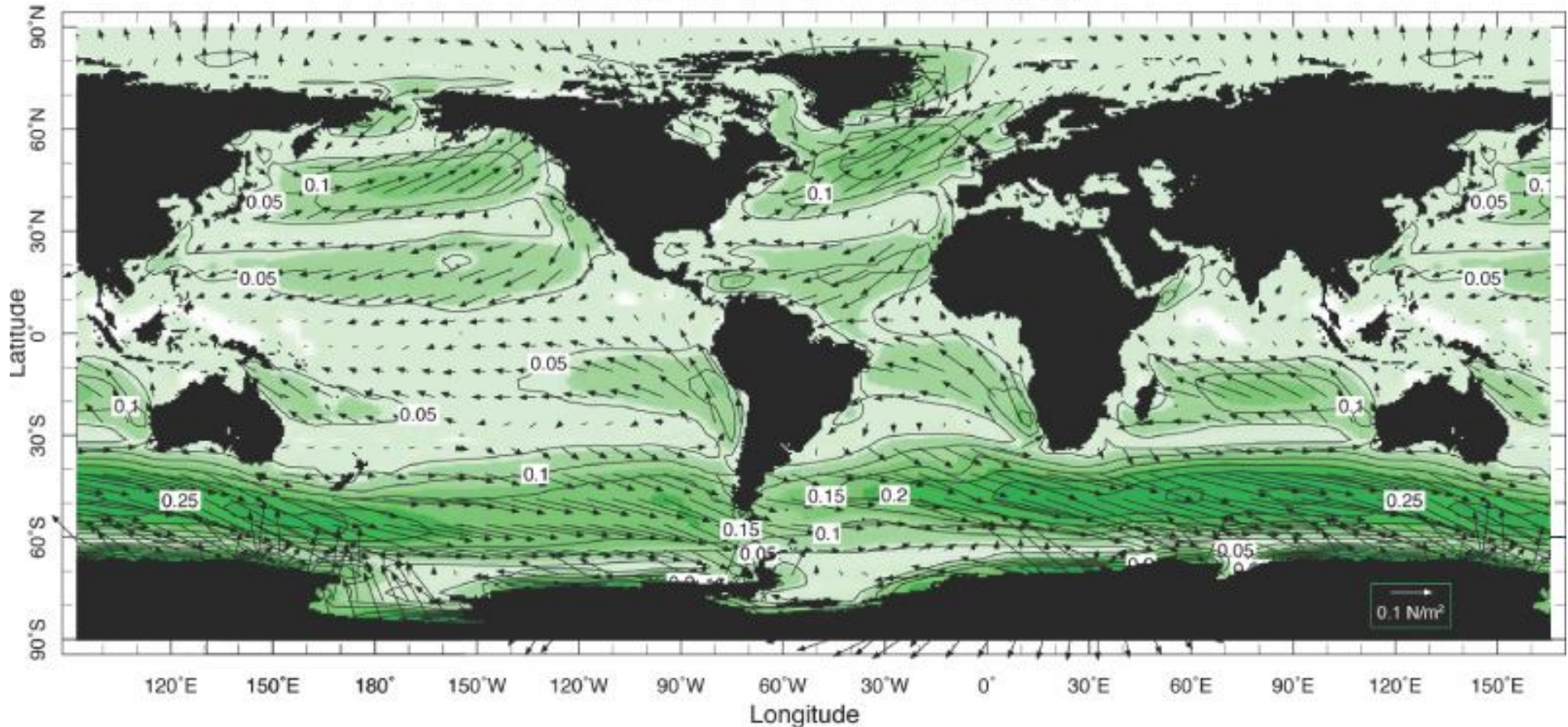
Внутритропическая  
зона конвергенции

## Напряжения трения ветра, действующее на поверхность океана

$$\vec{\tau} = C \rho_{\text{атм}} \left| \vec{V} \right| \vec{V}, \quad C \approx 0.0025$$

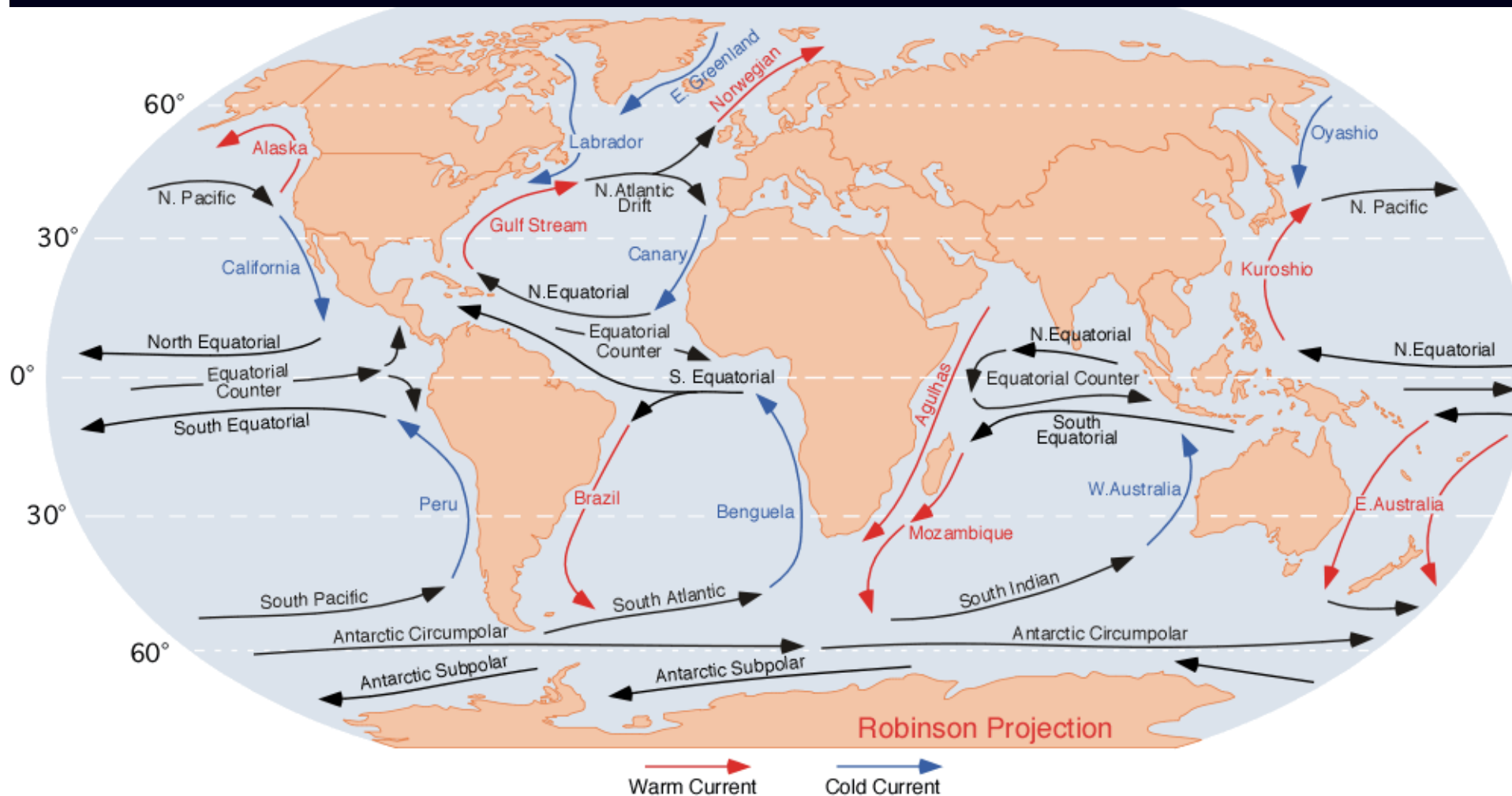
## Среднегодовое распределение напряжения трения ветра (Н/м<sup>2</sup>)

Surface Wind Stress (N/m<sup>2</sup>)

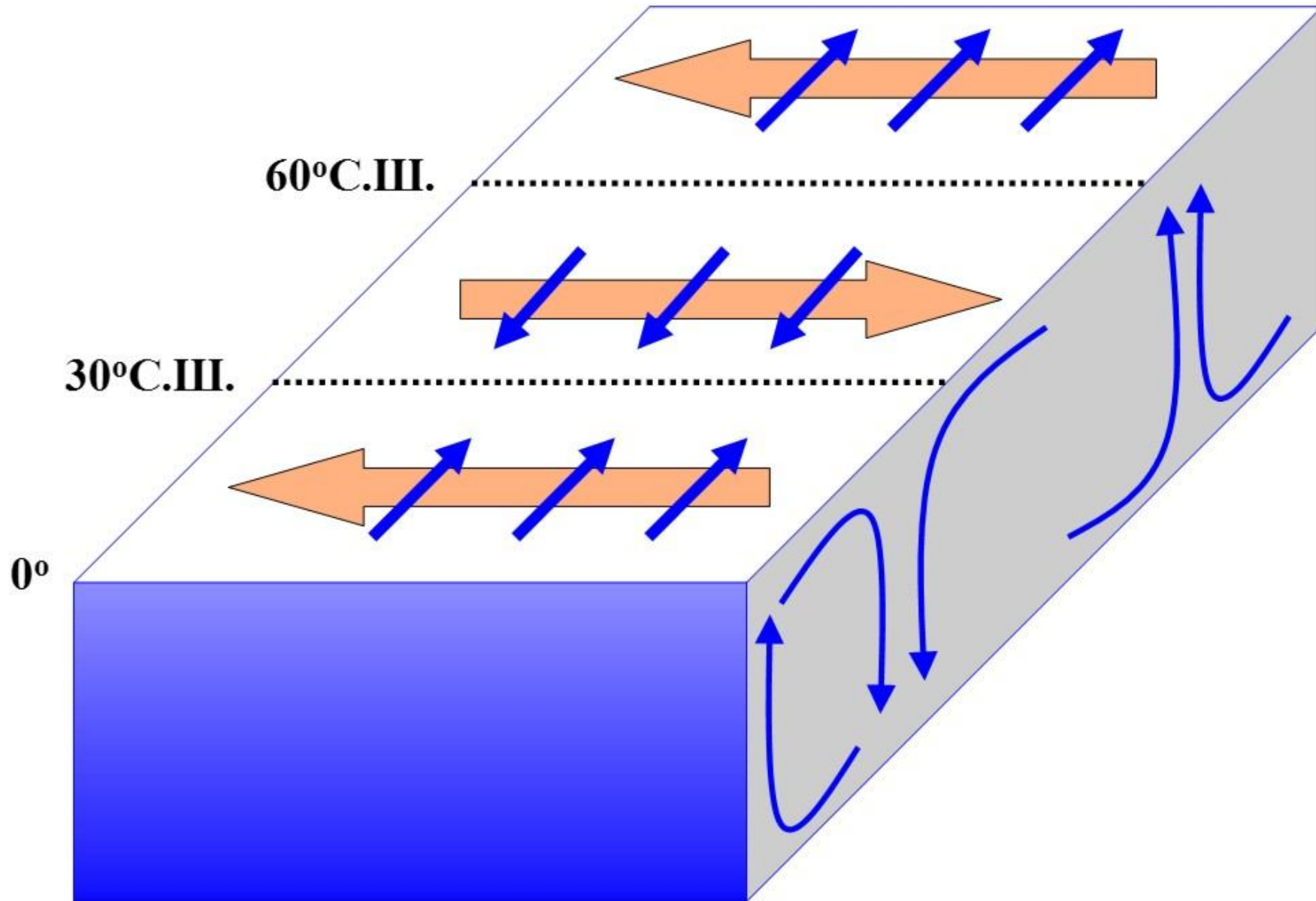




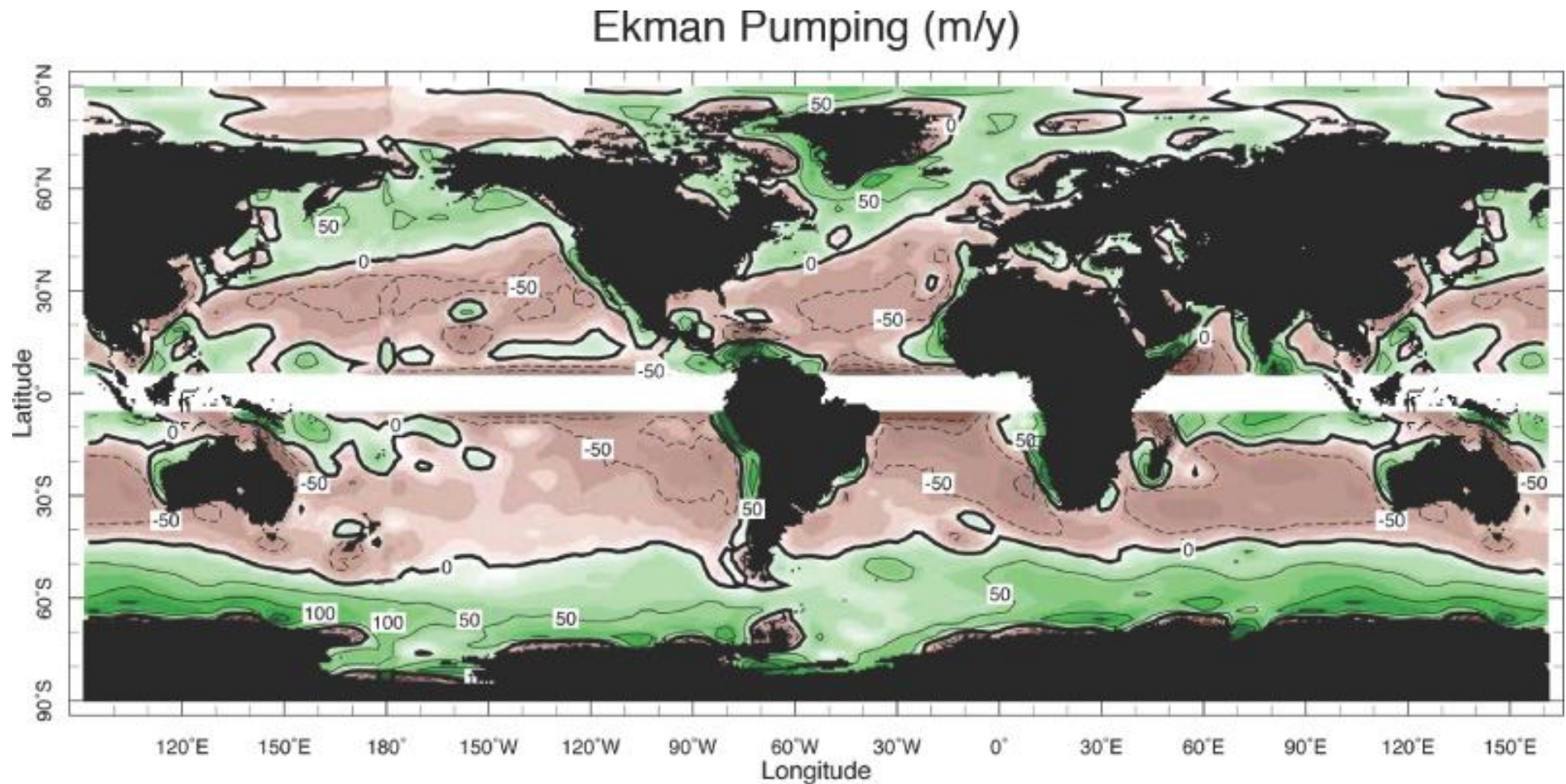
# Течения на поверхности Мирового океана

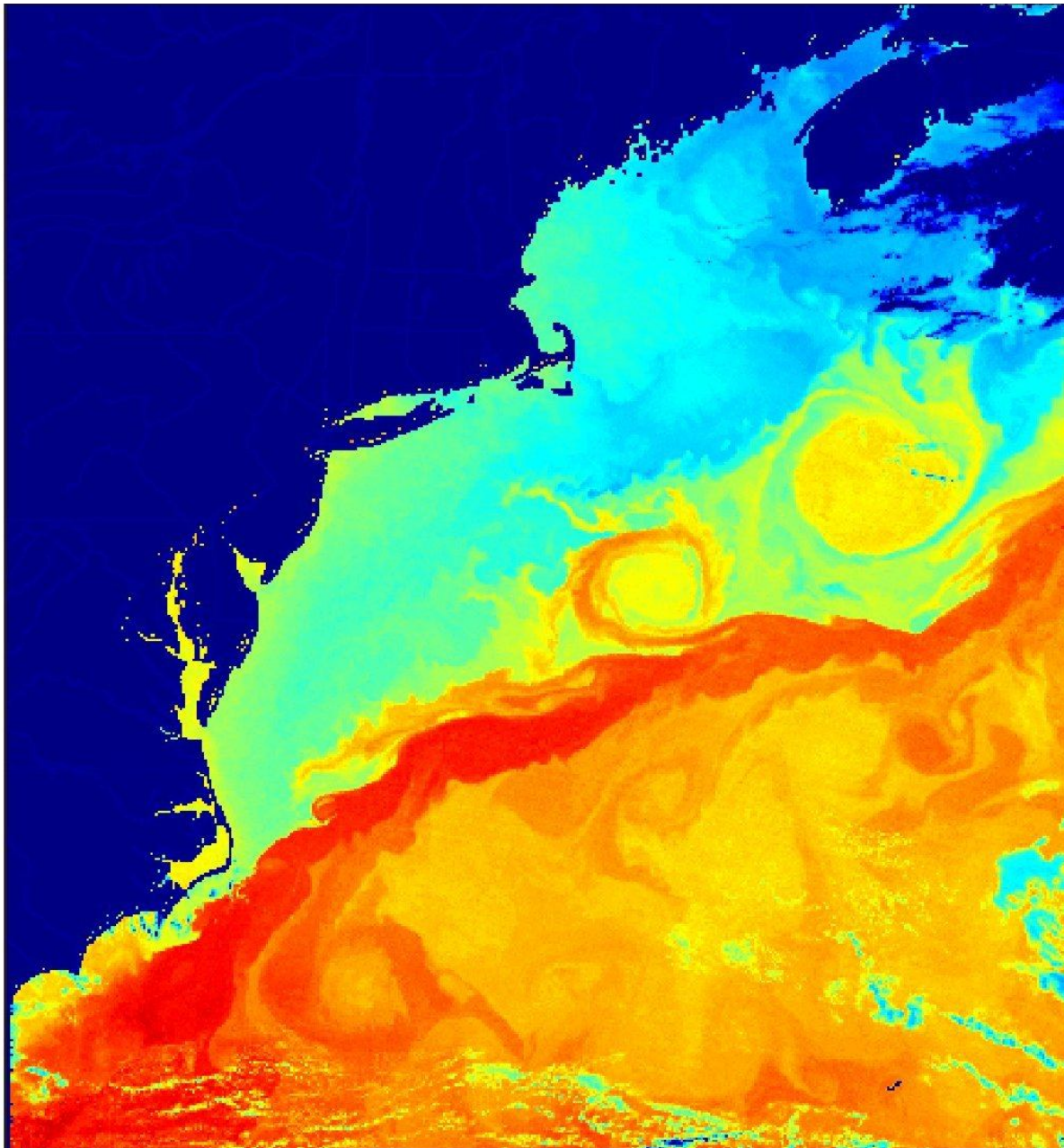


# Экмановский «насос»



# Вертикальная компонента скорости [м/год] - результат действия «насоса» Экмана (поднятие, опускание)





## *CoastWatch*

### **AVHRR Temperature**

Filename: E9716211.ND7

IMGMAP Image

NOAA 12 Orbit: 31555

6/11/97 JD 162 11:27 GMT

Pixel Size: 4.17 km

Lat Range: 29.94N to 45.82N

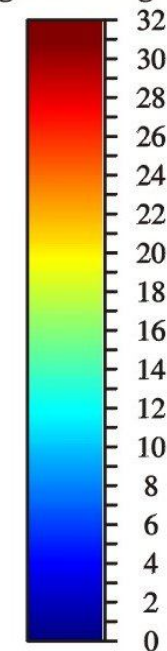
Lon Range: 79.08W to 58.81W

Horiz. Offset: -1994 2

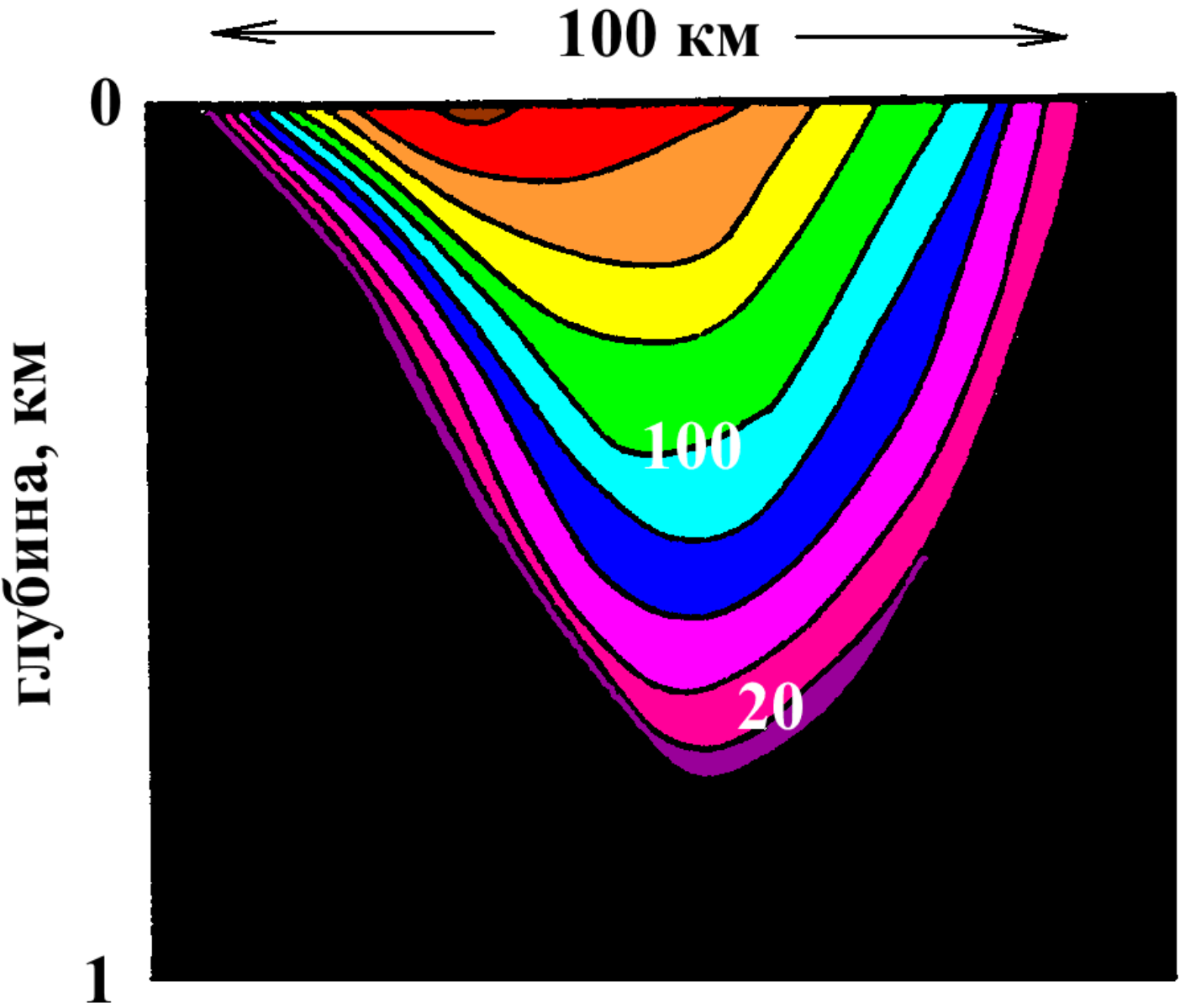
Vert. Offset: 4681 0

SST - Split Window

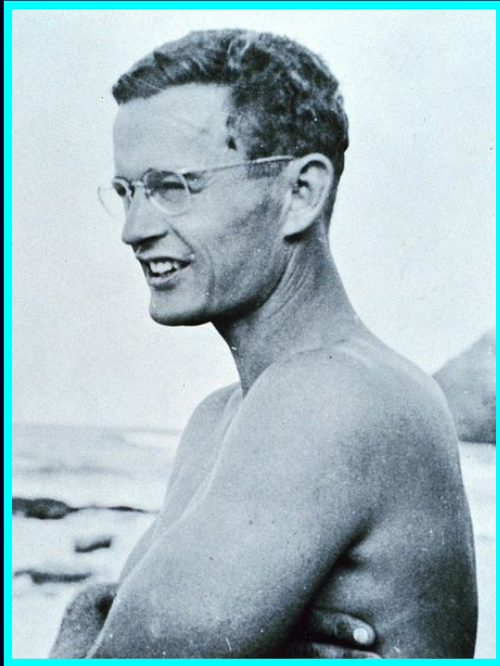
### **Surface Temperature (Degrees Centigrade)**



# Вертикальная структура течения Гольфстрим



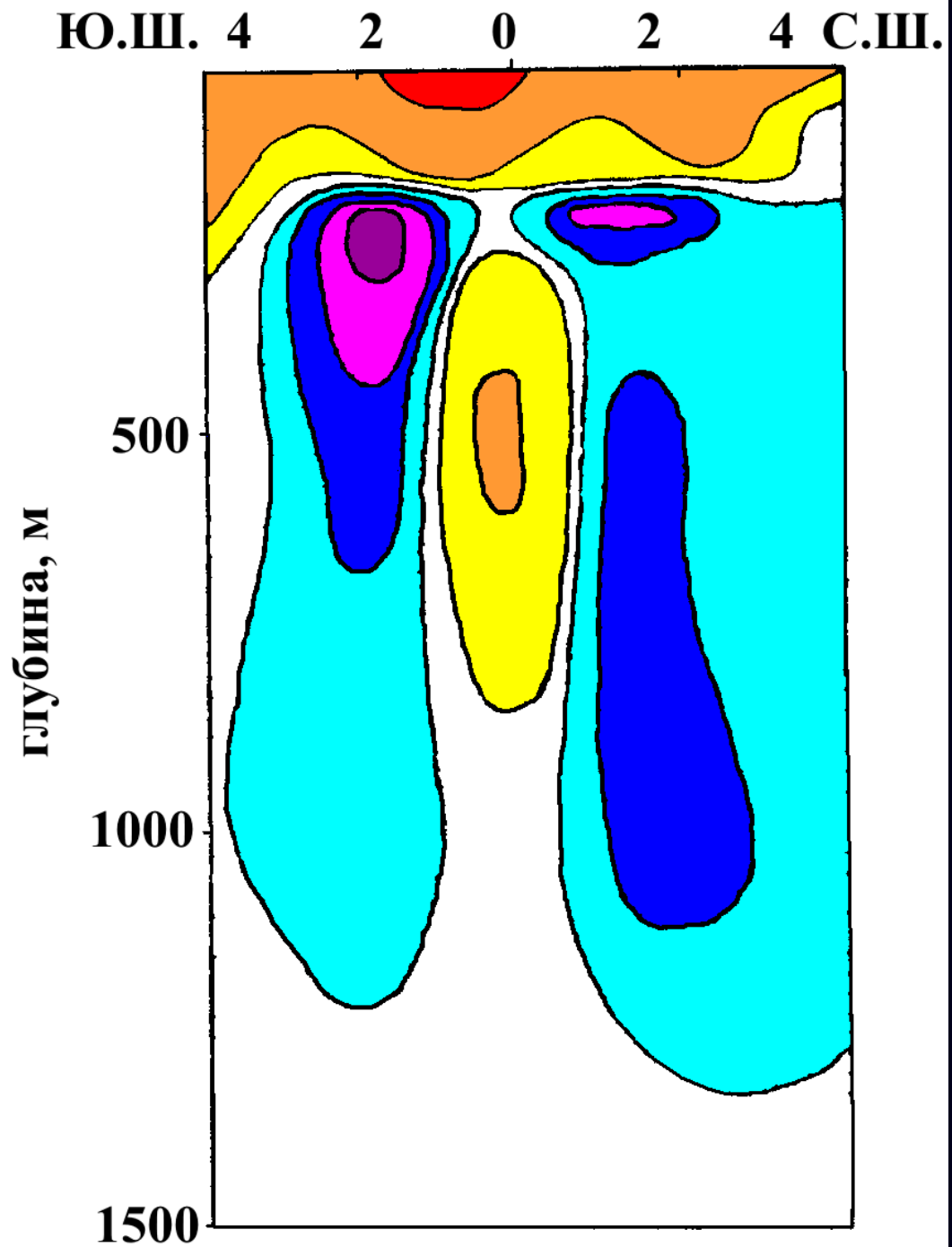
**Глубинное течение  
обнаружено в 1951 г.  
рыбаками случайно (!)**



*Таунсенд Кромвелл  
(1922–1958)  
американский  
океанограф*

- ❑ **Таунсенд Кромвелл:**  
«подводная река вдоль  
Экватора от Соломоновых  
до Галапогосских о-вов  
(8000 миль), ширина 150-  
200 миль, скорость до  
1.5м/с»
- ❑ **Вначале названо  
Экваториальным  
противотечением, после  
гибели Т.Кромвелла в  
1958г. переименовано в  
течение Кромвелла**
- ❑ **В дальнейшем исследовано  
экспедицией на «Витязе»**

Вертикальная  
структура течения  
Кромвелла в  
плоскости 176° З.Д.  
(НИС «Витязь»)



**1959 г. с борта НИС «Михаил Ломоносов» обнаружено экваториальное подповерхностное противотечение в Атлантическом океане (течение Ломоносова)**

**Глубины 75 – 400 м, скорости до 1.2 м/с, ширина 200-250 миль.**

**1959-1960 гг. с борта НИС «Витязь» обнаружено экваториальное подповерхностное противотечение в Индийском океане (течение Тареева)**

**Глубины 100-400 м, скорость до 1 м/с, ширина 200-300 миль**



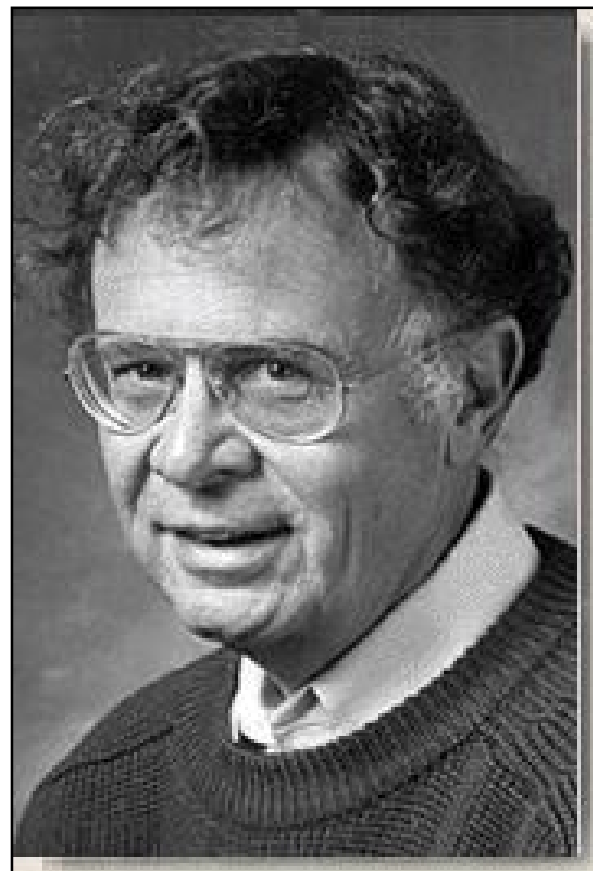
# Глобальная межокеанская циркуляция вод («глобальный тепловой конвейер»)



**Сергей Сергеевич Лаппо**

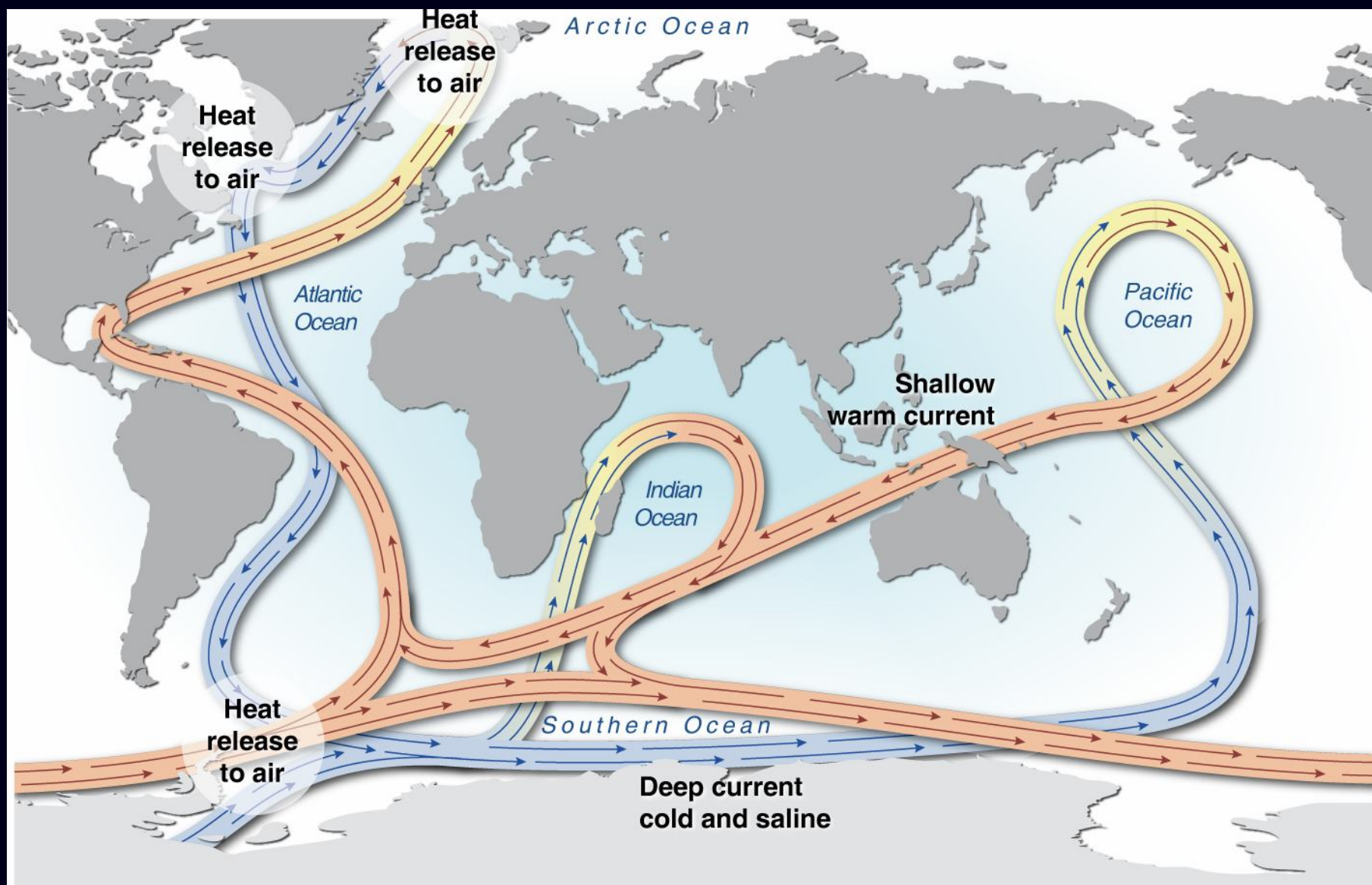
**1938-2006**

российский океанолог,  
член-корр. РАН,  
Директор Института  
океанологии РАН  
(1995—2006)



**Wallace Smith Broecker**  
developed the idea of a «global  
conveyor belt»

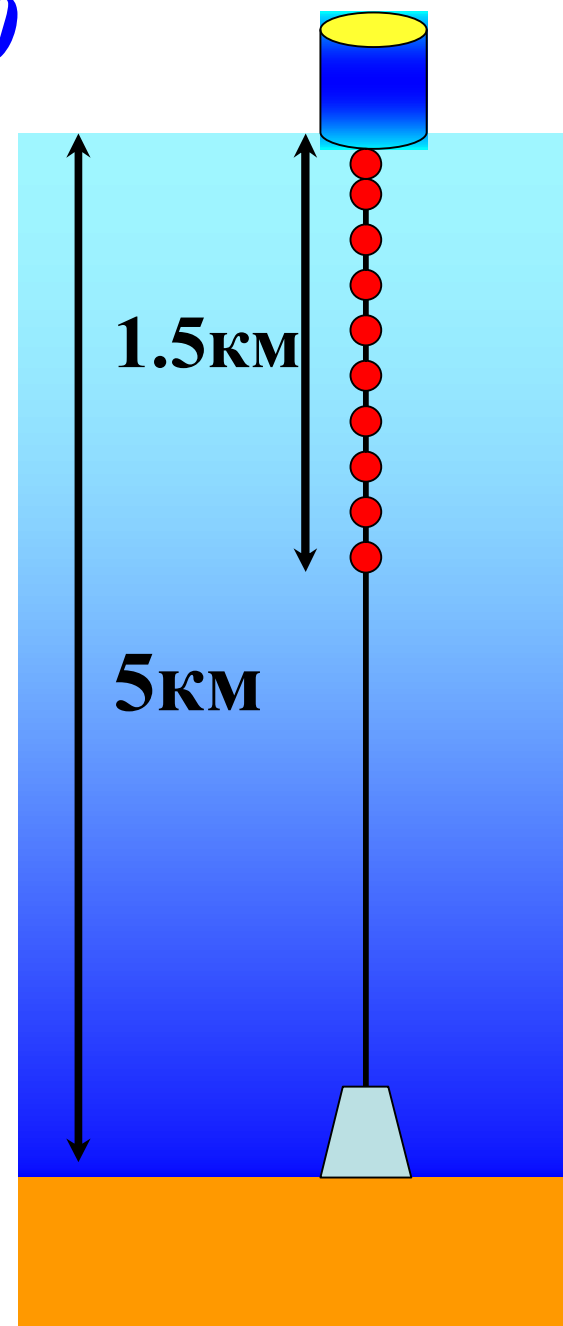
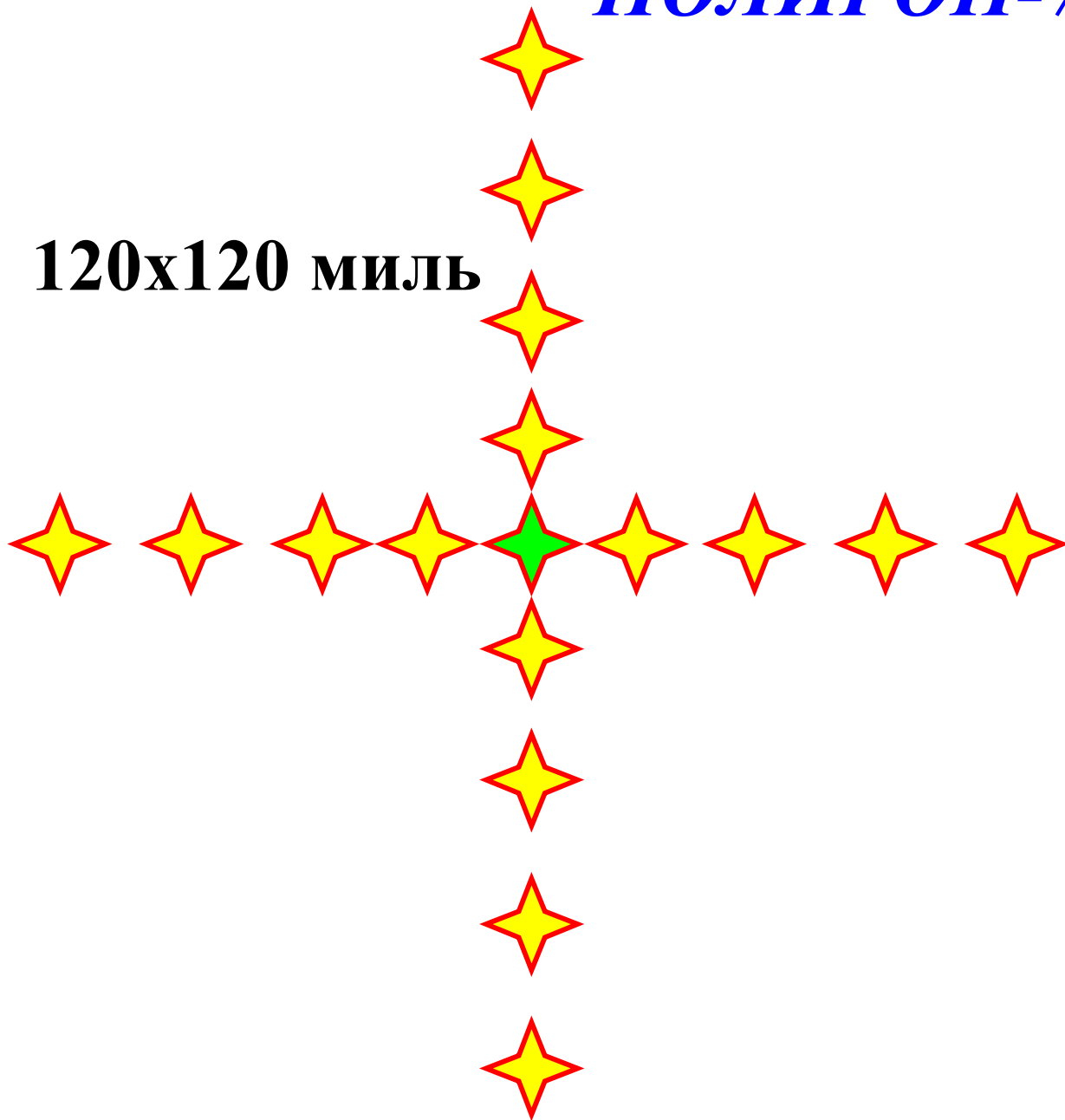
# Глобальная меж океанская циркуляция вод («глобальный тепловой конвейер»)



# **Синоптические вихри в океане**

# ПОЛИГОН-70

120x120 миль



# Синоптические вихри

- ❑ Впервые обнаружены в 1970 г. в районе Северного пассатного течения в Атлантическом океане (эксперимент Полигон-70, НИС «Академик Курчатов», «Дмитрий Менделеев», «Андрей Вилькицкий»)
- ❑ Диаметр 100-150 км, скорость 10-20 см/с, скорость перемещения центра 5 см/с
- ❑ В 1973 г. существование синоптических вихрей подтверждено американскими океанологами (MODE – Mid Ocean Dynamical Experiment)
- ❑ 1977-1978 эксперимент ПОЛИМОДЕ
  - Обнаружено 20 крупных (200-300 км) и несколько десятков мелких вихрей
  - Установлено, вихрям принадлежит не менее 90% кинетической энергии океана
  - Причина образования – неустойчивость течений

# Неустойчивость течений

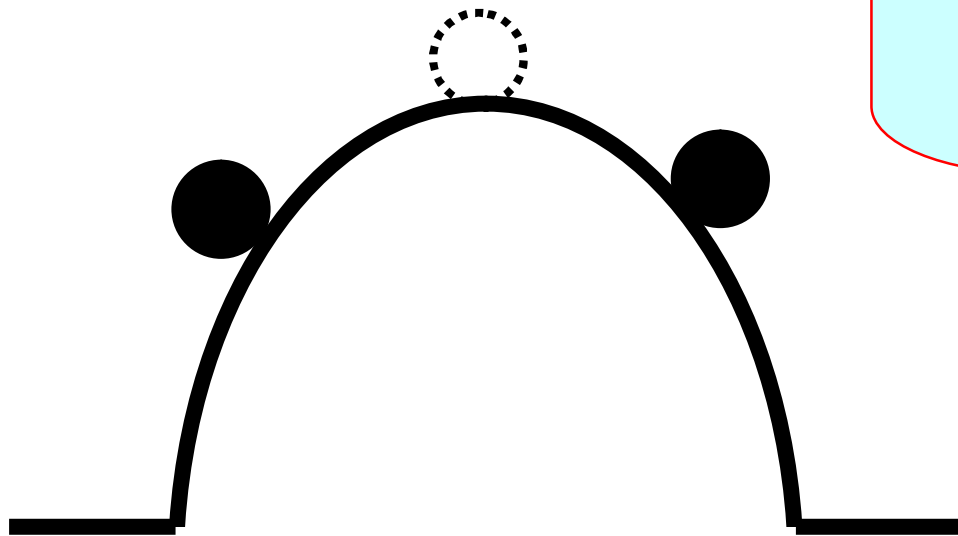
(сдвиговая неустойчивость)

“Sunset at Rock Mountain Beach”

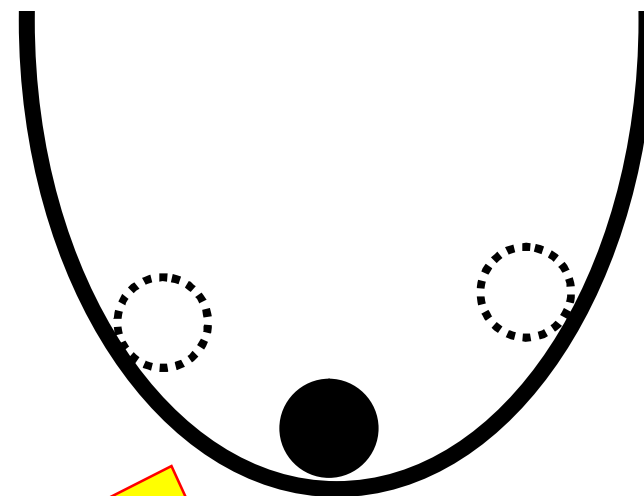
Kelvin-Helmholtz waves. Taken Jan 11, 2002 at 5:38pm from Coherent Technologies, Inc., Lafayette, CO

# Устойчивость

Понятие «устойчивость» применимо к положению равновесия и к режиму движения



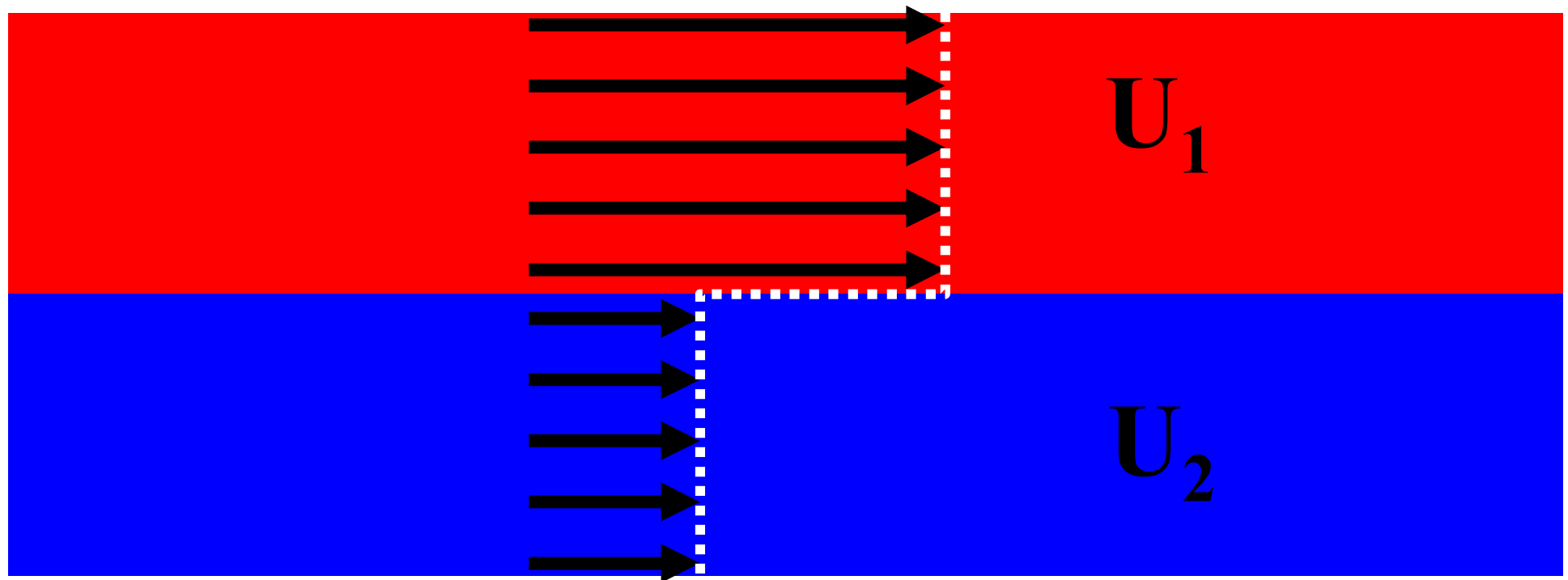
Малые возмущения нарастают со временем



Малые возмущения затухают

# Сдвиговая неустойчивость

(неустойчивость Кельвина-Гельмгольца)

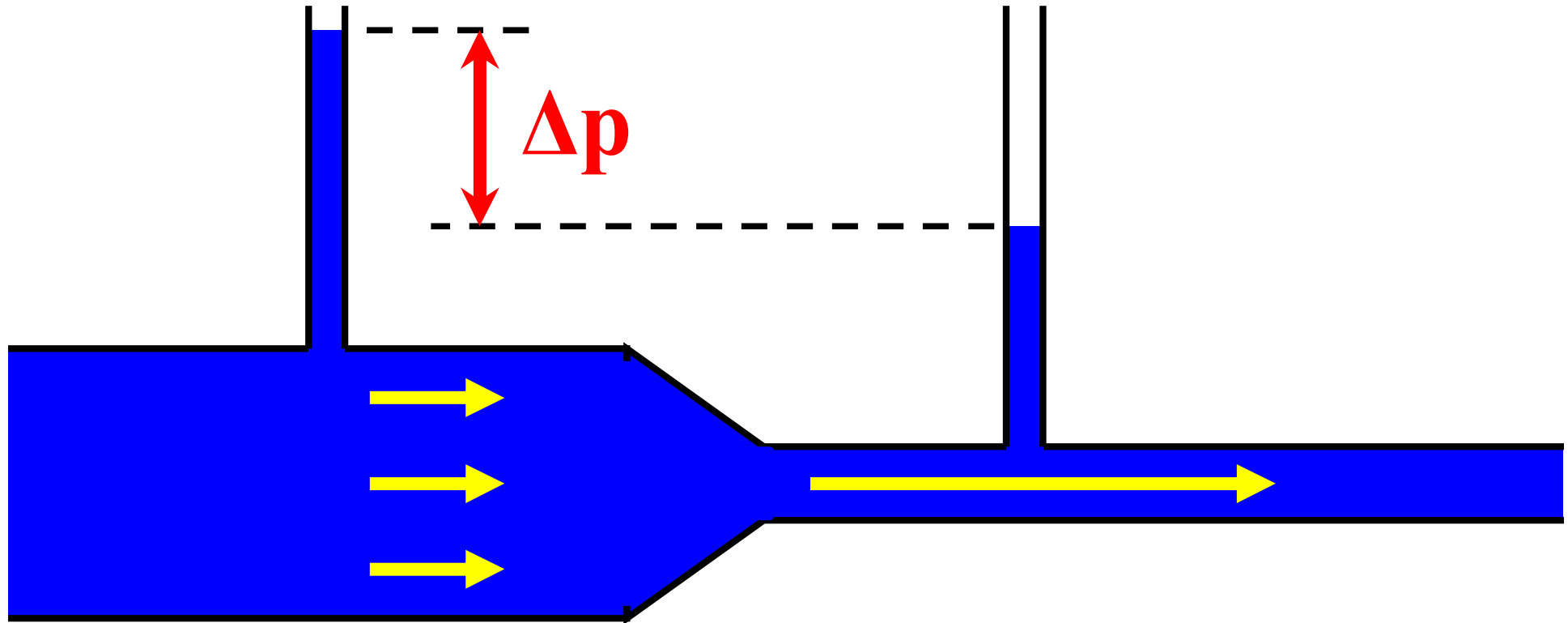




# Волны Кельвина-Гельмгольца



# Парадокс гидромеханики

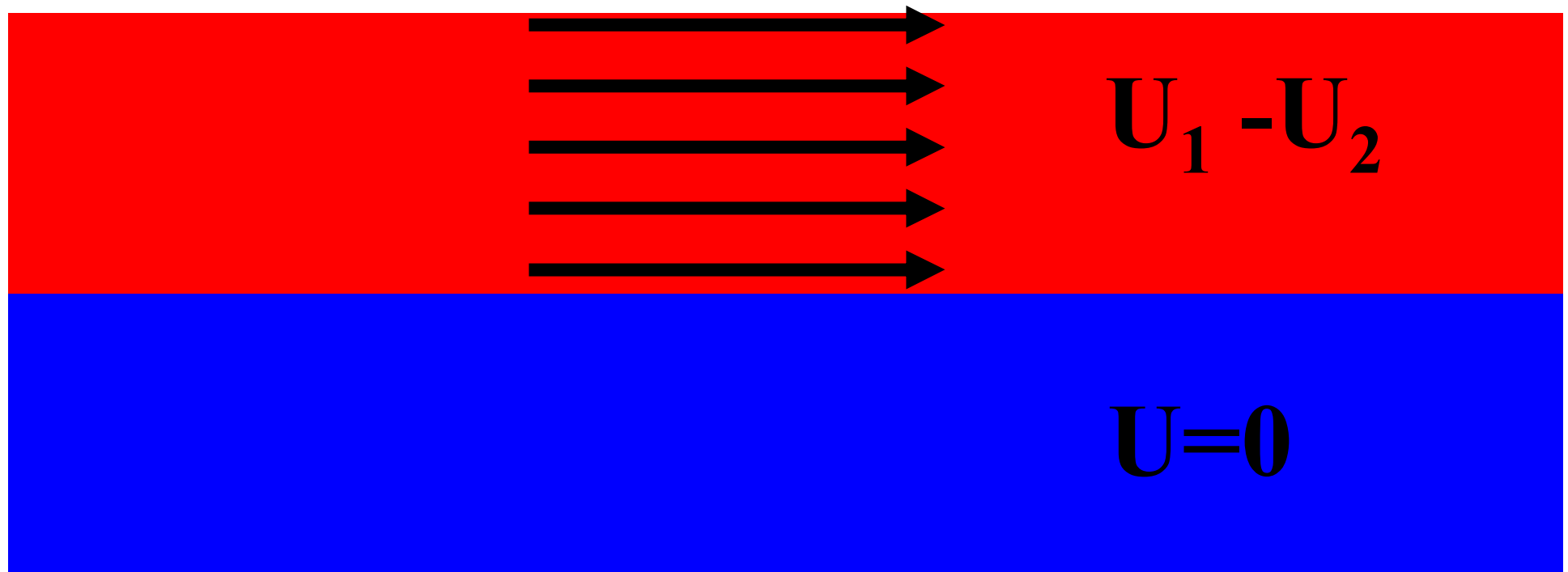


$$\frac{U^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

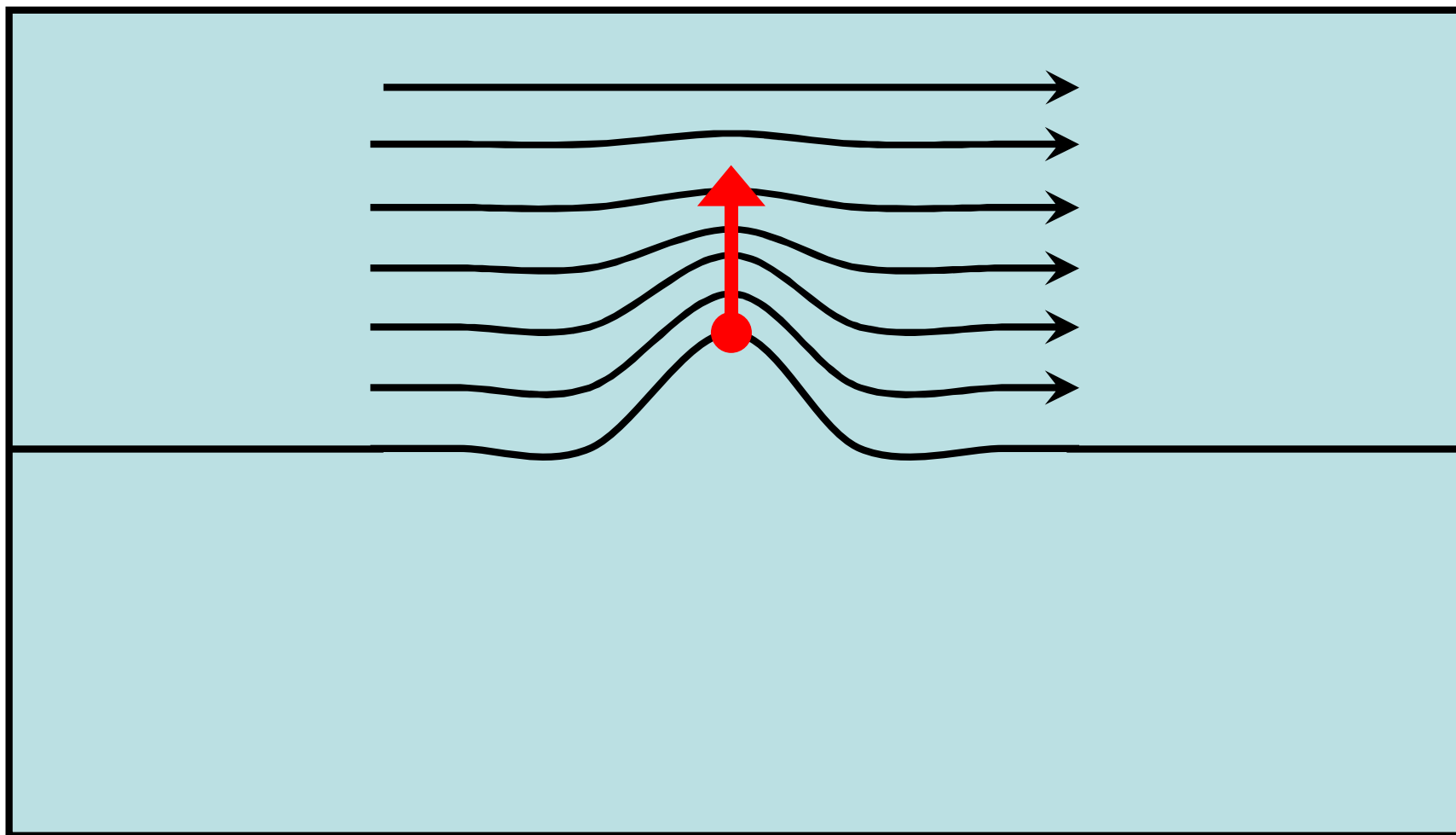
уравнение Бернулли

# Сдвиговая неустойчивость

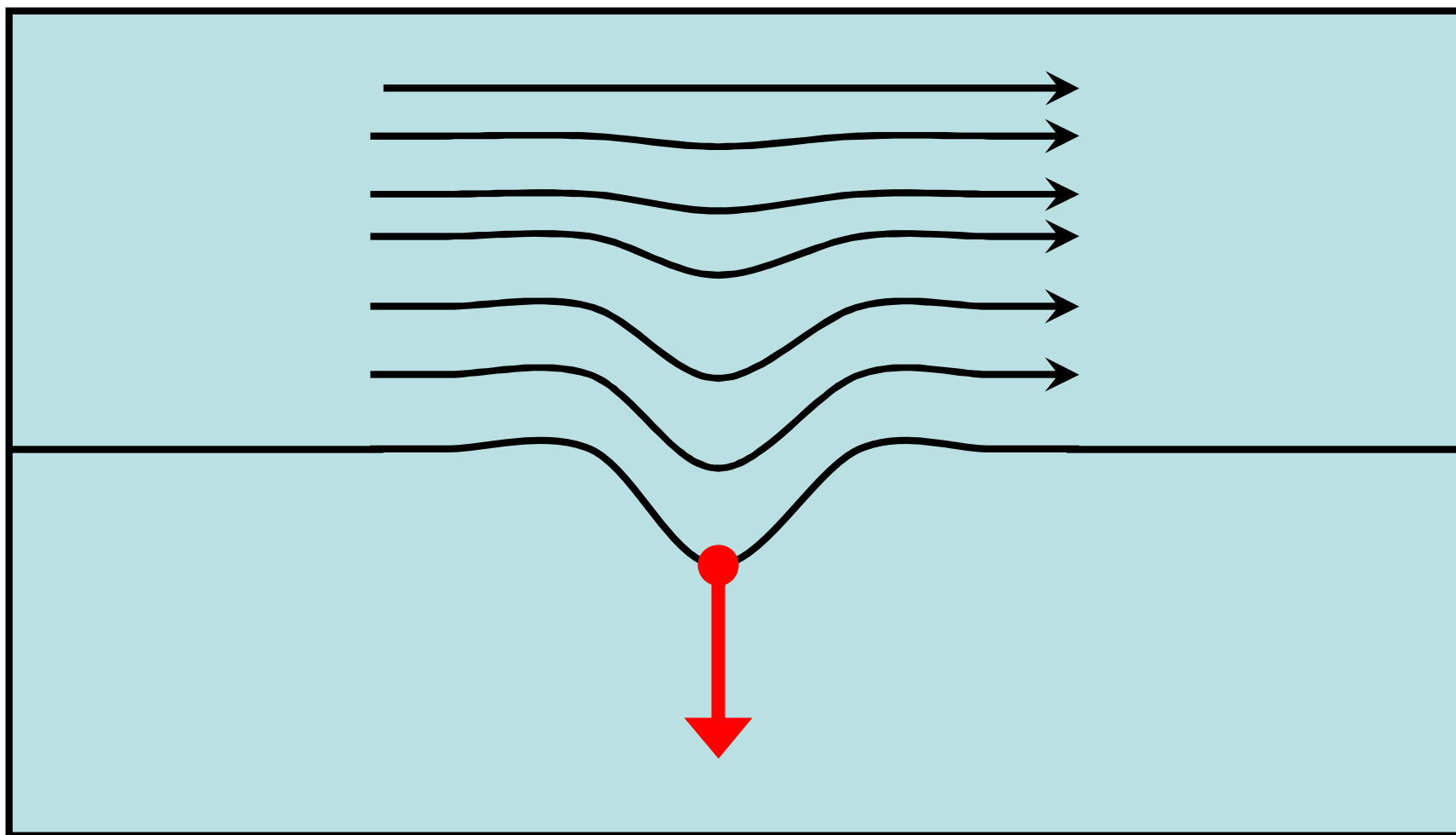
(неустойчивость Кельвина-Гельмгольца)



# Сдвиговая неустойчивость



# Сдвиговая неустойчивость

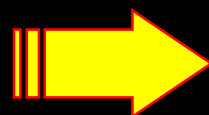


# Волновые движения в океане и атмосфере

# ТИПЫ ВОЛН

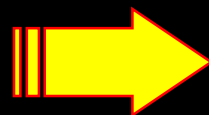
(классификация по типу возвращающей силы)

сила тяжести



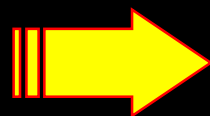
гравитационные  
поверхностные и  
внутренние

сила  
поверхностного  
натяжения



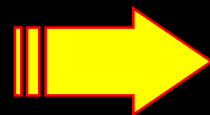
капиллярные

сила упругости



(гидро)акустические

сила Кориолиса



гироскопические  
(инерционные)

# Поверхностные гравитационные волны

**см. анимацию**



# Внутренние гравитационные волны

см. анимацию

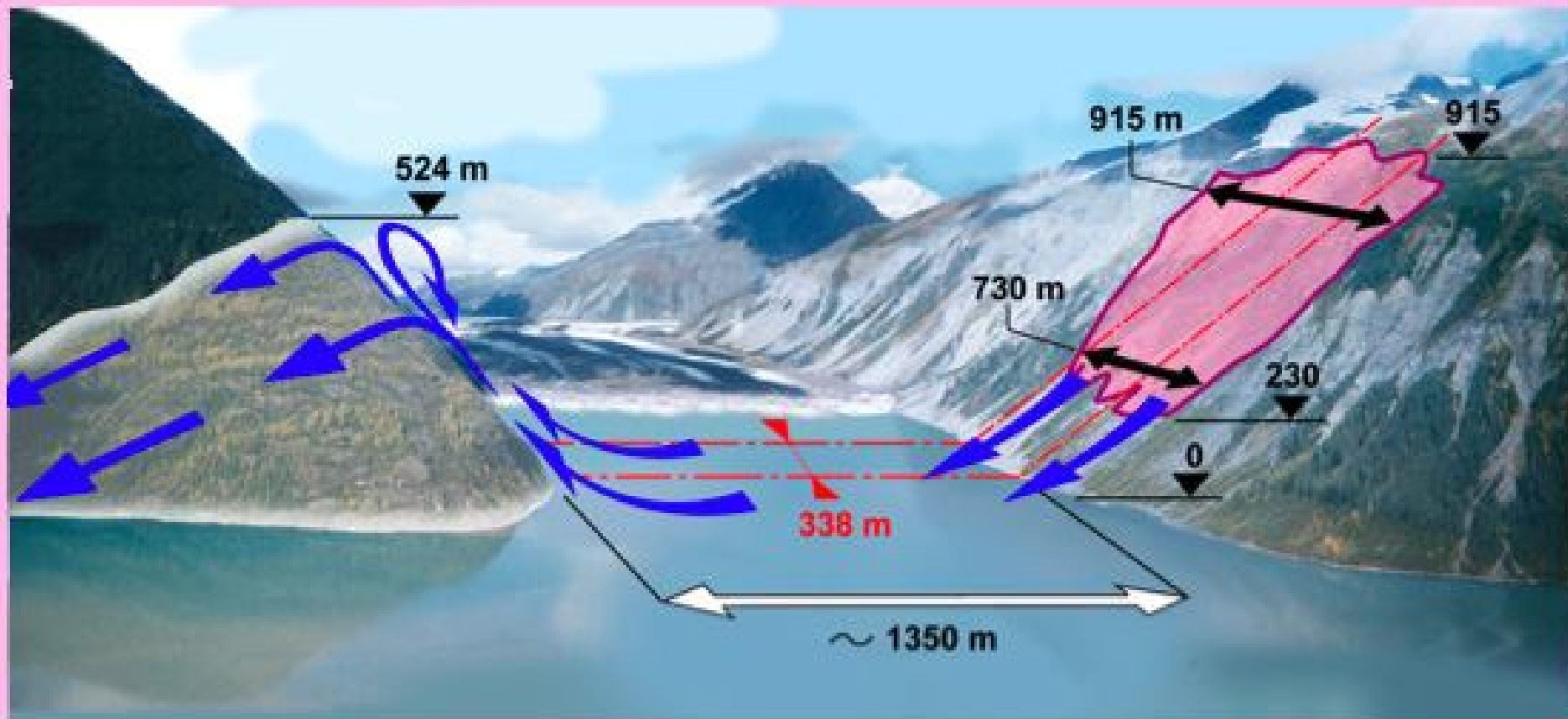
при устойчивой стратификации могут существовать и в океане, и в атмосфере

# ТИПЫ ВОЛН В ОКЕАНЕ

(классификация по причине возникновения)

- ветровые
- приливные
- анемобарические
- сейсмические (цунами)
- оползневые (цунами)
- штормовые нагоны
- корабельные
- ...

Бухта Литуйя, Аляска, 9 июля 1958 г  
оползень объемом  $\sim 0.3 \text{ км}^3$





**Следы воздействия  
цунами по берегам  
залива Литуя**

Бухта Литуйя, Аляска, 9 июля 1958 г  
оползень объемом  $\sim 0.3 \text{ км}^3$



**524 m**



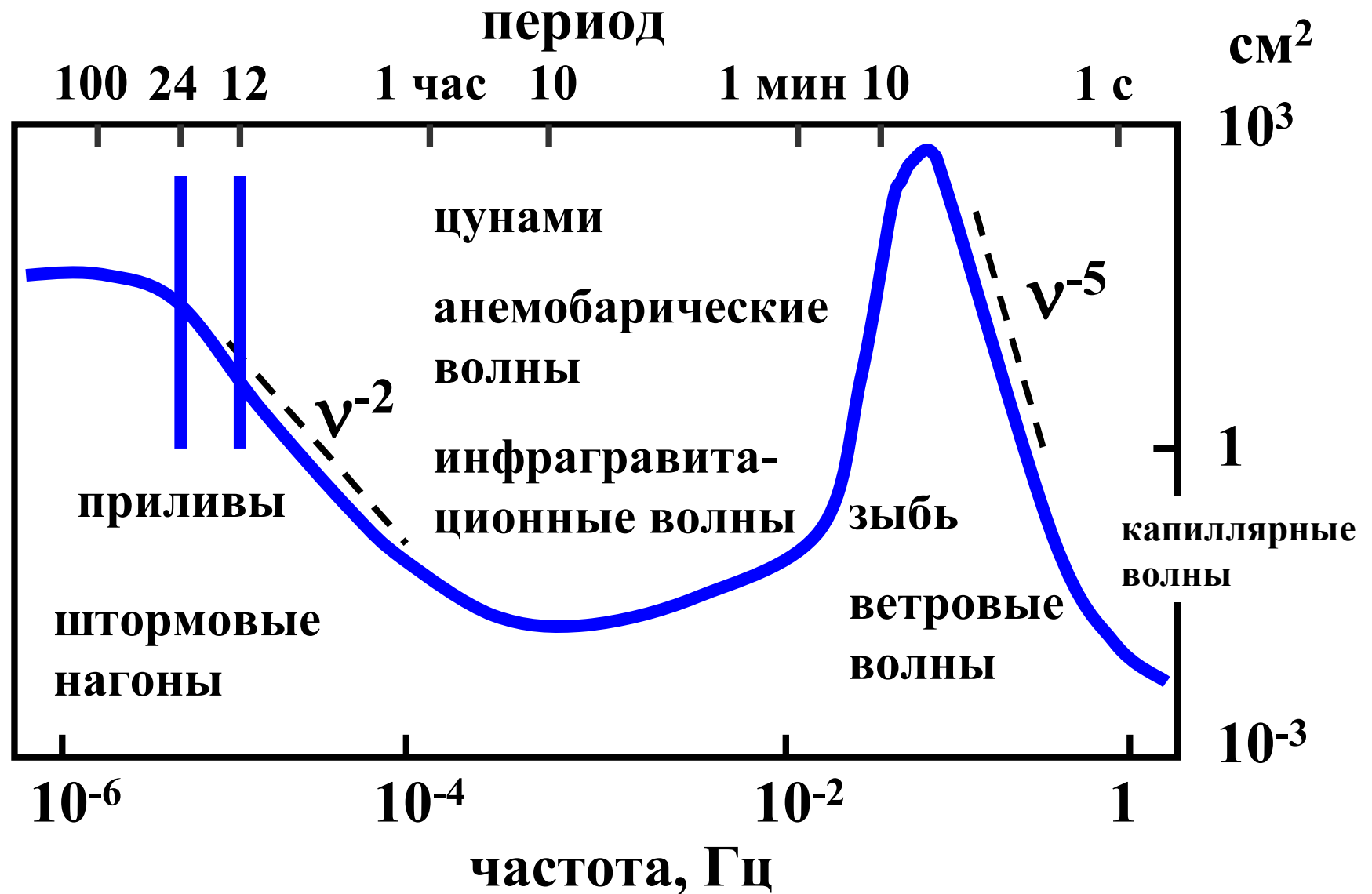
**300m**

# ТИПЫ ВОЛН В ОКЕАНЕ

(названия волновых явлений)

- Поророка (Амазонка)
- Риссага (о.Менорка)
- Абики (о.Кюсю)
- сейши
- волны-убийцы
- солитоны
- захваченные волны
- зыбь
- бор
- ...

# Спектр гравитационных поверхностных волн в океане



**Математическое  
описание волновых  
движений**



$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \cancel{(\vec{v}, \vec{\nabla})} \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} + \cancel{2[\vec{v} \times \vec{\omega}]} \\
 \phantom{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}} + \nu \Delta \vec{v} + \cancel{\left( \zeta + \frac{\nu}{3} \right) \vec{\nabla} \operatorname{div} \vec{v}} \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0
 \end{array} \right.$$

# Система уравнений для описания линейных волн без учета вращения Земли и сил вязкого трения

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0 \end{array} \right.$$

**Гравитационные  
волны**

**Акустические  
волны**

**Линейная теория длинных  
гравитационных волн  
ИЛИ  
теория “мелкой воды”  
( $\lambda \gg H$ )**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \Rightarrow \quad |w| \sim \frac{H}{\lambda} |u_{\text{гориз.}}|$$

$$\cancel{\frac{\partial w}{\partial t}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

**приближение  
гидростатики**

# Волновое уравнение (длинные гравитационные волны)

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = gH \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right)$$

**Смещение  
поверхности  
воды**

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \Delta \xi$$

$$c = \sqrt{gH}$$

**скорость  
длинных волн**

# Одномерное волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

**Решение:**

$$\xi(x, t) = f(x \pm c \cdot t)$$



Wow! We  
can't outrun  
this wave!

Скорость  
распространения  
волны – НЕ РАВНА  
скорости движения  
частиц воды!!!



$c \approx 200 \text{ м/с}$

$c \approx 800 \text{ км/ч}$



$H = 4000 \text{ м}$

$$c = \sqrt{gH}$$

**Волновое уравнение для случая  
быстро меняющейся в  
пространстве скорости**

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \operatorname{div} [c^2(x, y) \operatorname{grad} \xi]$$

$$c = \sqrt{gH(x, y)}$$

**топография дна влияет на  
распространение длинных волн !**

# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №8

---

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*



# Волновые движения в океане и атмосфере

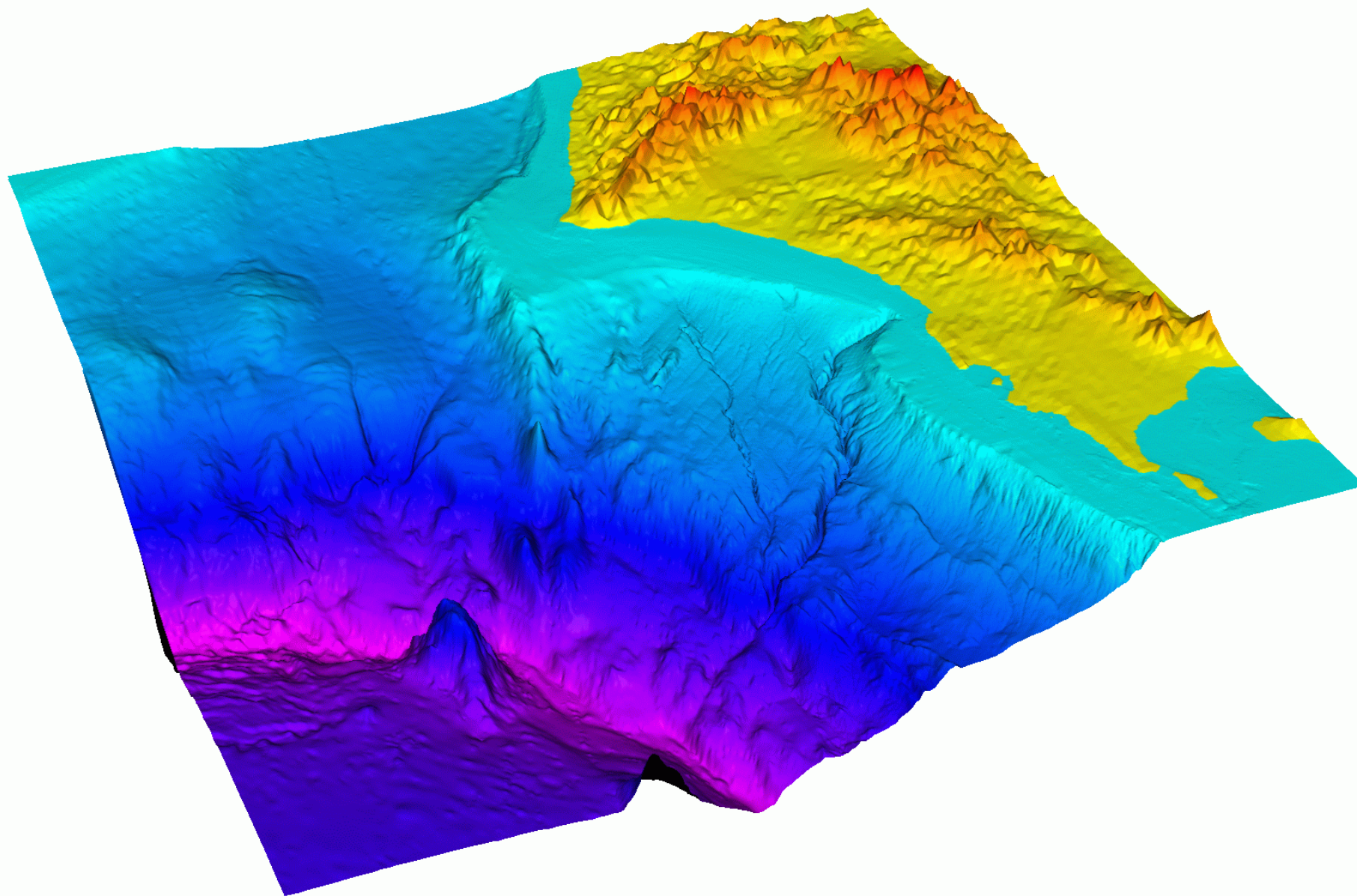
**Волновое уравнение для случая  
быстро меняющейся в  
пространстве скорости**

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \operatorname{div} [c^2(x, y) \operatorname{grad} \xi]$$

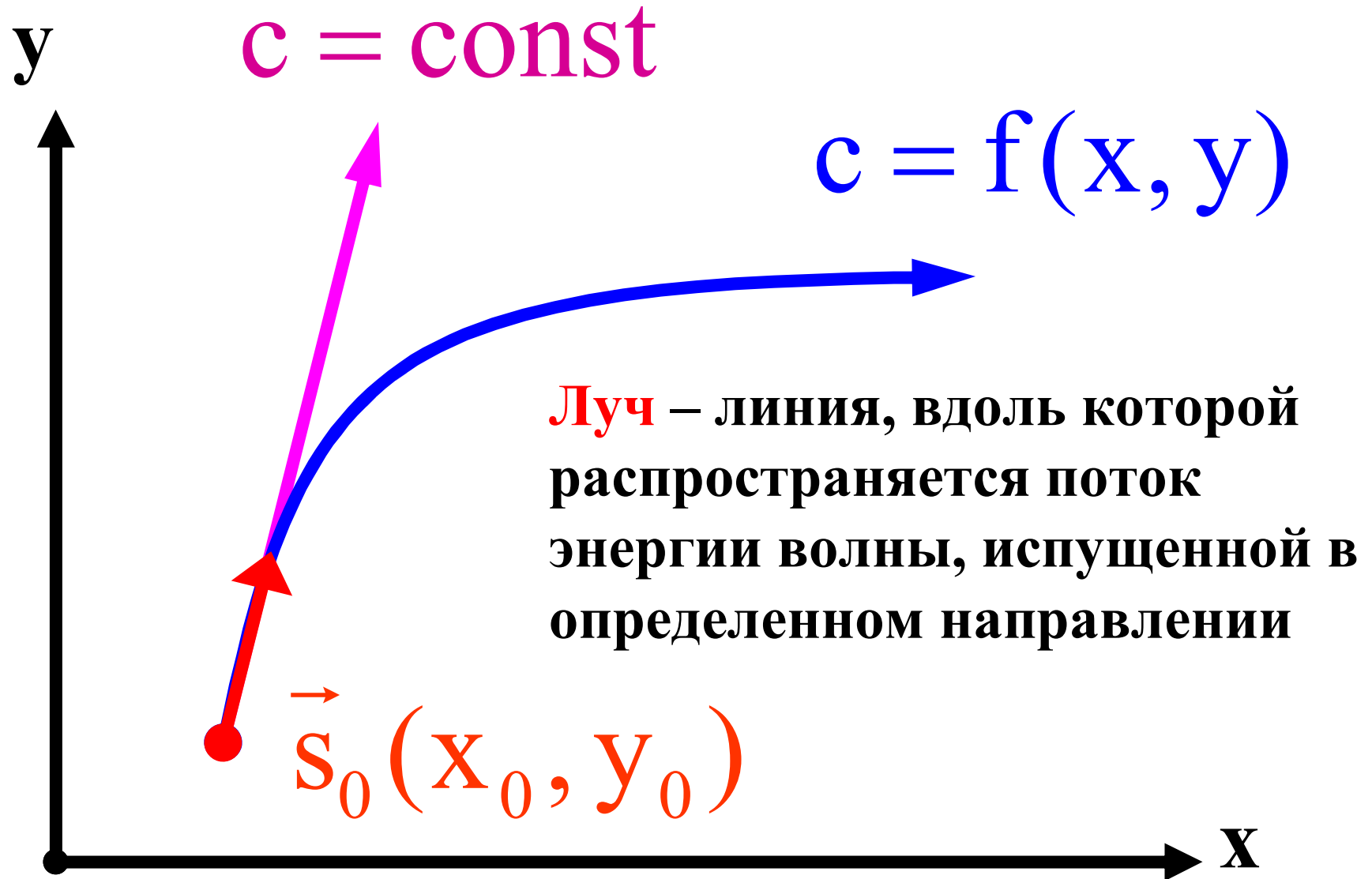
$$c = \sqrt{gH(x, y)}$$

**топография дна влияет на  
распространение длинных волн !**

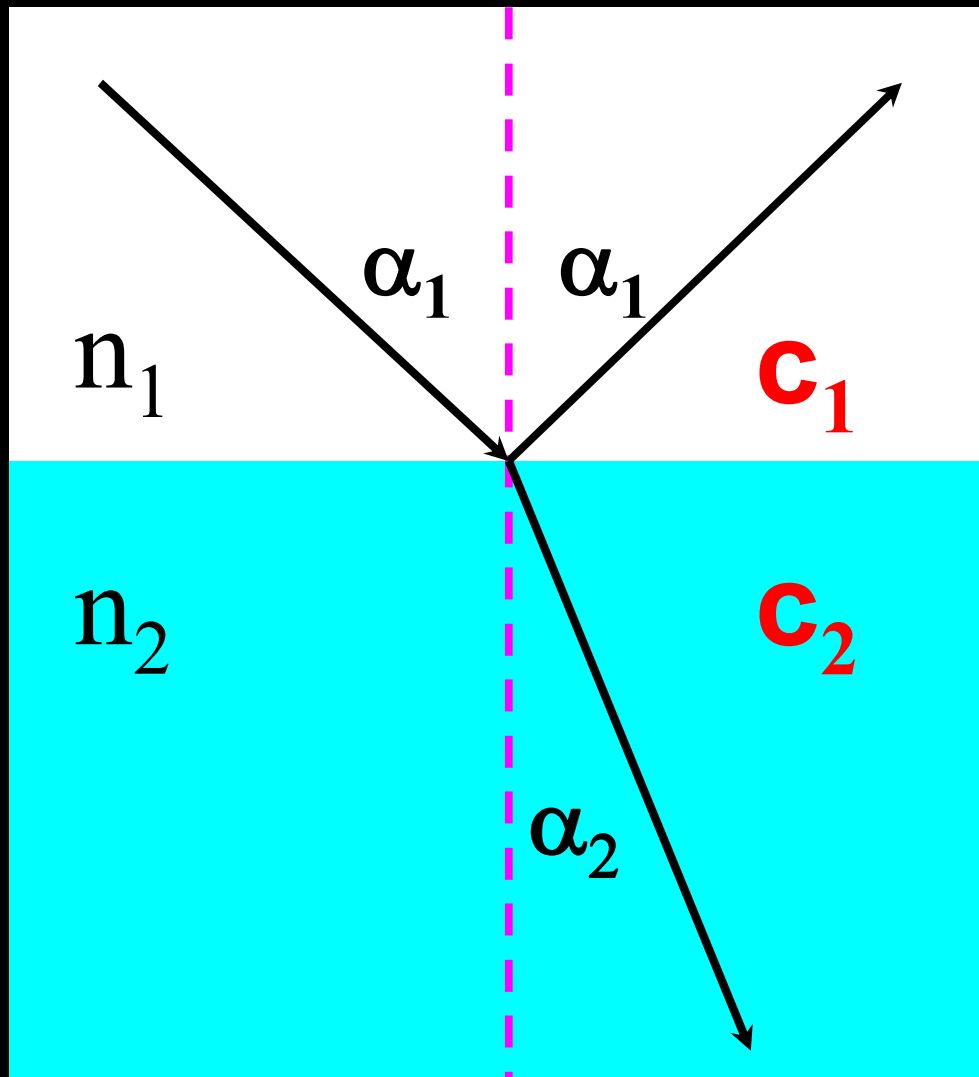
# Пример реального распределения глубин



# Приближение «геометрической оптики»



# Закон Снеллиуса

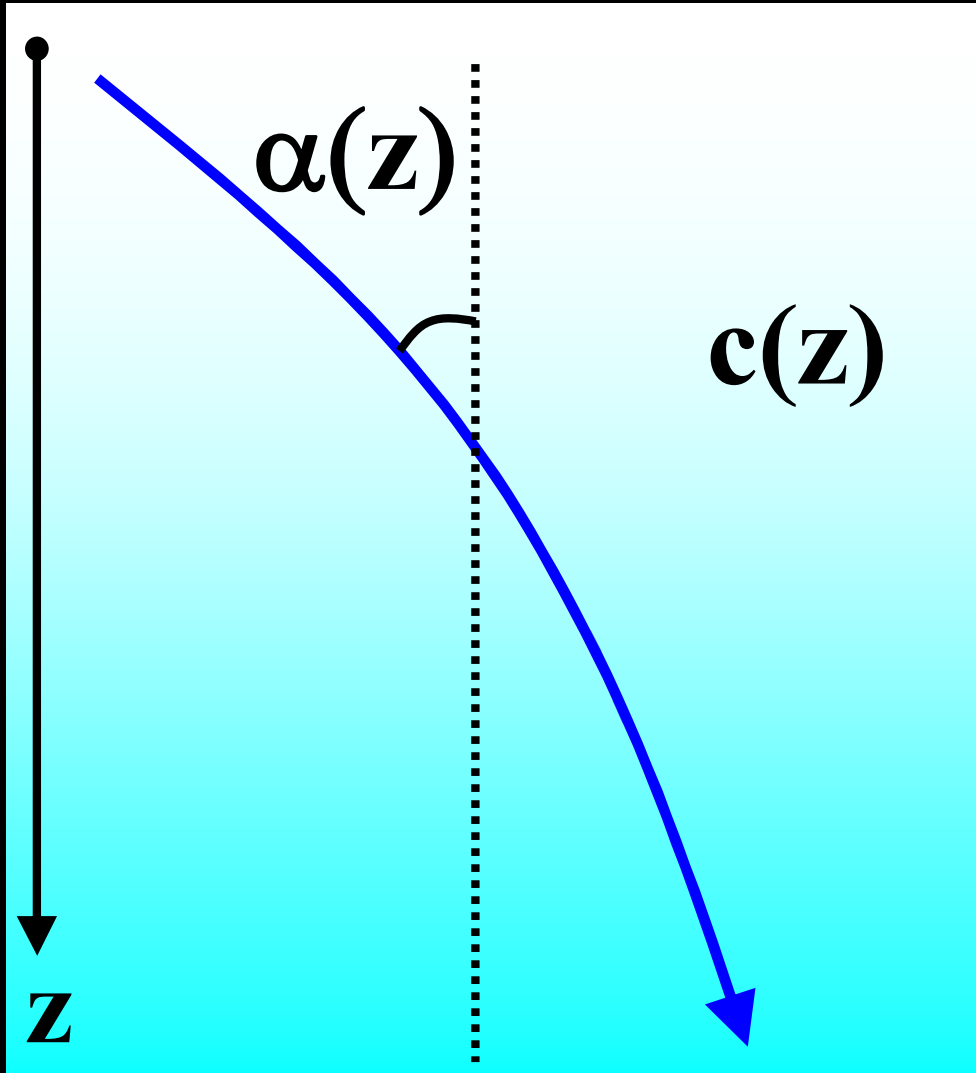


$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n = c_0 / c$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

# Рефракция



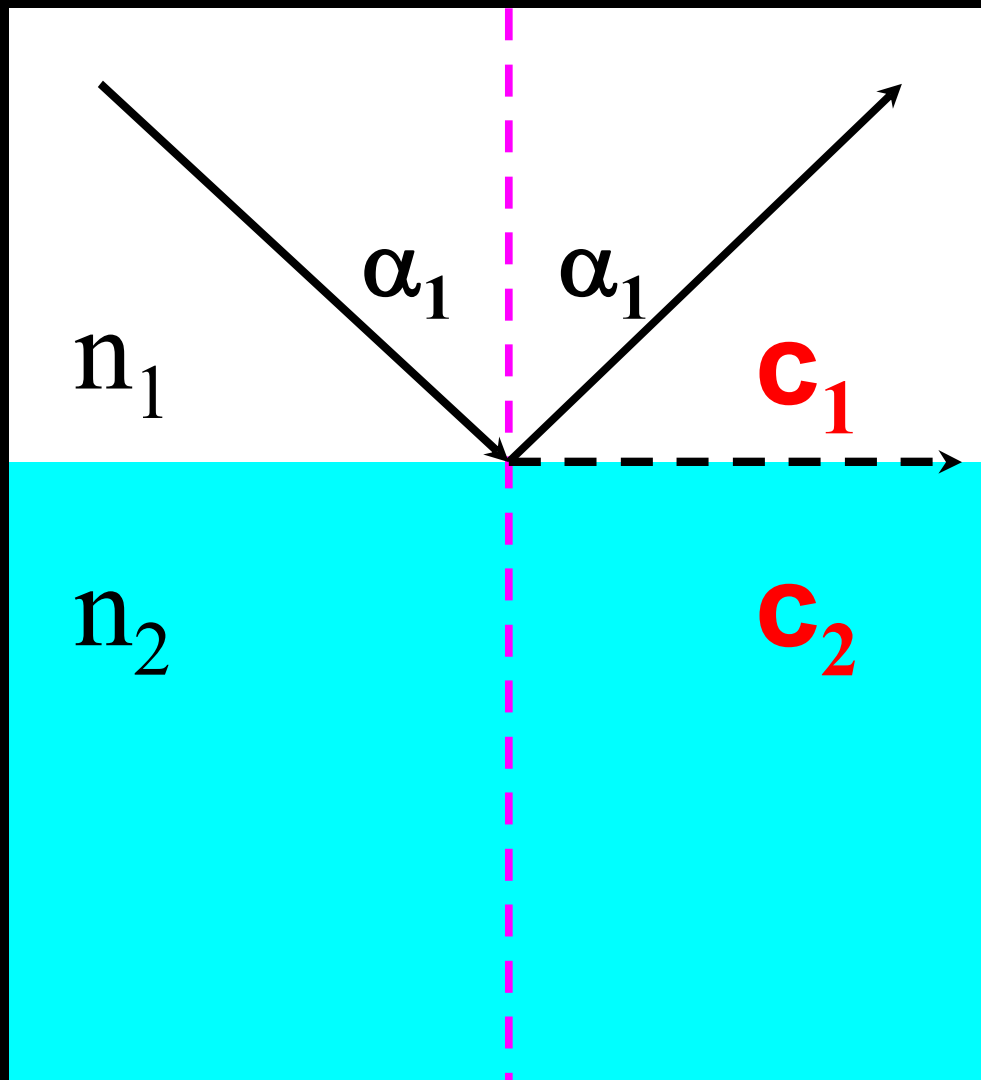
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\frac{\sin \alpha(z)}{c(z)} = \text{const}$$

**Рефракция** – изменение направления волновых лучей в среде  $c$  (плавно) изменяющейся в пространстве скоростью

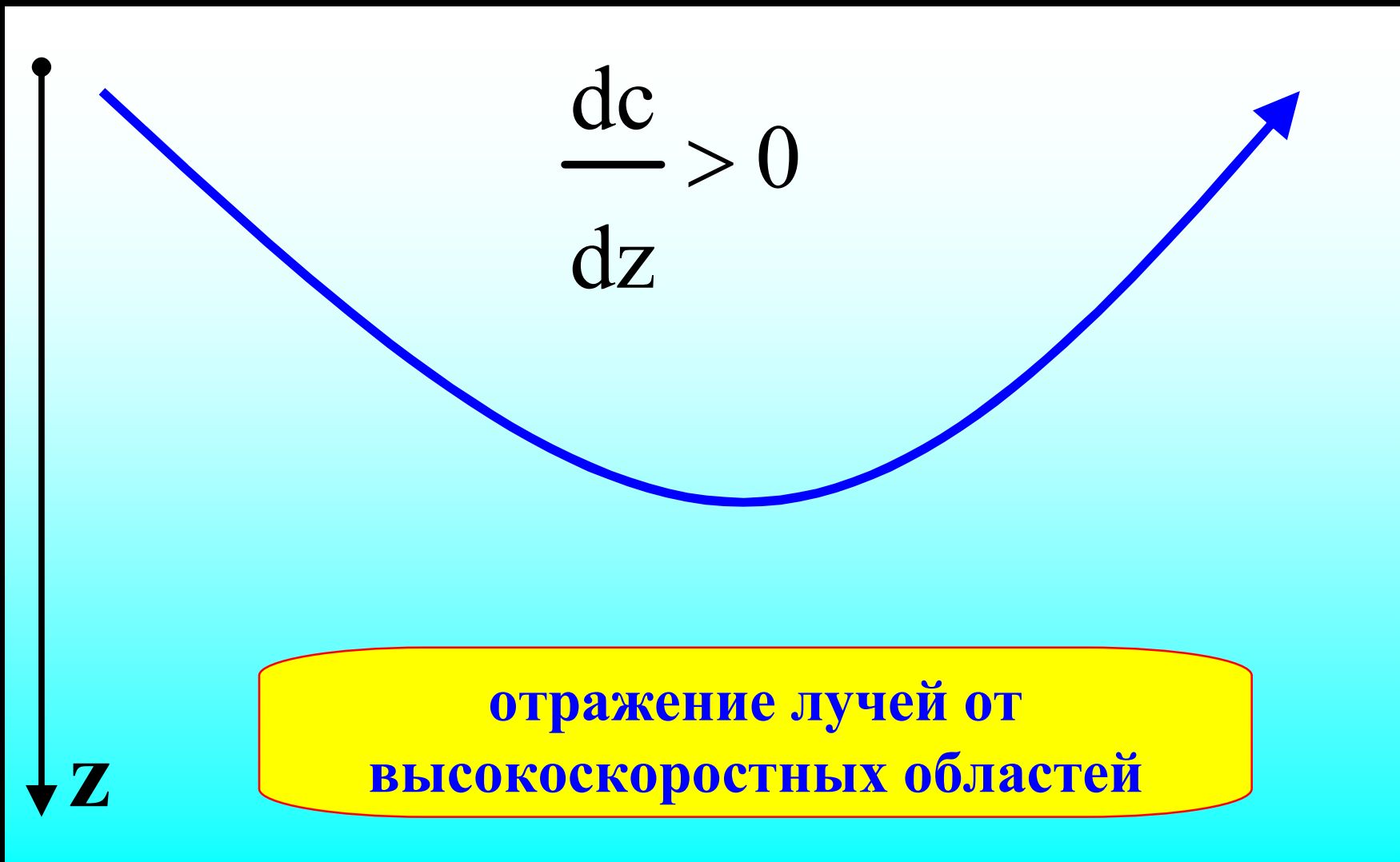
# Полное внутреннее отражение



$$n_2 < n_1$$

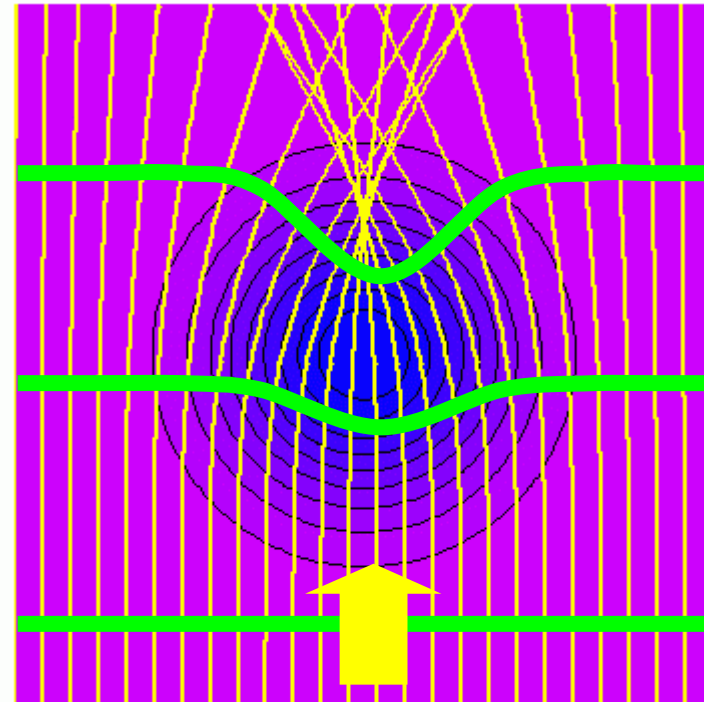
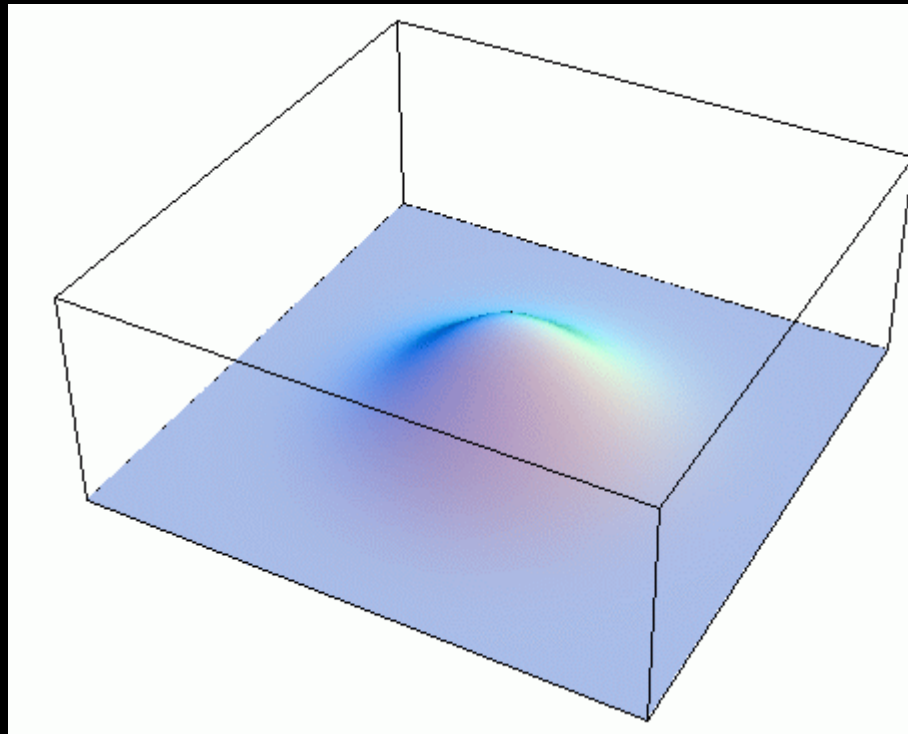
$$c_2 > c_1$$

# Полное внутреннее отражение

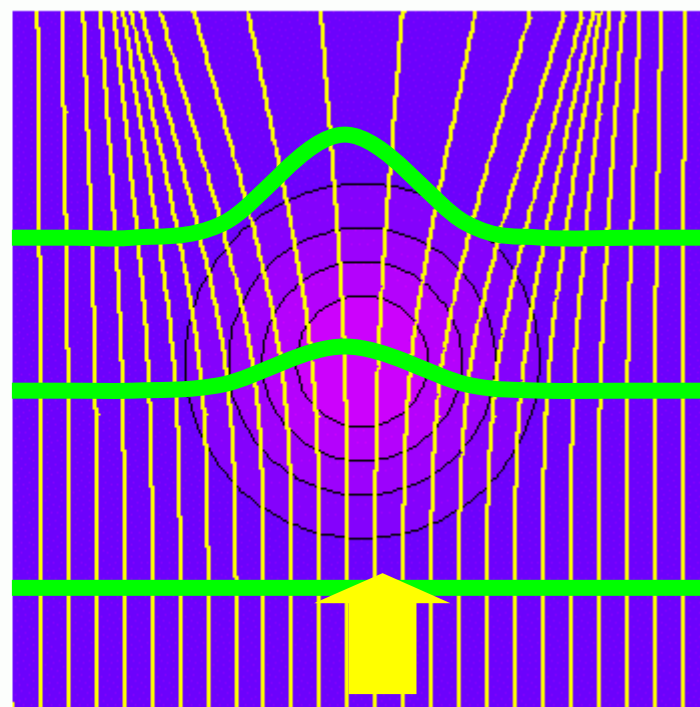
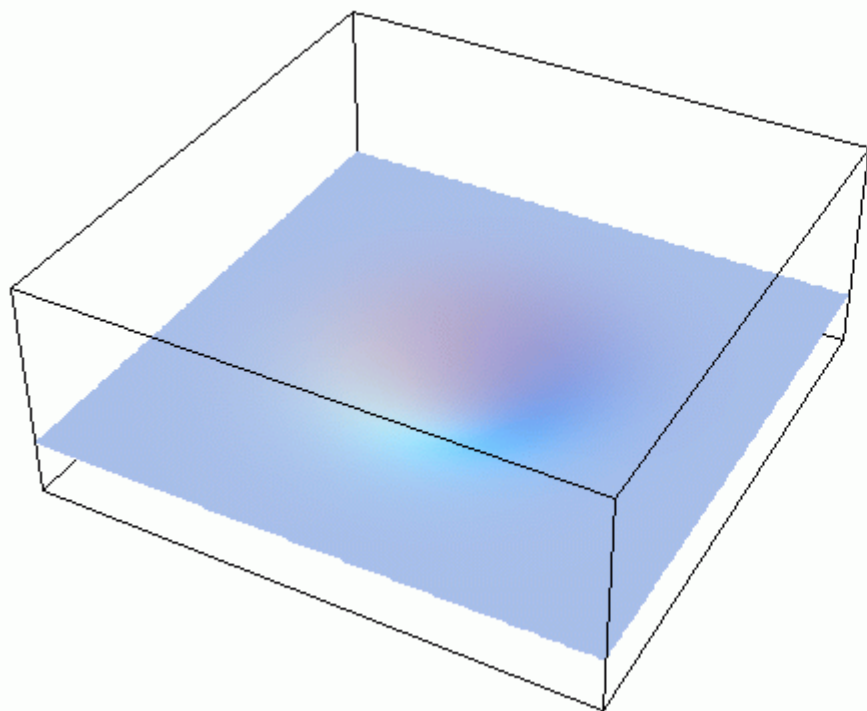




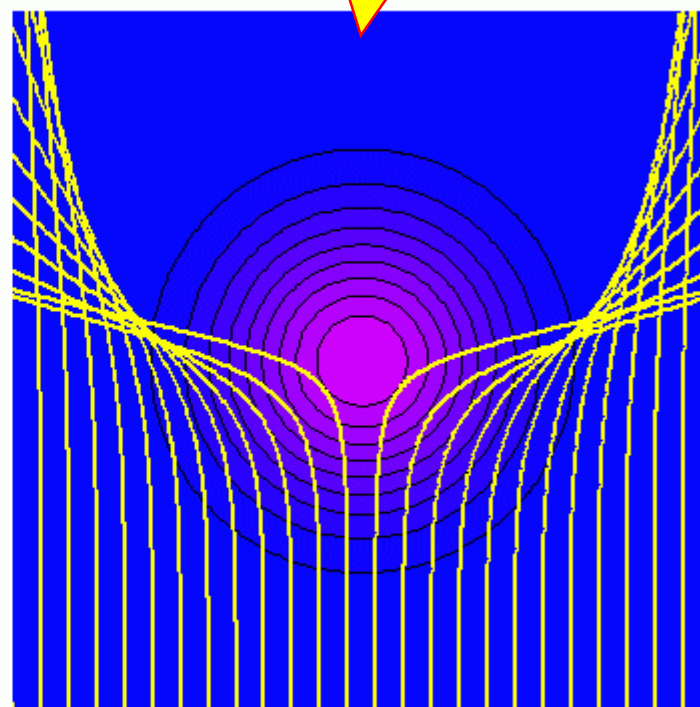
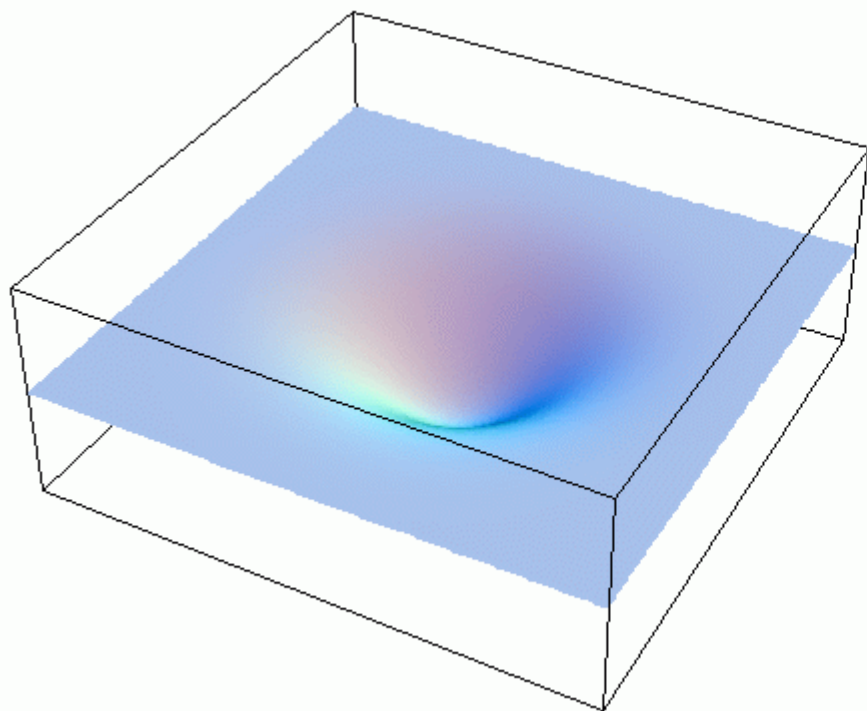
# Фокусировка лучей областью с пониженной скоростью распространения волн



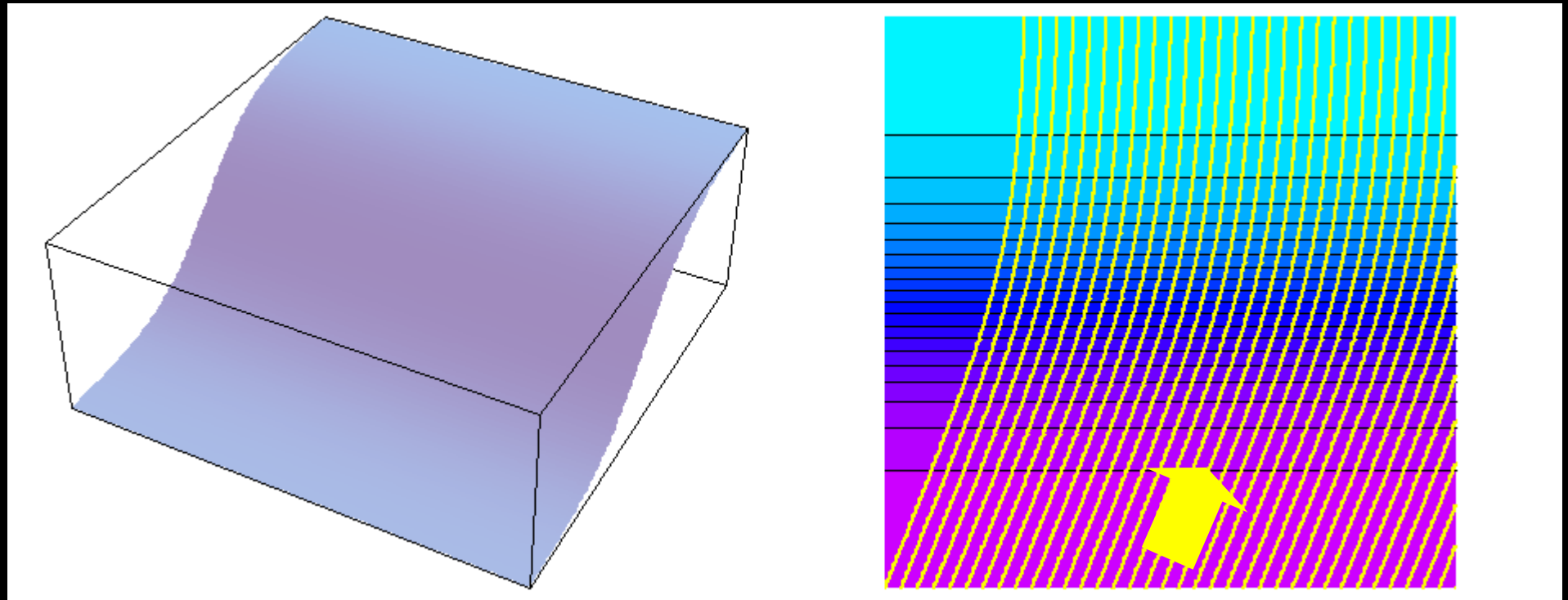
# Дефокусировка лучей областью с повышенной скоростью распространения волн



# Зона тени



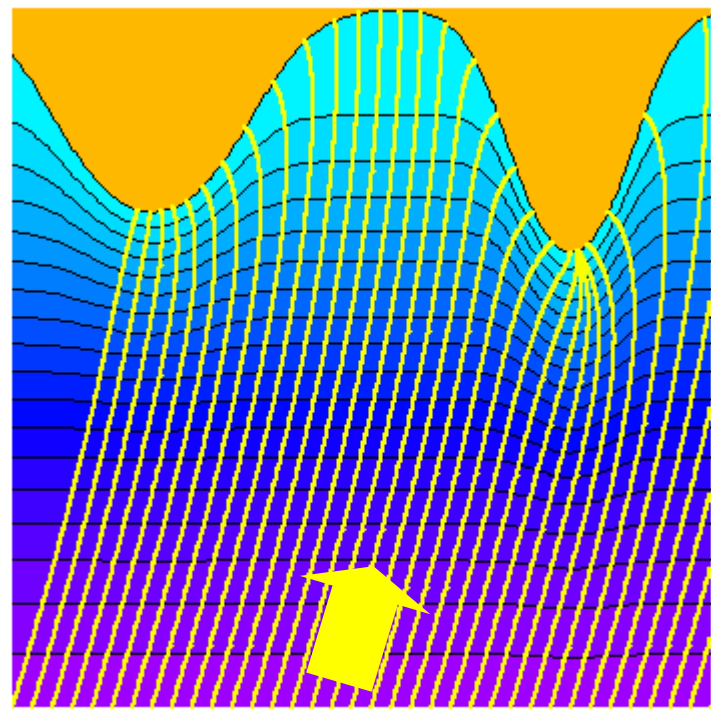
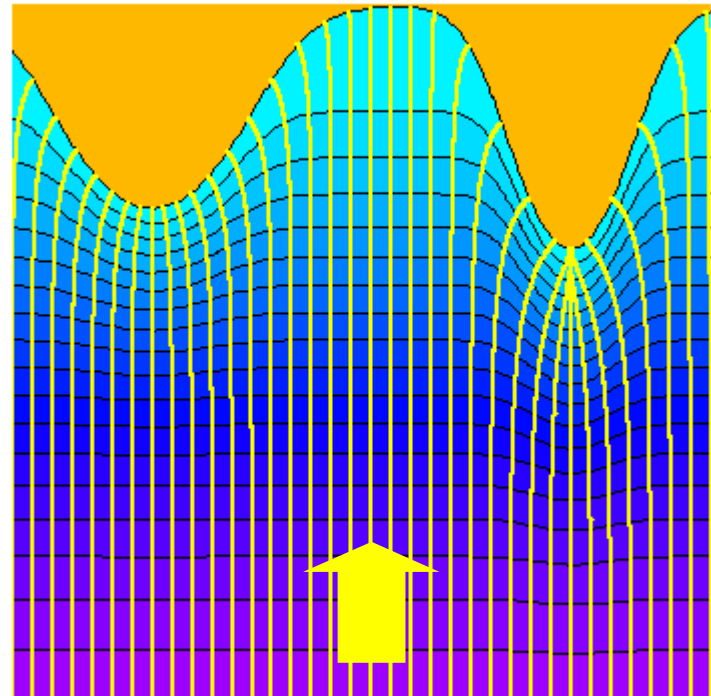
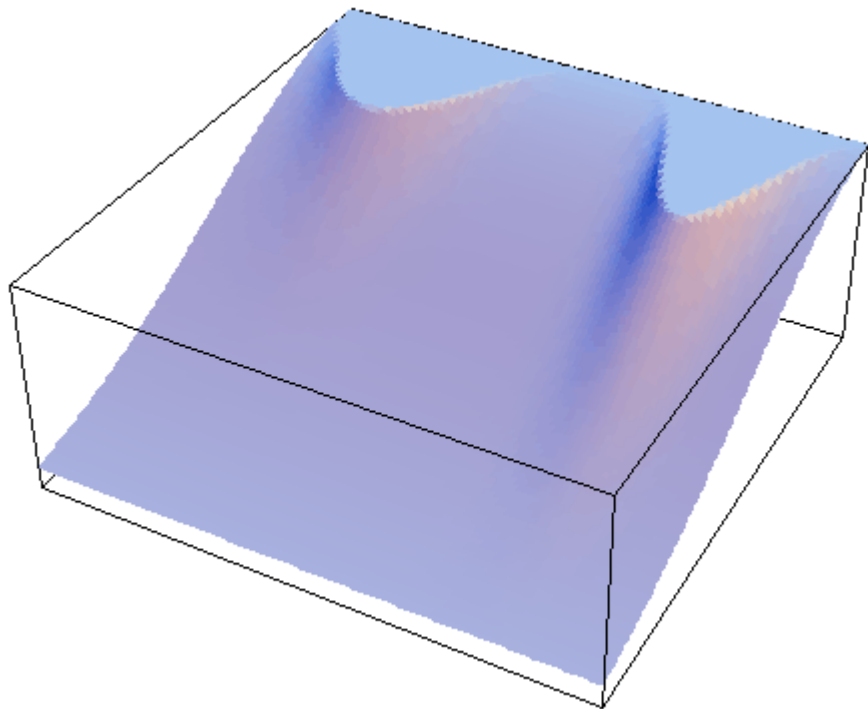
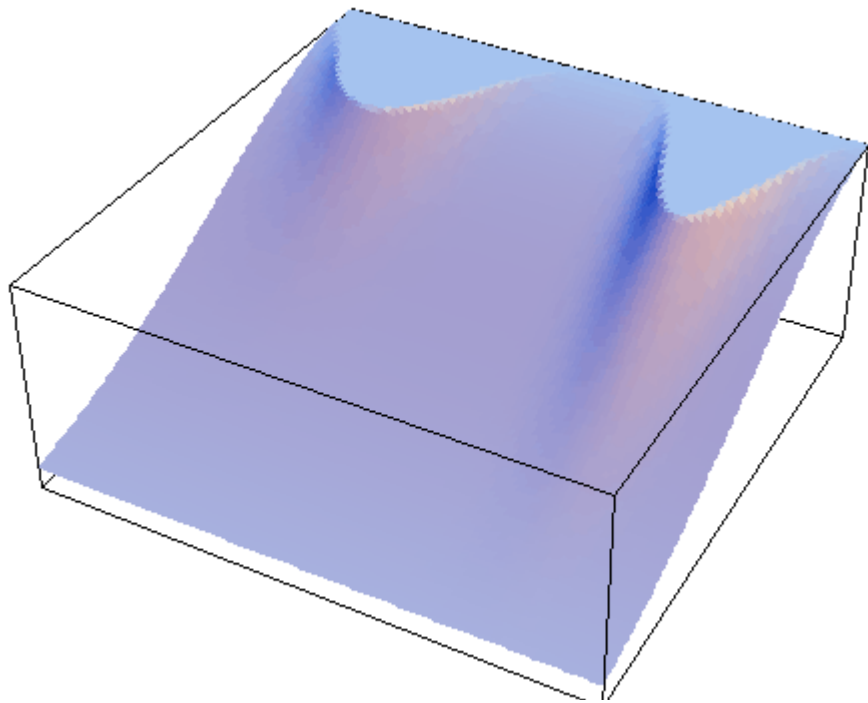
# Рефракция гравитационных волн в прибрежной зоне



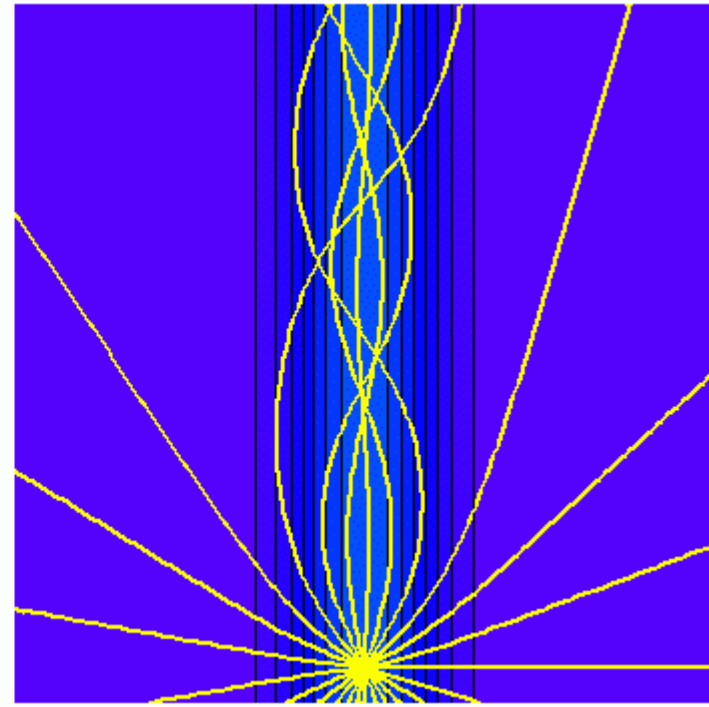
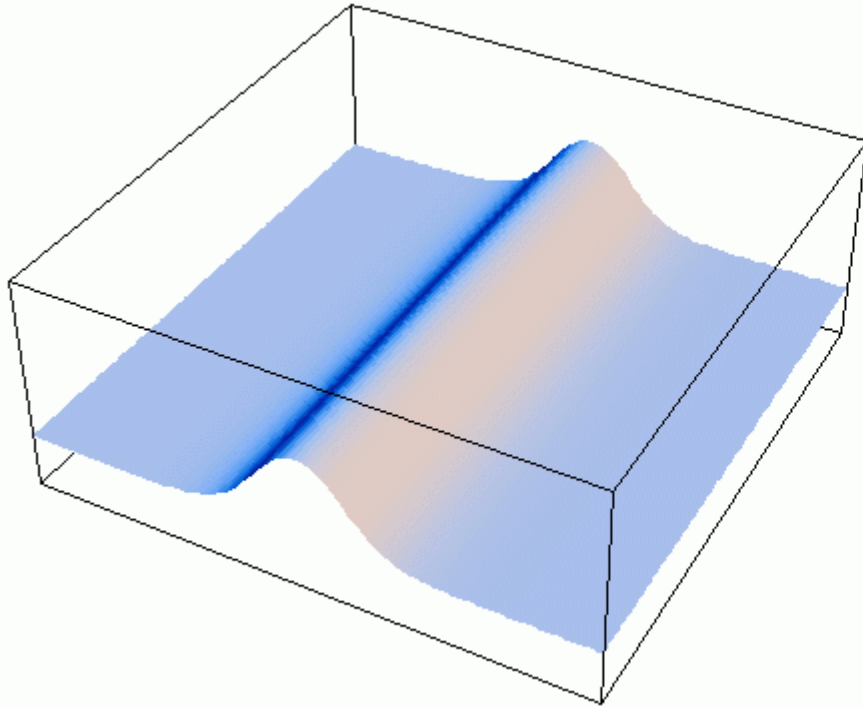
**Волновые лучи подходят к  
побережью по нормали**

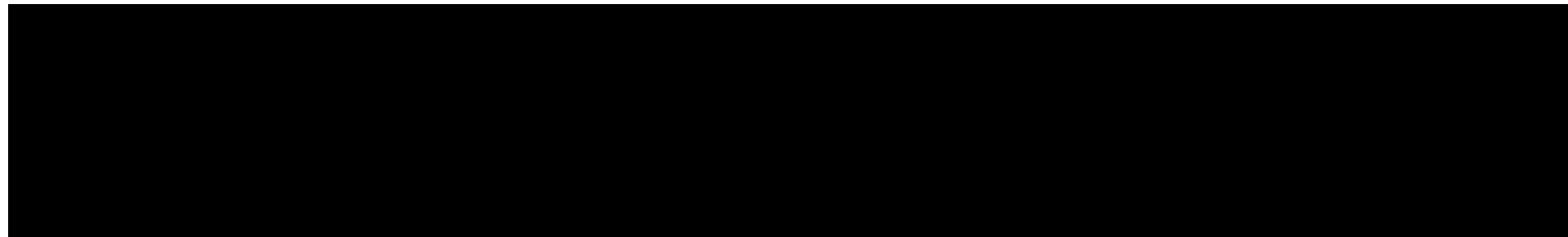
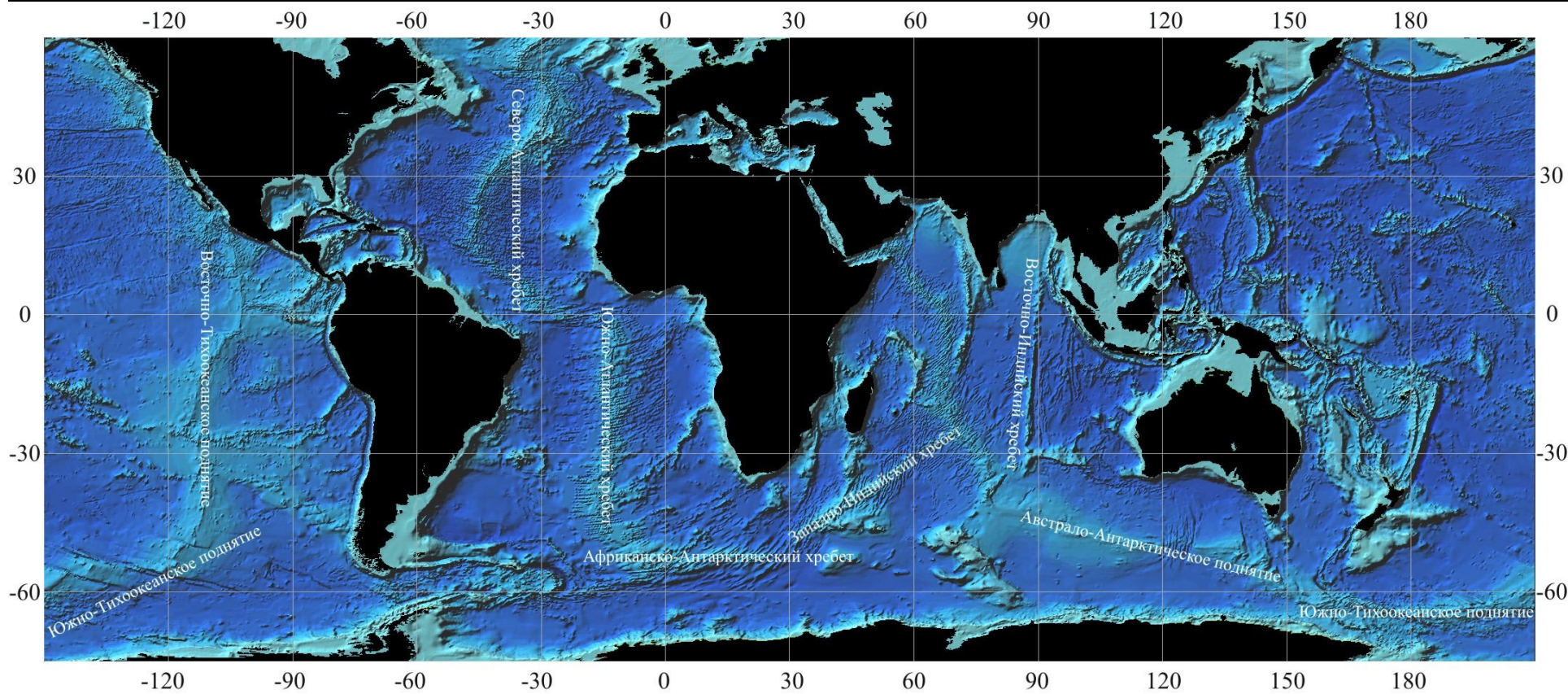
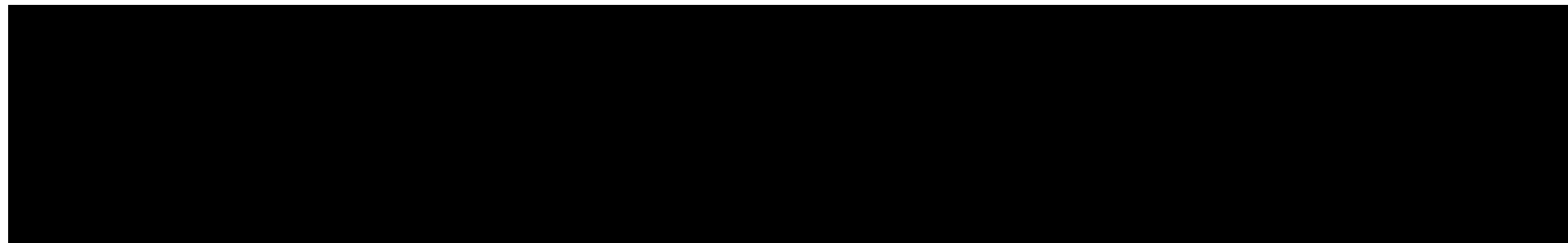
# Концентрация волновой энергии на мысах и защищенность бухт





# Захват волн подводными хребтами

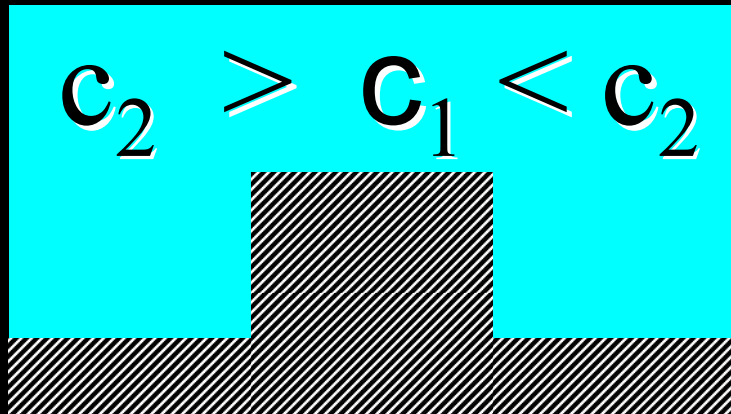




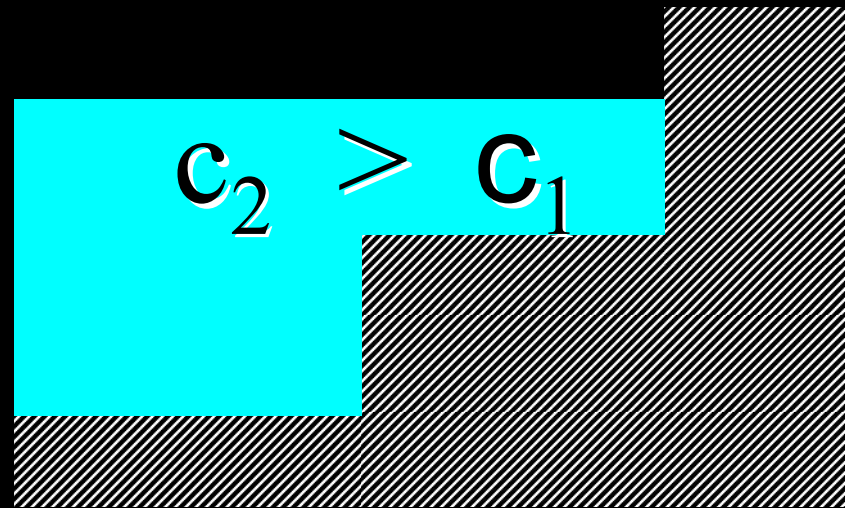


# Захваченные волны

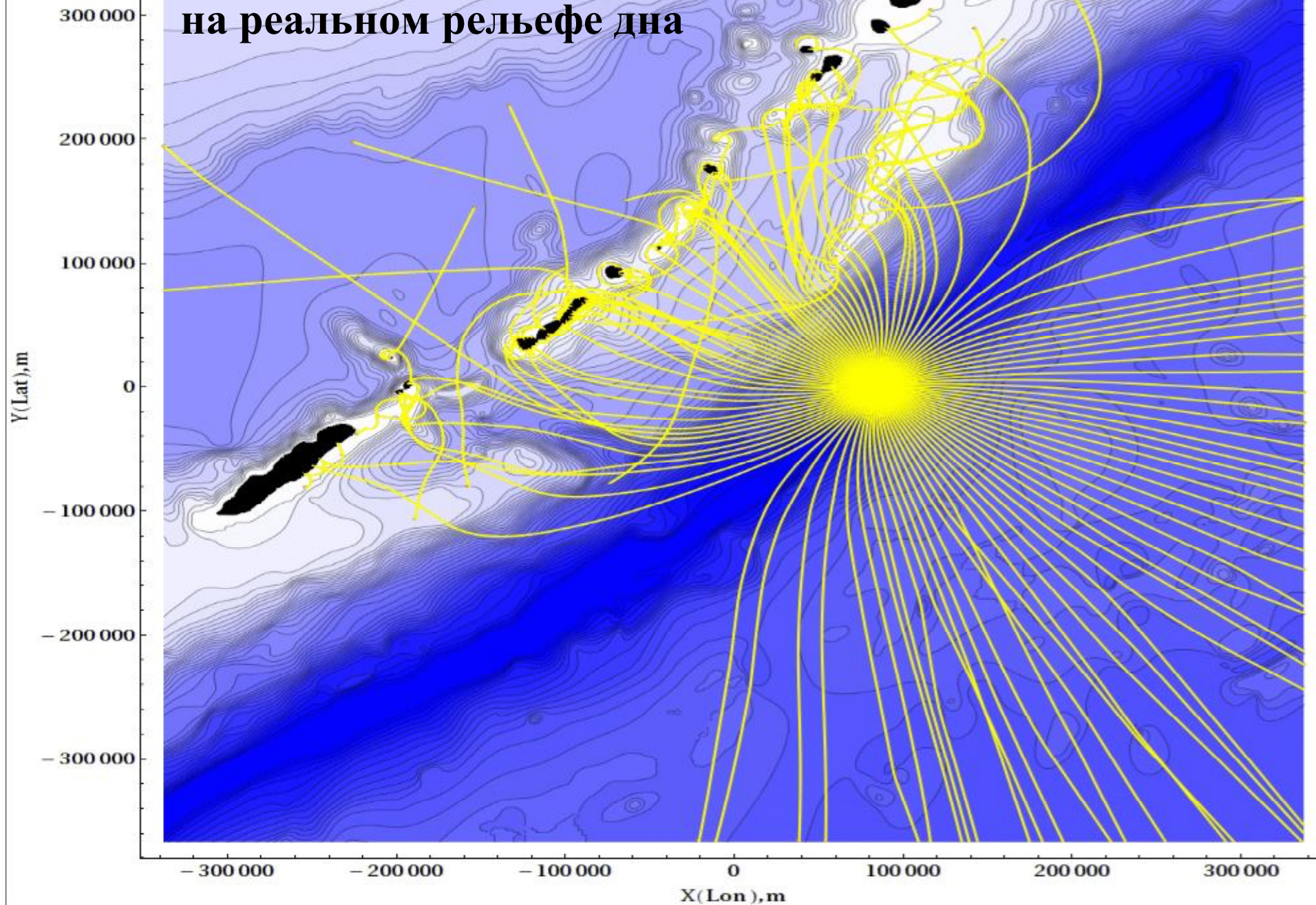
ПОДВОДНЫЙ  
хребет



МАТЕРИКОВЫЙ  
склон и берег



**Лучевая картина (длинные волны)  
на реальном рельефе дна**



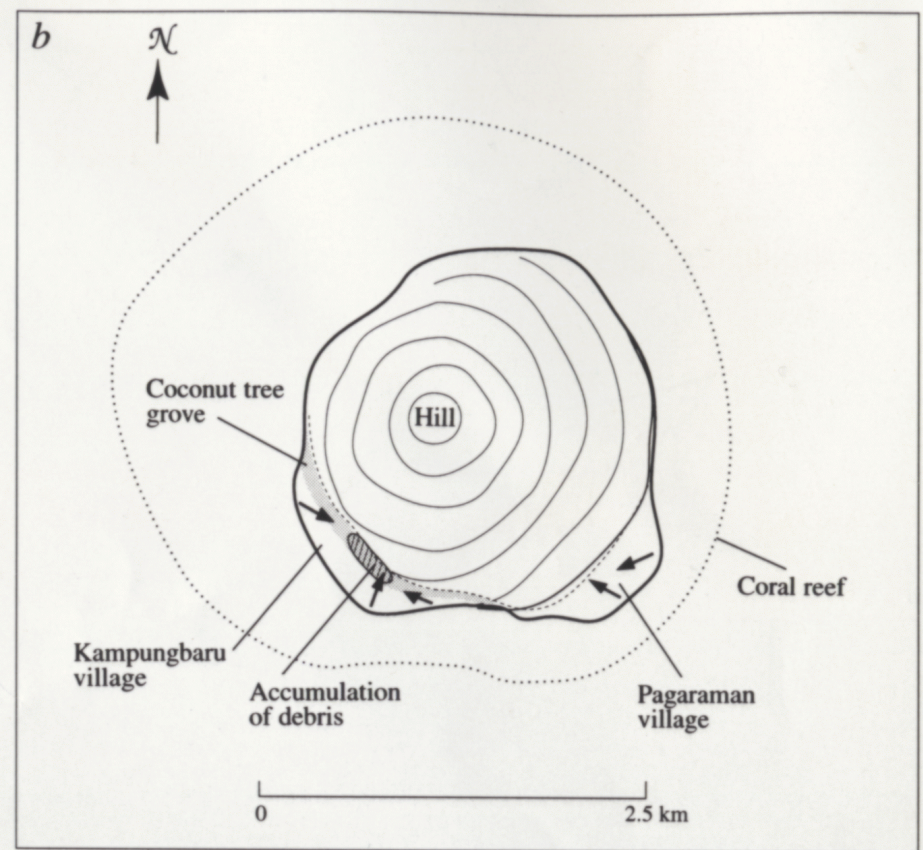
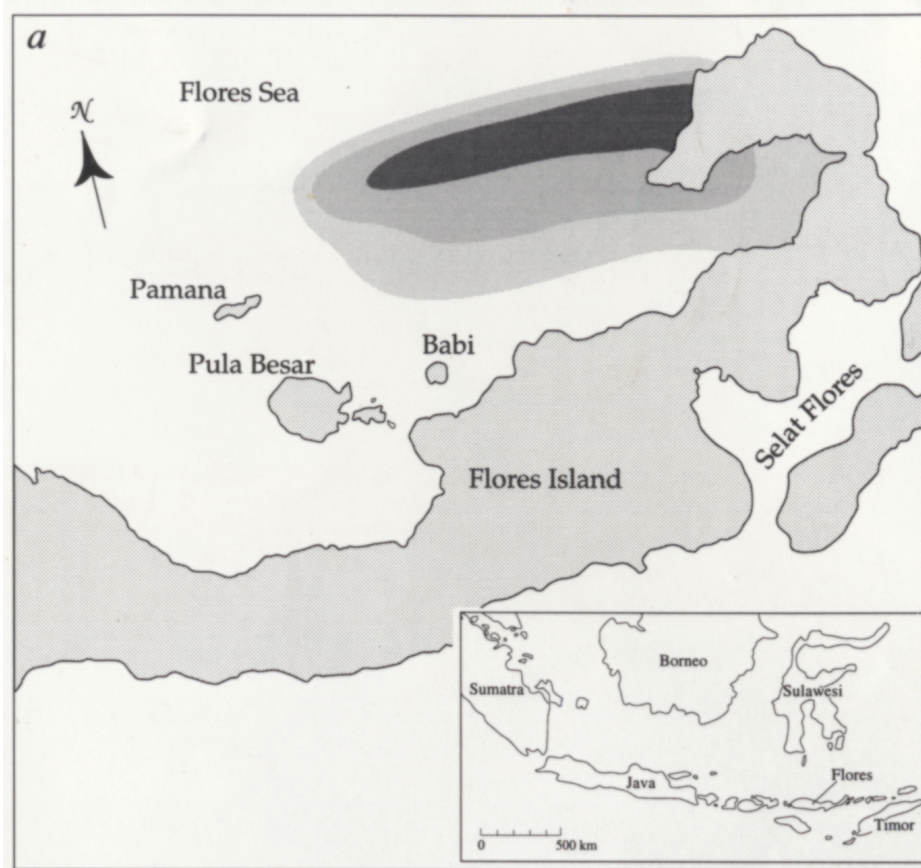


FIG. 1 a, Babi Island is located ~5 km offshore from Flores Island, Indonesia. Although detailed sea bottom sounding data are not available, the underwater slope from the island is steep: the 100-m-deep contour around the island is very close to the shore, one sounding in the narrow gap between Babi and Flores is 241 m deep, and the 860-m sounding point in the Flores Sea is 10 km from the island. The shaded areas in the Flores Sea, which represent 3-m, 2-m and 1-m contours, respectively, are estimated vertical tectonic displacement of sea floor where tsunamis were generated<sup>10</sup>. b, Details of Babi Island. Near the

middle of the south shore, there is a small tidal flat which separates Kampungbaru village (on the west side) from Pagaraman village (on the east side). Both villages were completely destroyed by the tsunamis. The tsunami run-up directions, indicated by solid arrow marks, were estimated from the directions of tree falls and debris accumulations (based on field notes taken by H.Y. and F. Imamura during the survey in 1992–93). The maximum tsunami run-up heights are 5.6 m in Pagaraman and 7.1 m in Kampungbaru, respectively.

*from H. Yeh et al, 1994*

500 M  
1000 ft

Pulau Babi



Pulau Babi



© 2012 Google

maple

**Pagaraman, Babi Island**

**Высота заплеска  
более 26 м**

**Число жертв  
800 человек**



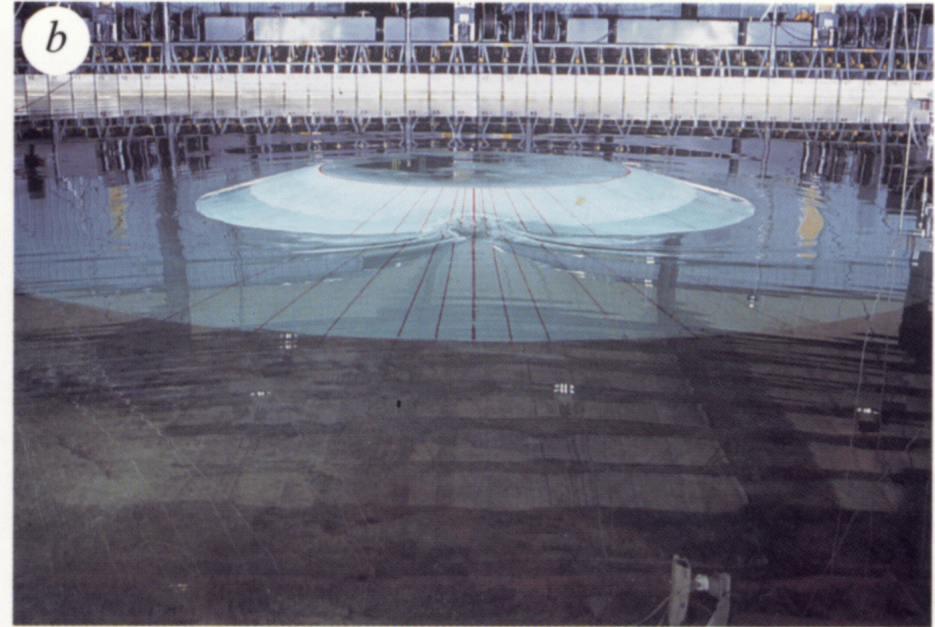
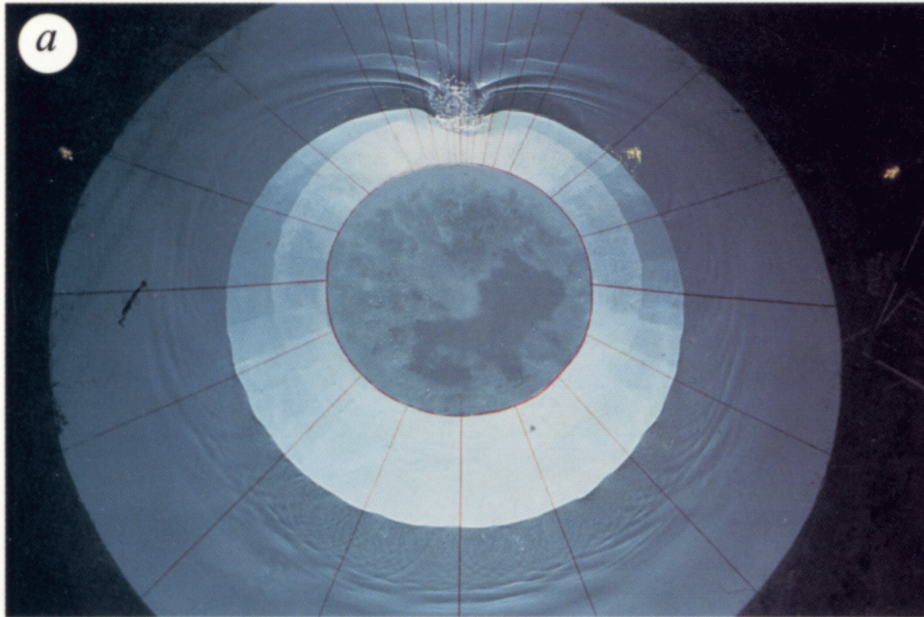
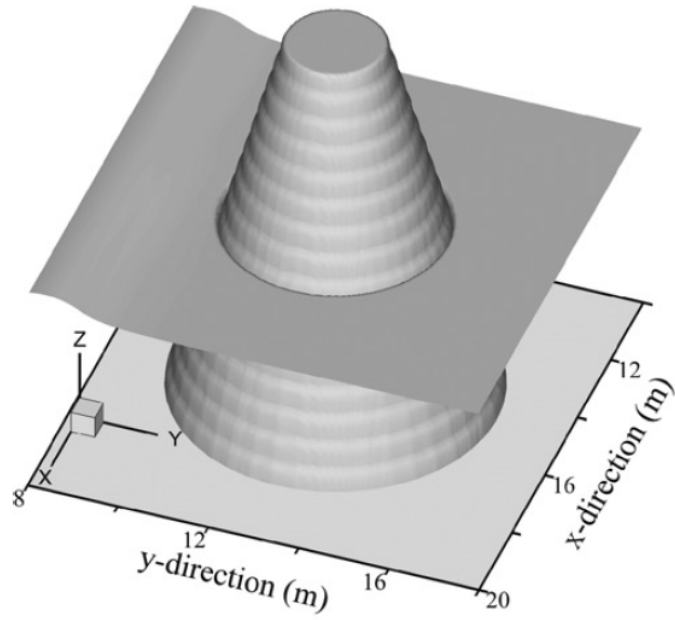


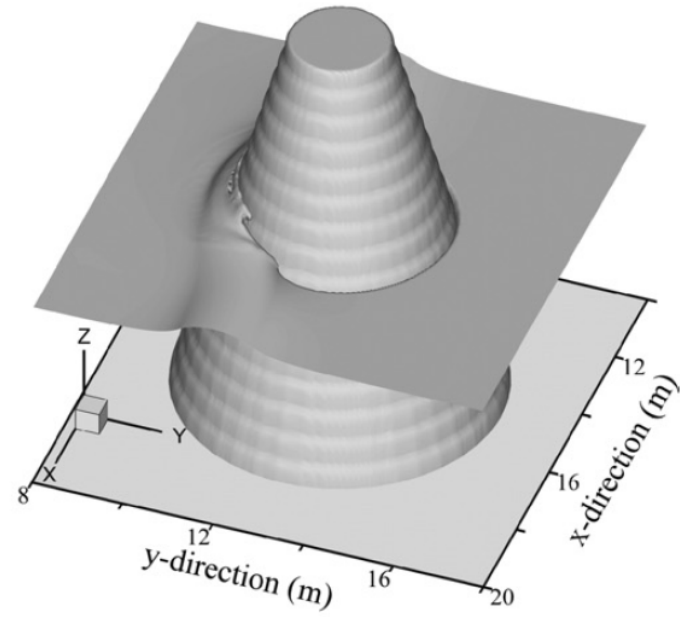
FIG. 3 Views of wave run-up onto the rear side of the cone-shaped island in the laboratory model. *a*, Top view; the wave struck the island from the bottom of the photograph. *b*, Wave paddles are visible beyond

the island. To generate a solitary wave in a precisely controlled manner, the hydraulic powered electro-servo system was used to set the vertical paddles in motion in the horizontal direction.

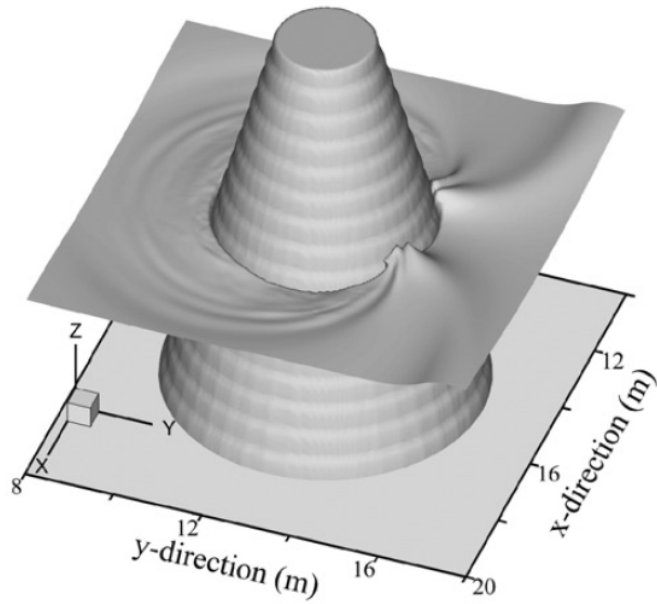
*from H. Yeh et al, 1994*



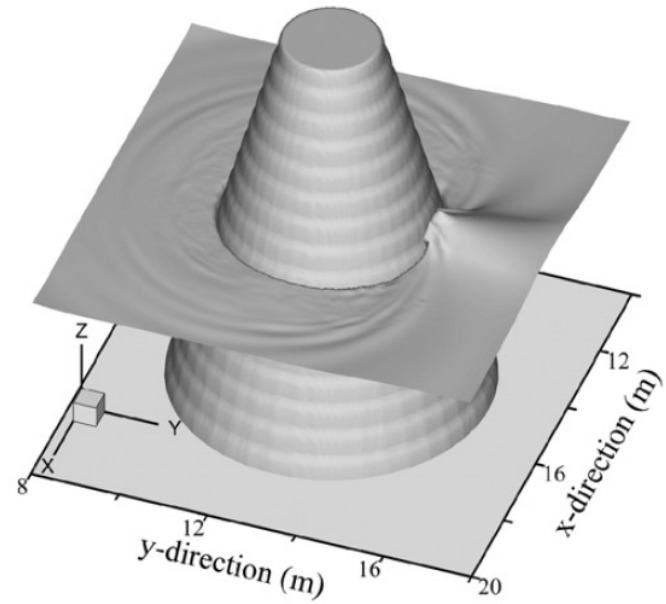
(a)  $t = 7.0$  sec



(b)  $t = 9.0$  sec



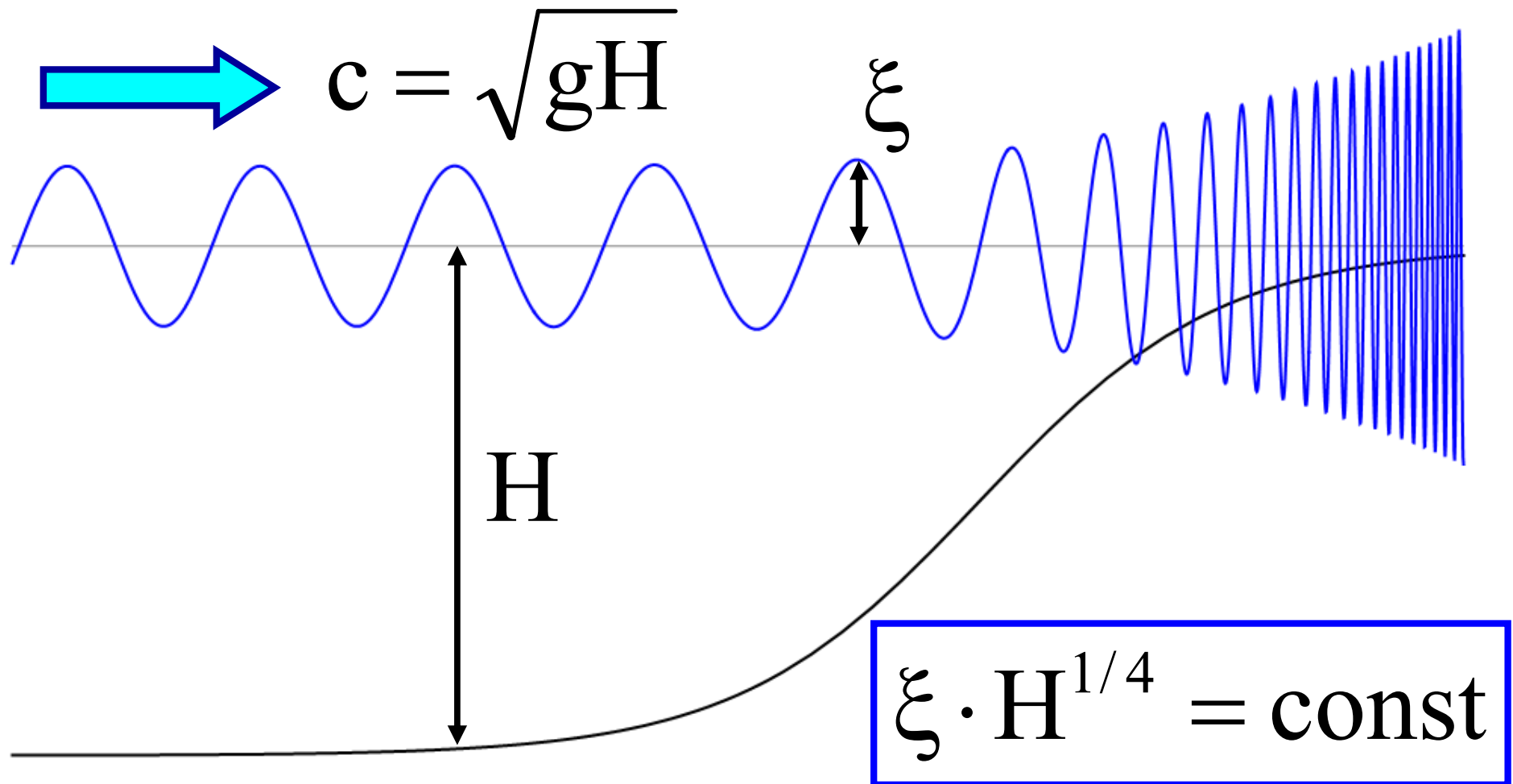
(c)  $t = 12.0$  sec



(d)  $t = 13.0$  sec

## Закон Грина (закон "1/4")

$$W \sim \xi^2 \quad Q \sim \xi^2 c \sim \xi^2 \sqrt{H} = \text{const}$$





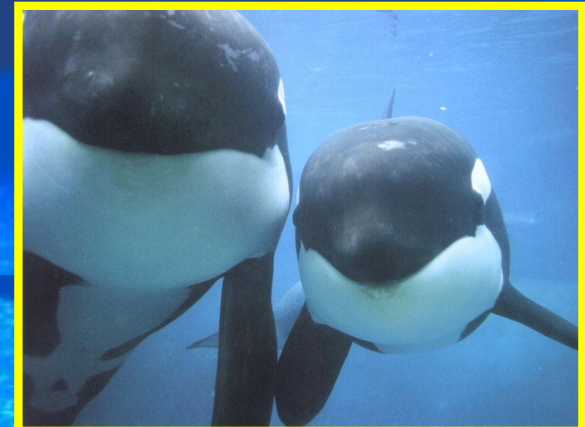
# Акустические волны

1877 «Теория звука» Лорда Рэлея

1826, Daniel Colladon, Charles Sturm,  
первое измерение скорости звука  
на Женевском озере

Исаак Ньютон, 1687, первое  
математическое описание  
звуковых волн

1490, Леонардо да Винчи:  
«...погрузив трубу одним концом  
в воду и прижав другой ее конец к  
уху, можно услышать корабли,  
идущие вдали...»



# Акустические волны

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0 \end{array} \right.$$

Предположения:

$\vec{v}'$  - малая

величина

$$\frac{\vec{\nabla} p_0}{\rho_0} = \vec{g}$$

$\rho_0$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}' \quad \vec{v}_0 = 0$$

$$p = p_0 + p' \quad |p'| \ll p_0$$

$$\rho = \rho_0 + \rho' \quad |\rho'| \ll \rho_0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p'}{\rho_0} \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \vec{v}' = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p'}{\rho_0} \\ \frac{1}{c^2} \frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \vec{v}' = 0 \end{array} \right. \left| \frac{\partial}{\partial t} \right.$$

$$\rho' = \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s p' \quad \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s = \frac{1}{c^2}$$

## Волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c^2 \Delta p' = 0$$

**Скорость звука**

# Волновое уравнение (акустика)

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c^2 \Delta p' = 0$$

$$c^2 = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \approx \begin{array}{l} \text{воздух} \\ 340 \text{ м / с} \\ \text{вода} \\ 1500 \text{ м / с} \end{array}$$

**Скорость звука**

**Эмпирическая зависимость скорости звука  
в воде от температуры  $T$ , солёности  $S$  и  
глубины  $z$  (давления)**

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 \\ + (1.34 - 0.010T)(S - 35) + 0.016z.$$

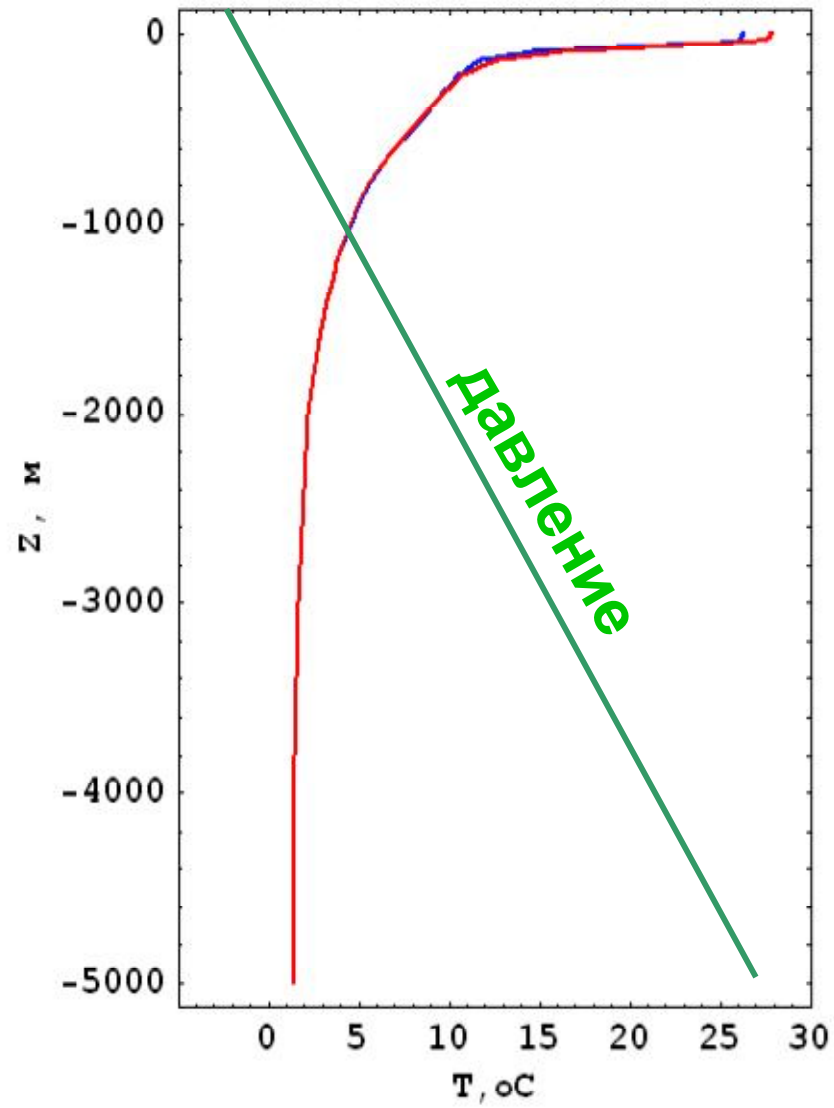
$$1480 \text{ м/с} < c < 1545 \text{ м/с}$$

$$\frac{\partial c}{\partial T} > 0$$

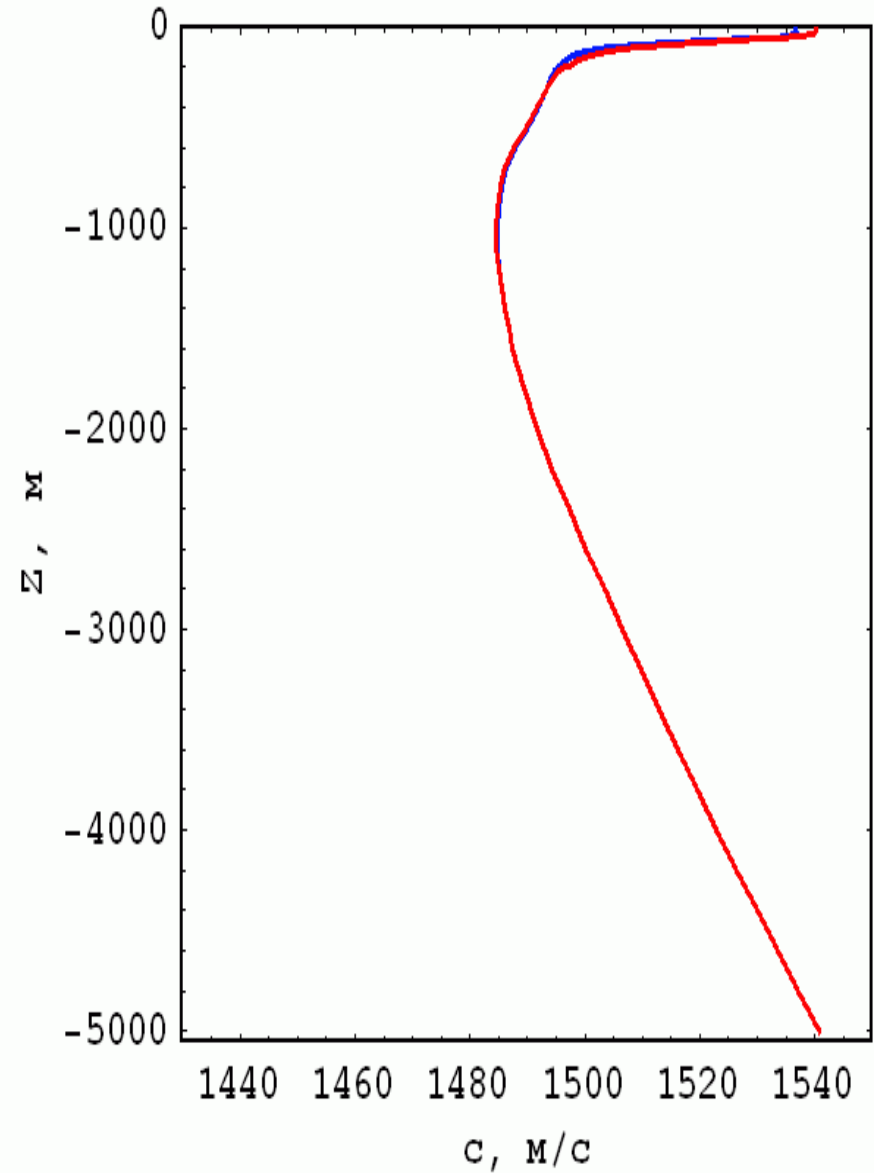
$$\frac{\partial c}{\partial p} > 0$$

Lat=10 Lon=-150

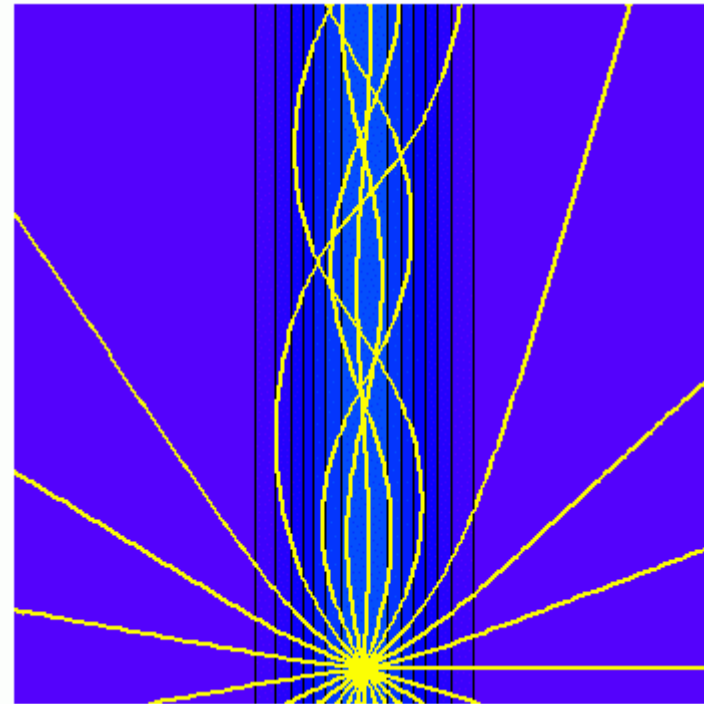
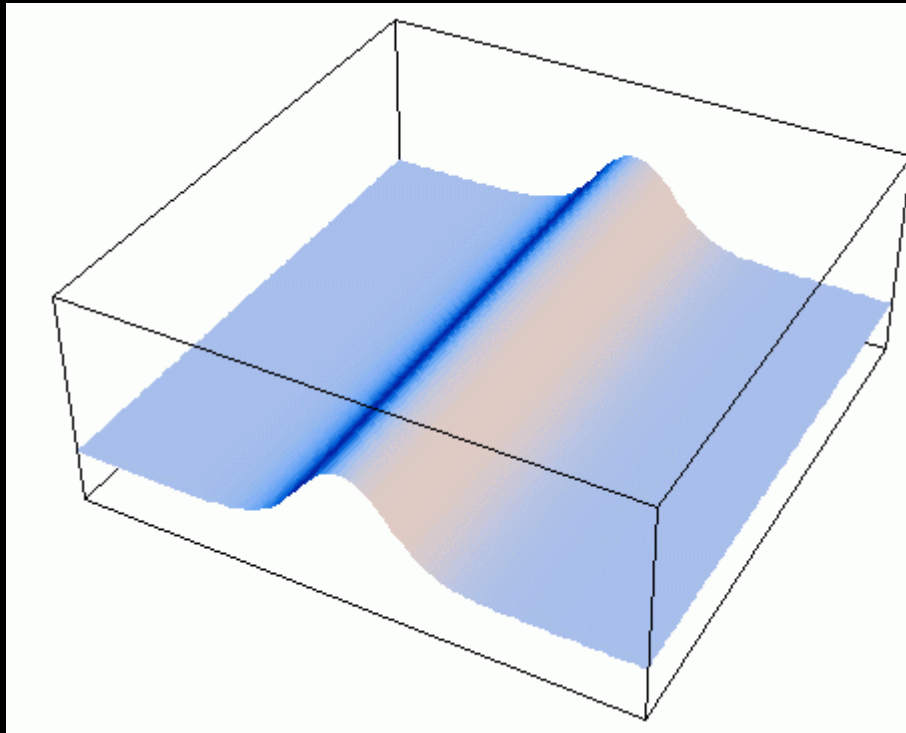
## Температура



## Скорость звука



# Захват волн подводными хребтами т.е. областями с пониженной скоростью распространения длинных волн



**Область с пониженной скоростью звука  
может захватывать звуковые волны!**

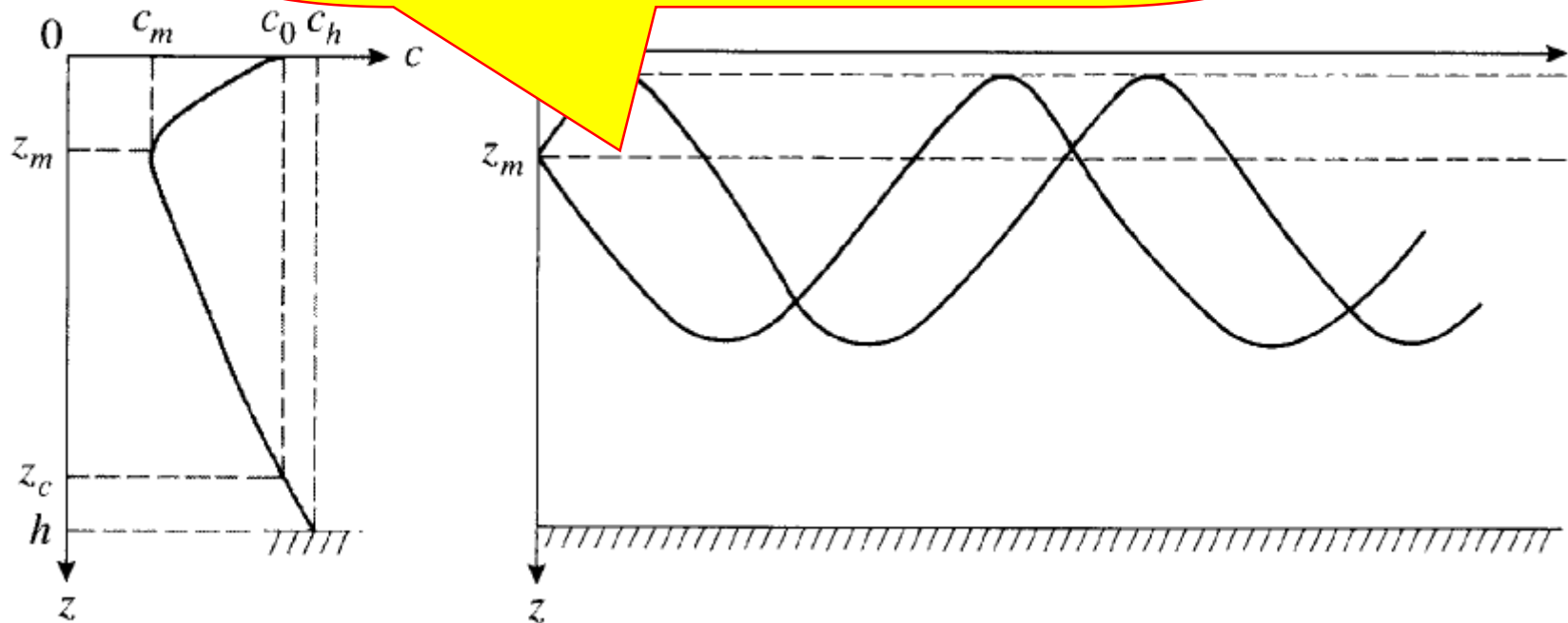
# Подводный звуковой канал (ПЗК)

Deep Sound Channel

SOFAR Channel

(Sound Fixing and Ranging)

Ось ПЗК обычно лежит на  
глубине  $\sim 1000$  м





# Подводный звуковой канал (ПЗК)



**William Maurice  
Ewing**  
**1906 – 1974**  
american geophysicist and  
oceanographer

**обнаружен и описан  
в 1940-е годы двумя  
исследователями  
(независимо)**



**Леонид  
Максимович  
Бреховских**  
**1917-2005**  
выдающийся учёный  
в области физики,  
акустики океана,  
академик АН СССР

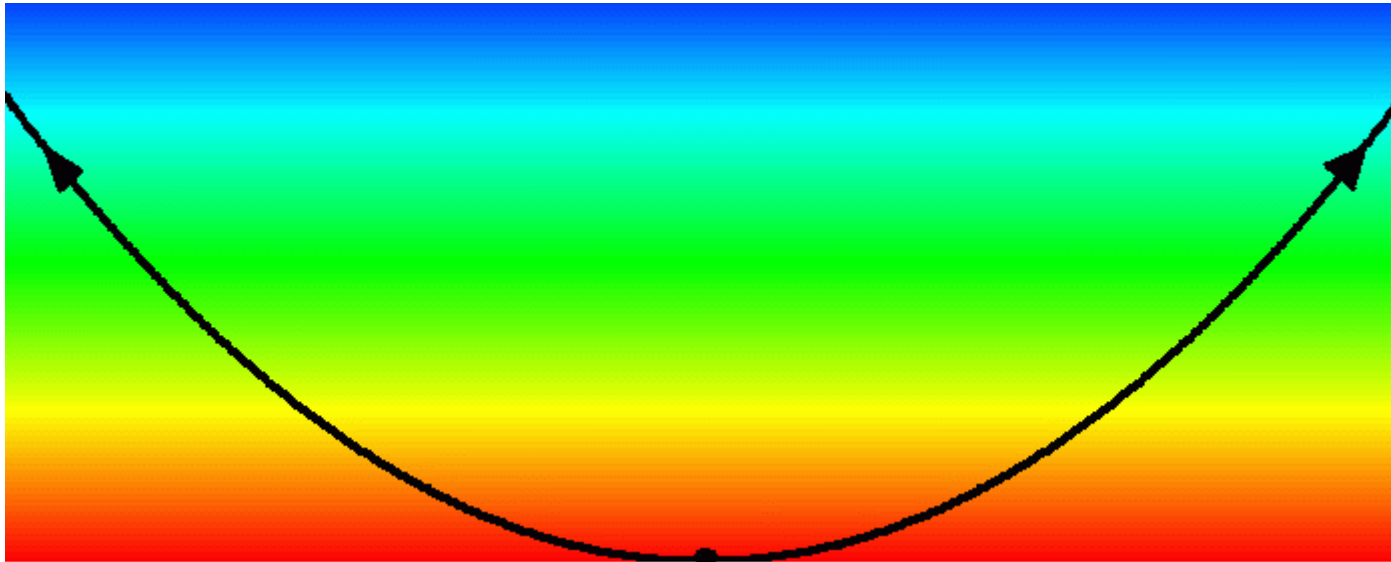
# Прикладная гидроакустика

- **Акустический радар (сонар)**
- **Подводная связь (передача информации)**
- **Подводная навигация**
- **Наблюдения за погодой и климатом (регистрация шумов от ветра или осадков, акустическая термометрия)**
- **Измерение скорости течения (ADCP)**
- ...

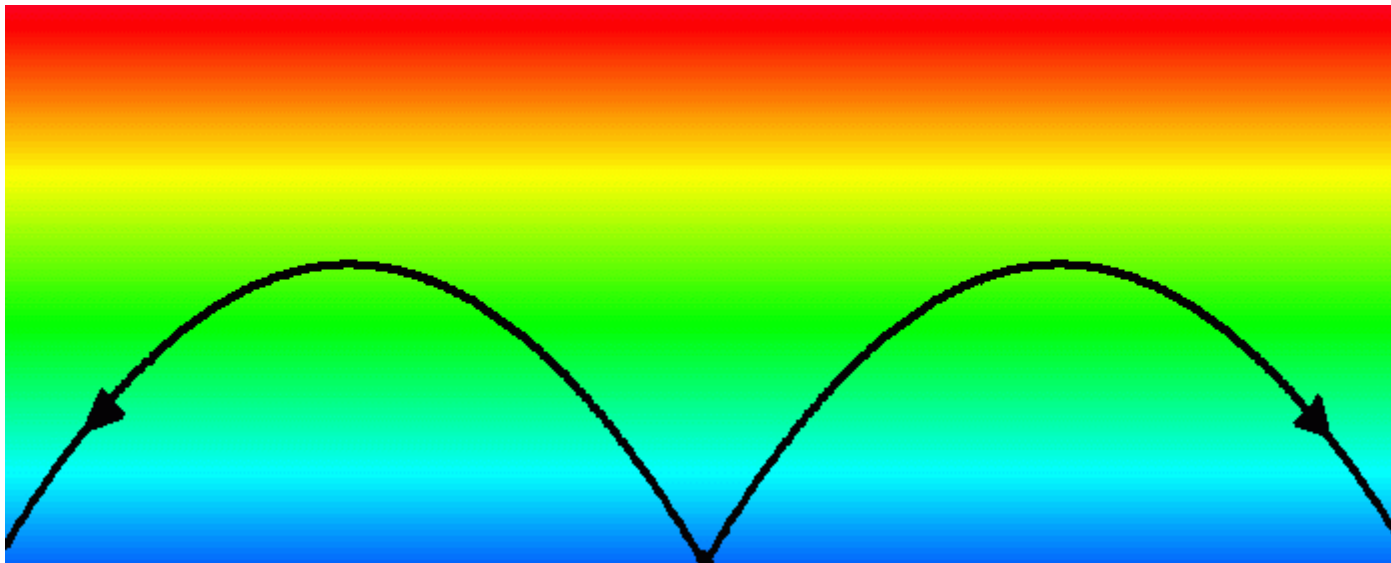
# Акустические волны в атмосфере

$$c \equiv \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{\frac{C_p R T}{C_v \mu}} \approx 340 \text{ м / с}$$

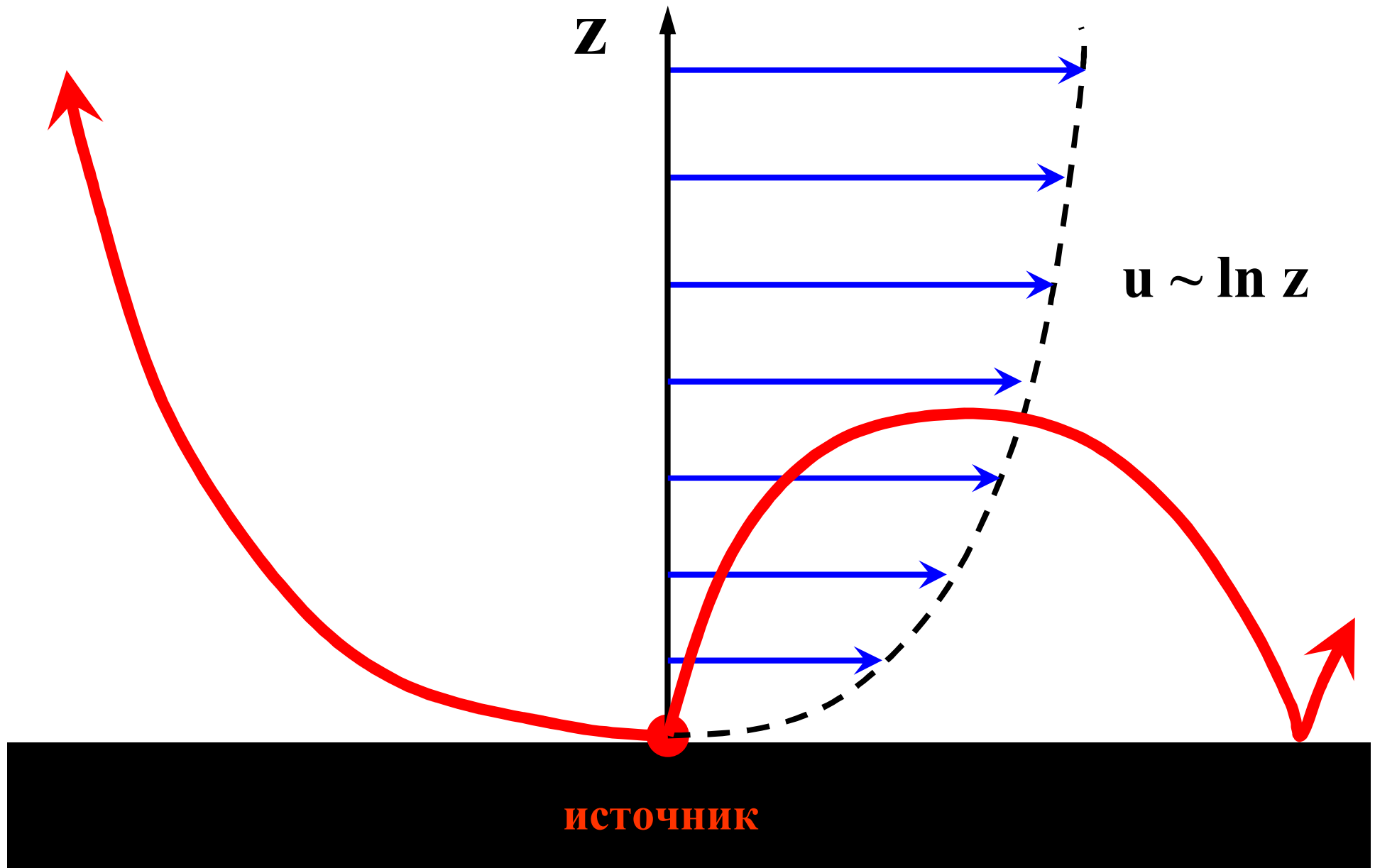
- ❑ В идеальных газах при  $T=\text{const}$  скорость звука не зависит от давления
- ❑ В атмосфере (гомосфере) скорость звука определяется только температурой



**ИСТОЧНИК**



# Влияние ветра на распространение звука



**Адиабатический  
градиент температуры  
и  
устойчивость  
атмосферы**

# Критерий устойчивости стратификации

устойчивое  
состояние

нейтральное  
состояние

неустойчивое  
состояние

$$\frac{d\rho}{dz} < \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

$$\frac{d\rho}{dz} = \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

$$\frac{d\rho}{dz} > \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

$$\left. \frac{d\rho}{dz} \right|_{\text{нейтр}} = -\frac{\rho g}{c^2} \equiv \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

адиабатический  
градиент

$$\delta Q = C_V dT + p dV$$

1-е начало ТД

$$C_V dT + p dV = 0$$

адиабатич. процесс

$$d \left( \ln \left[ \frac{pV}{T} = R \right] \right) \Rightarrow \frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T}$$

$$C_V dT + \frac{pV}{RT} \left( \frac{dT}{T} - \frac{dp}{p} \right) = 0$$

ТОЖДЕСТВО  
Майера

$$C_V dT + R dT - RT \frac{dp}{p} = 0$$



$$C_V dT + R dT - RT \frac{dp}{p} = 0$$

Молярные теплоемкости  
двухатомного газа ( $N_2, O_2$ )

$$C_p = \frac{7}{2} R \quad C_V = \frac{5}{2} R \quad R = C_p - C_V$$

$$C_V dT + (C_p - C_V) dT - RT \frac{dp}{p} = 0$$

$$C_p \frac{dT}{T} = R \frac{dp}{p}$$

уравнение адиабатич. процесса

$$C_p \frac{dT}{T} = R \frac{dp}{p}$$

$$p = \frac{\rho}{\mu} RT$$

$$dp = -\rho g dz$$

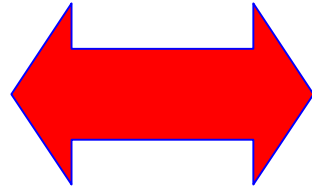
$$\frac{dT}{dz} = -\mu \frac{g}{C_p} = -\frac{g}{c_p}$$

Адиабатический  
градиент  
температуры

удельная  
теплоемкость

# Соответствие адиабатических градиентов плотности и температуры

$$\frac{d\rho}{dz} = -\frac{\rho g}{c^2}$$



$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p}$$

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V} \Rightarrow dV = -V \frac{d\rho}{\rho}$$

$$C_v dT + p dV = 0 \Rightarrow C_v dT - p V \frac{d\rho}{\rho} = 0$$

$$d \left( \ln \left[ \frac{p}{\rho T} = \frac{R}{\mu} \right] \right) \Rightarrow \frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T}$$

$$C_v \left( \frac{dp}{p} - \frac{d\rho}{\rho} \right) T = pV \frac{d\rho}{\rho}$$

$$C_v \left( \frac{dp}{p} - \frac{d\rho}{\rho} \right) T = RT \frac{d\rho}{\rho}$$

$$C_v \cancel{T} \frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} \cancel{T} (C_v + R)$$

$$dp = -\rho g dz$$

$$p = \frac{\rho}{\mu} RT$$

$$C_p = C_v + R$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} \frac{C_p}{C_v}$$

$$\frac{d\rho}{dz} = - \frac{\rho g}{\frac{C_p}{C_v} \frac{RT}{\mu}} = - \frac{\rho g}{c^2}$$

$$\frac{C_p}{C_v} \frac{RT}{\mu}$$

квадрат  
скорост  
и звука

$$\left( \frac{dp}{d\rho} \right)_s = c^2$$

$$\frac{dT}{dz} = -\mu \frac{g}{C_p}$$

**Сухо-  
адиабатический  
градиент  
температуры**

$$= 0.029 \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} \right] \frac{9.8 \left[ \text{М} / \text{С}^2 \right]}{\frac{7}{2} \cdot 8.31 \left[ \frac{\text{ДЖ} \cdot \text{К}}{\text{МОЛЬ}} \right]} \approx$$
$$\approx 0.01 \text{ К} / \text{М}$$

**=10 К/км**

$$C_p \frac{dT}{T} = R \frac{dp}{p} \quad \Rightarrow \quad C_p dT - \mu \frac{dp}{\rho} = 0$$

$$C_p dT - \mu \frac{dp}{\rho} = -\mu L dq \quad dp = -\rho g dz$$

удельная теплота парообразования

относительное содержание  
влаги в воздухе

$$C_p dT + \mu \frac{\rho g dz}{\rho} = -\mu L dq \quad q(z) = q[T(z)]$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} - \frac{L}{c_p} \frac{dq}{dz}$$

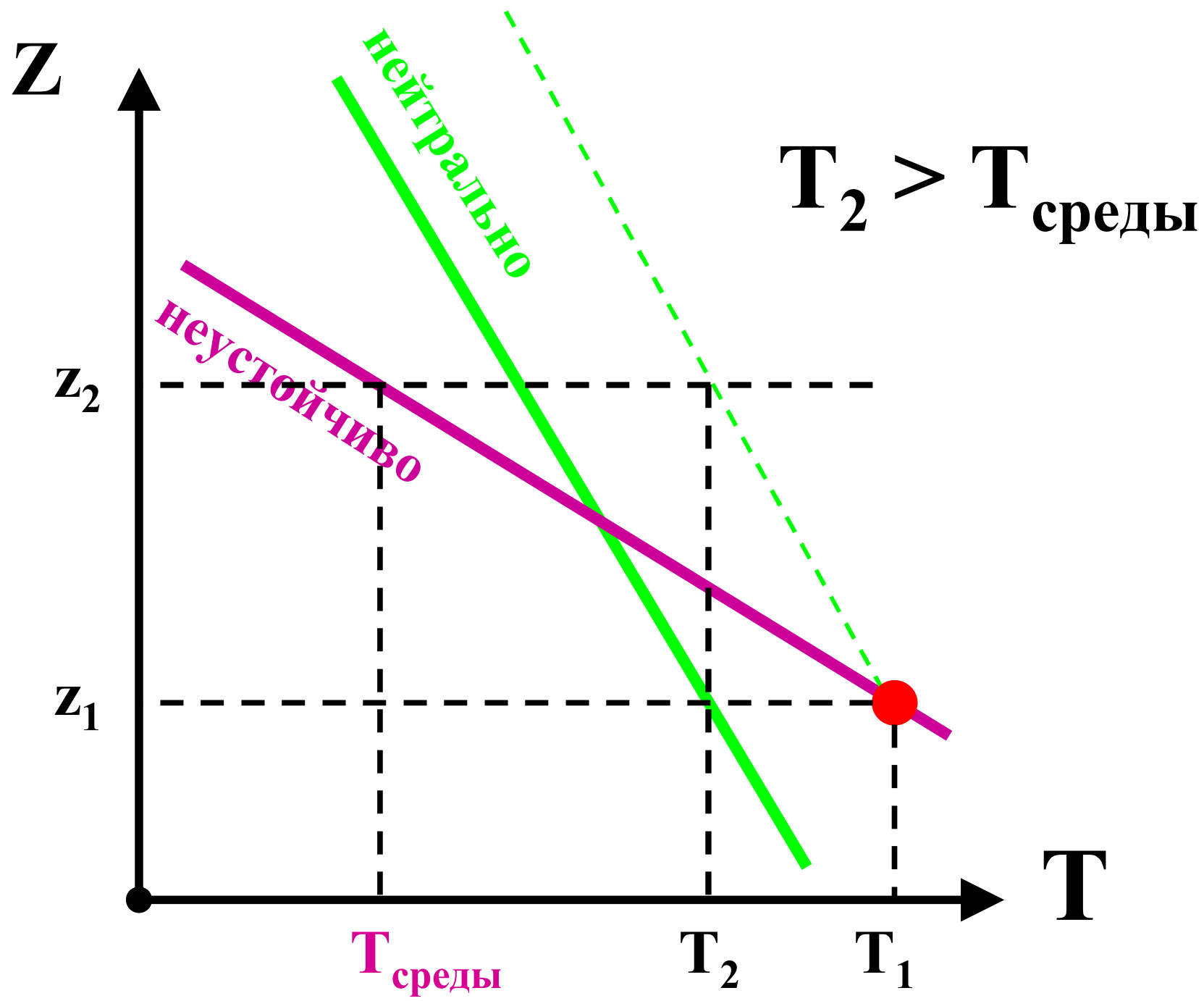
$$\frac{dq}{dz} = \frac{dq}{dT} \frac{dT}{dz}$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} - \frac{L}{c_p} \frac{dq}{dT} \frac{dT}{dz}$$

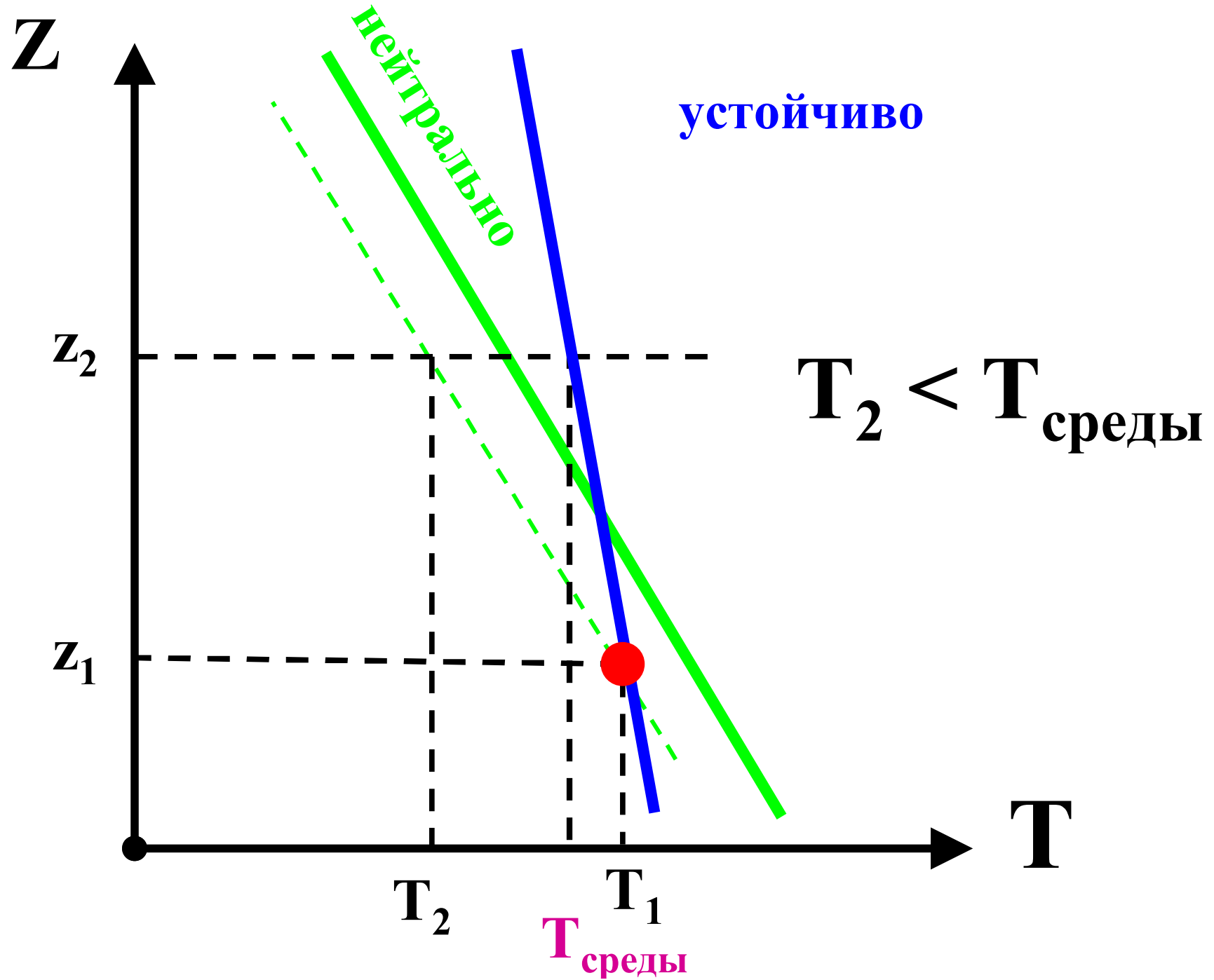
$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g/c_p}{1 + \frac{L}{c_p} \frac{dq}{dT}}$$

**Влажноадиабатический  
градиент**

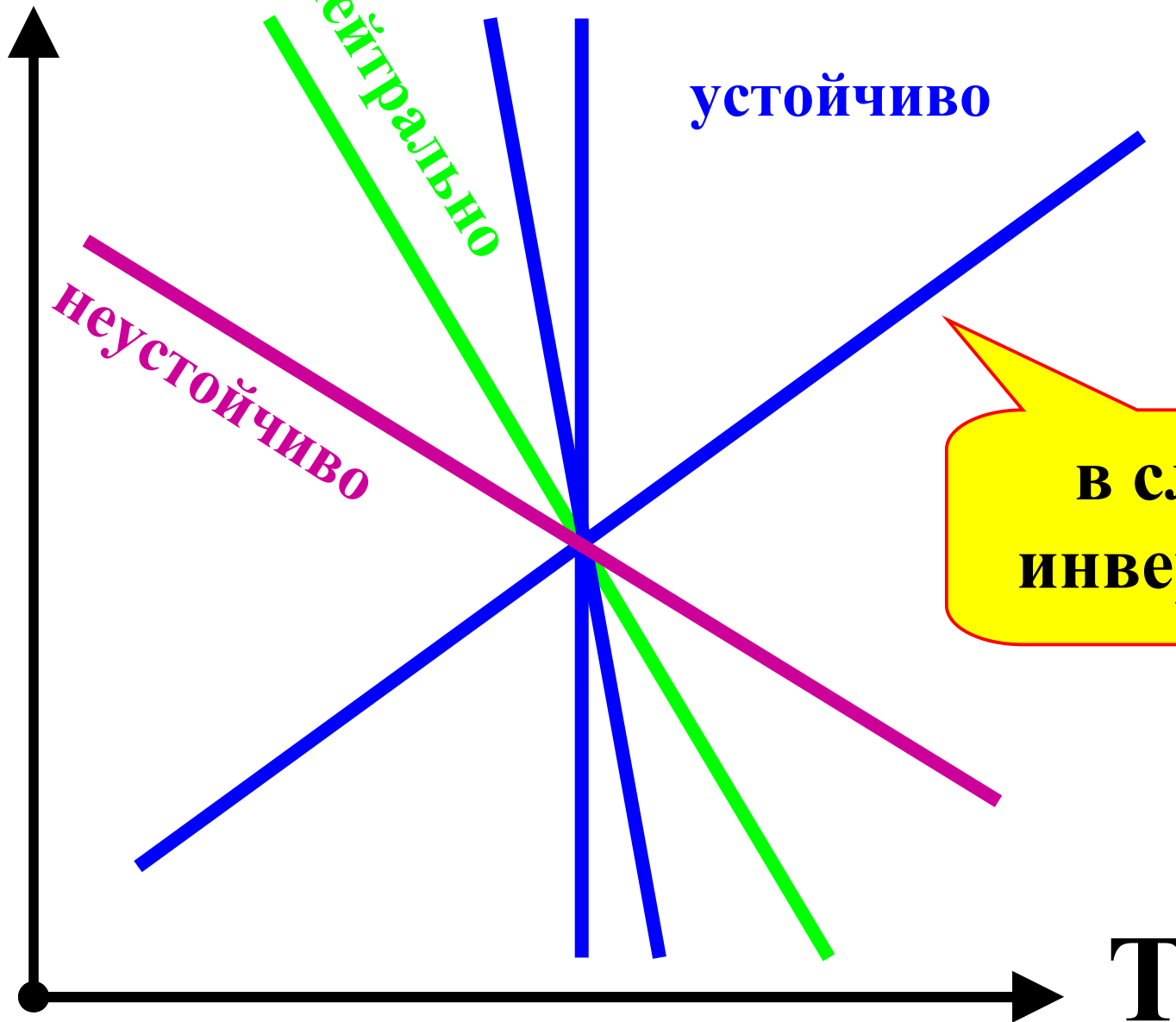
$$\frac{L}{c_p} \frac{dq}{dT} > 0 \quad \Rightarrow \quad \left| \frac{dT}{dz} \right| < \frac{g}{c_p}$$







**Z**



**устойчиво**

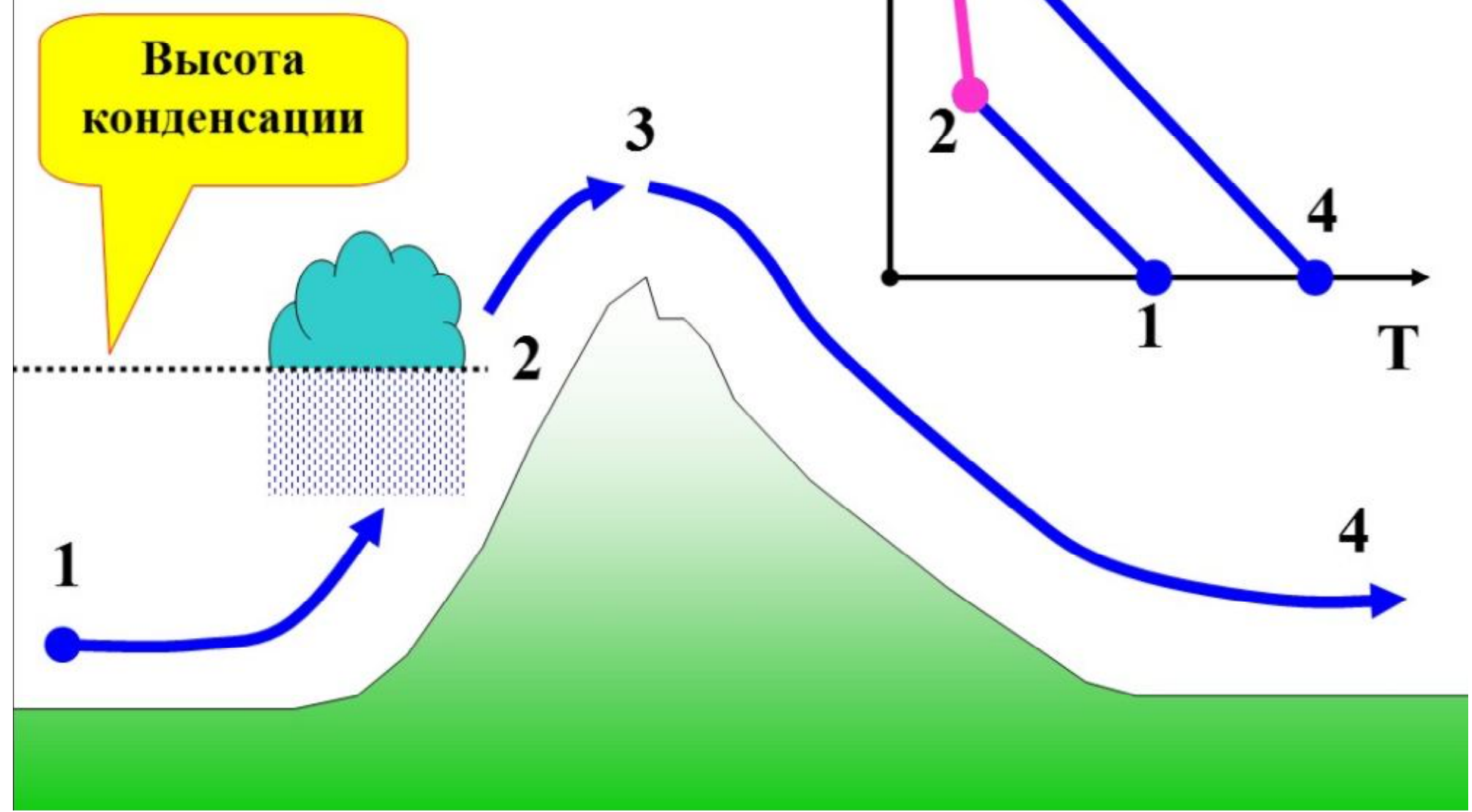
**нейтрально**

**неустойчиво**

**в слое  
инверсии**

**T**

# Ветер фён



# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №9

---

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

# Оптические явления в атмосфере и океане



# Оптические явления в атмосфере вызываются

## преломлением (рефракцией)

- миражи, фата-моргана
- мерцания
- смещение положения небесных тел
- искажение формы небесных тел

## поглощением и рассеянием

- зеленый луч
- голубой цвет неба
- явления сумерек

## ядрами конденсации

- радуга, белая радуга
- гало
- ложные солнца и ложные луны
- световые столбы

# Оптические явления в **океане** вызываются

преломлением  
(рефракцией)

поглощением и  
рассеянием

ядрами  
конденсации

- ❑ цвет океанов, морей  
и вод суши

**Явления,  
вызываемые  
преломлением в  
воздухе**



$$c_0 \neq f(\lambda)$$

скорость света в  
вакууме

$$c = c_0 / n = f(\lambda)$$

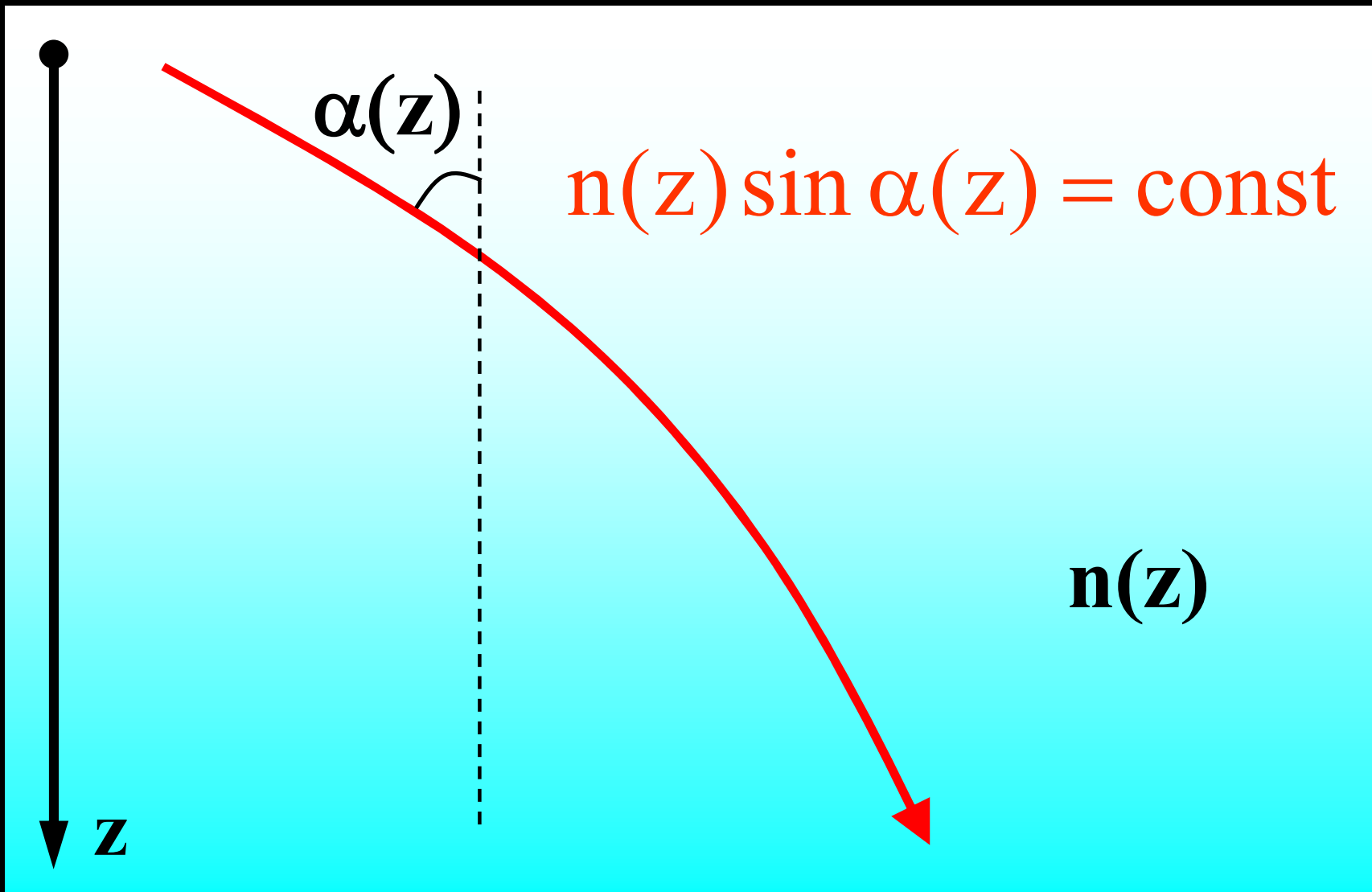
скорость  
света в среде

## Показатель преломления

**Воздух**      **1.00029**

**Вода**        **1.33**

# Рефракция



## Изменение показателя преломления воздуха с высотой

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{1}{\rho} = r$$

Удельная  
рефракция

Формула  
Лоренц-  
Лорентца

$$n = 1 + \Delta n, \quad \Delta n \ll 1$$

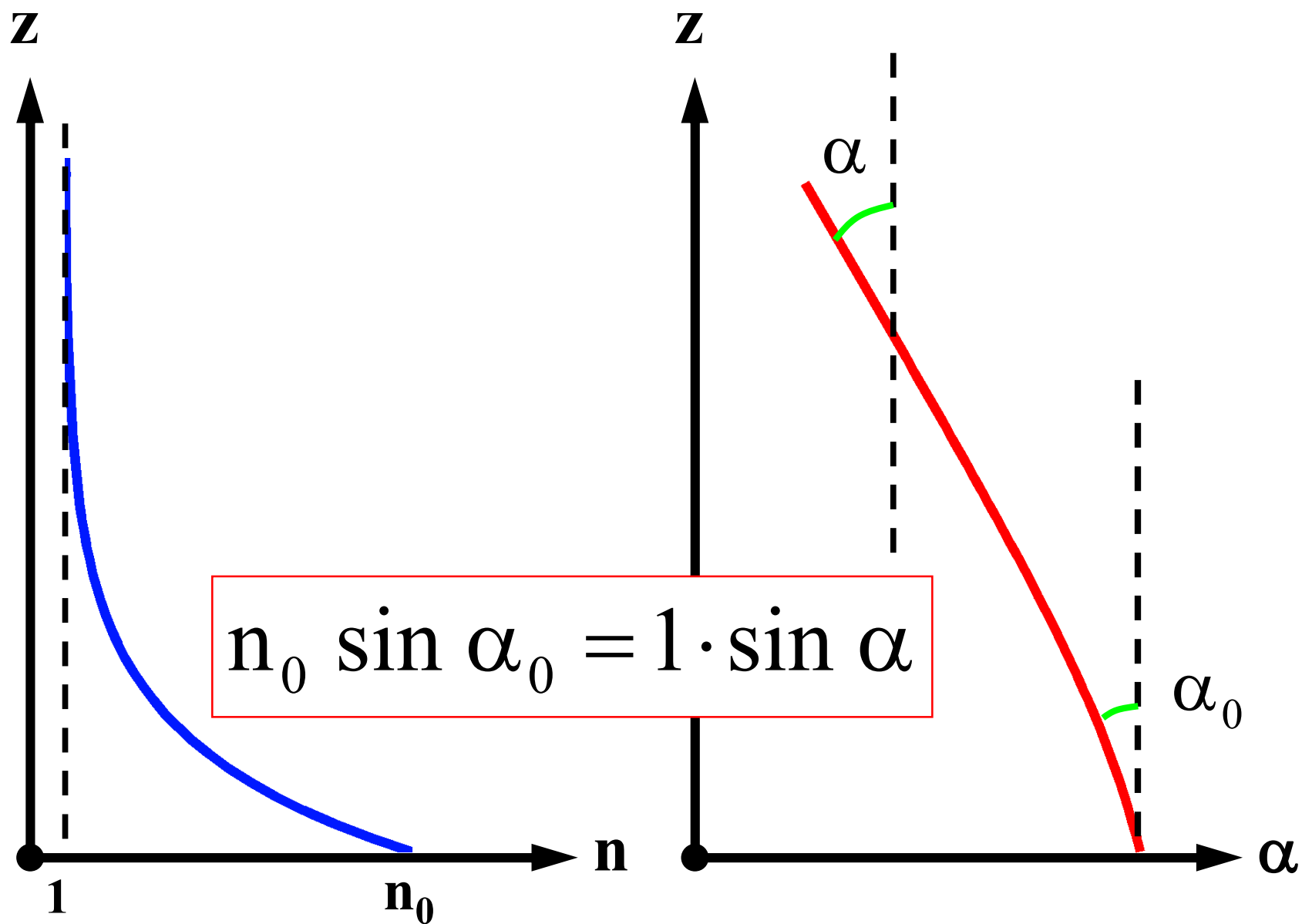
$$\frac{\Delta n}{\rho} = \text{const}$$

$$\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H}$$

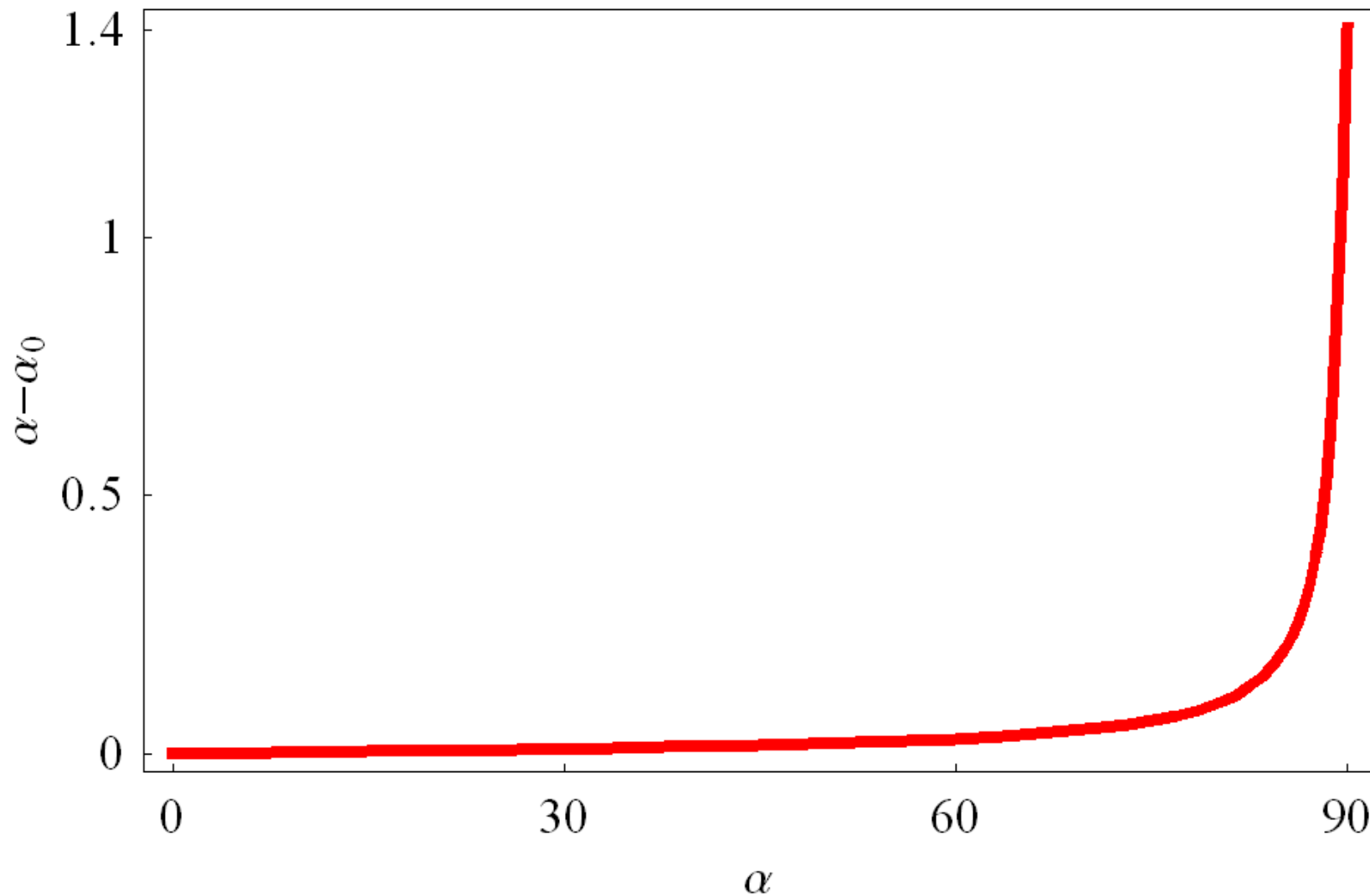
«Барометрическая формула» для  
показателя преломления

$$n(z) = 1 + (n_0 - 1)e^{-z/H}$$

# Рефракция света в атмосфере

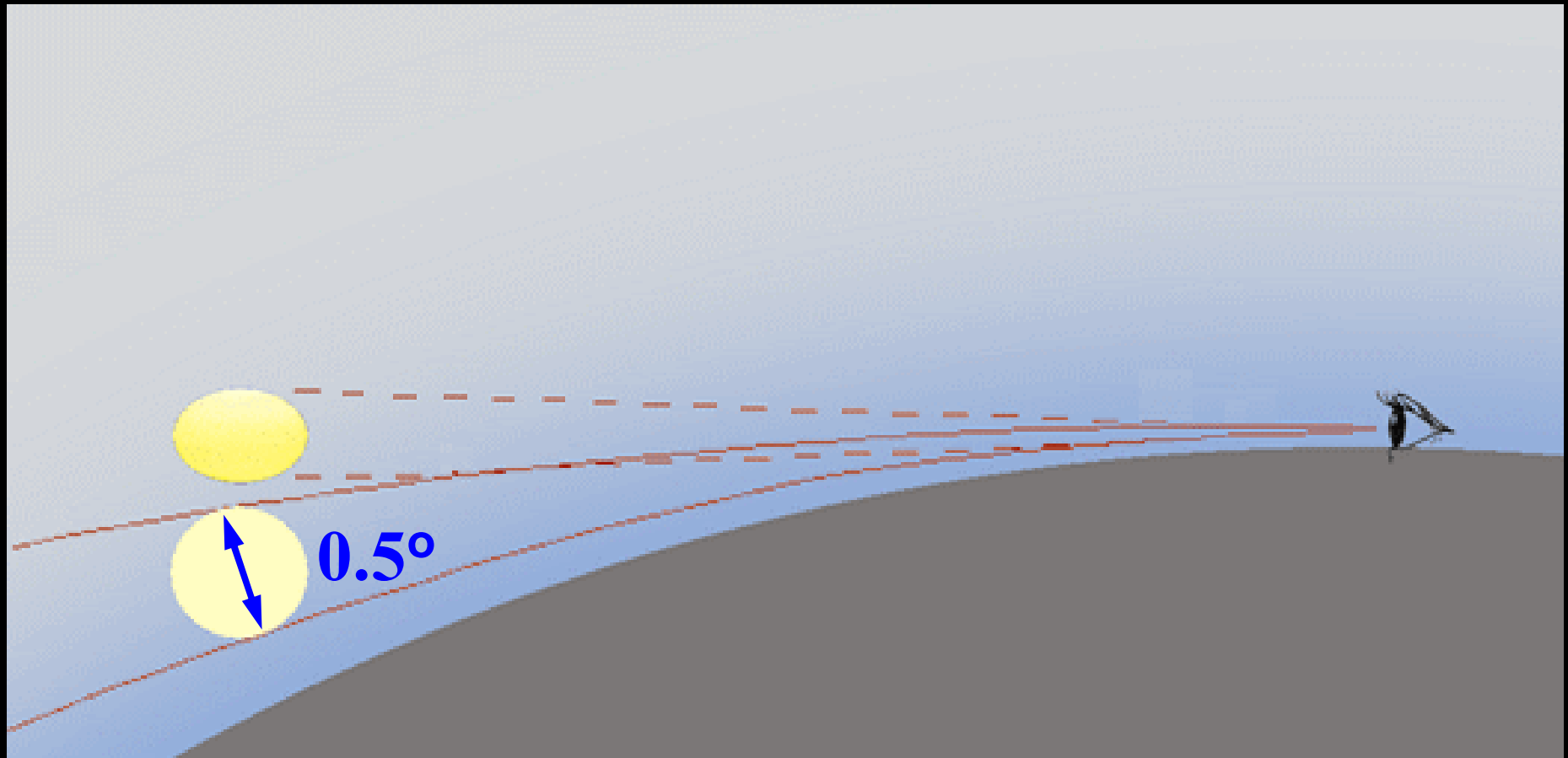


# Отклонение светового луча в атмосфере как функция угла падения

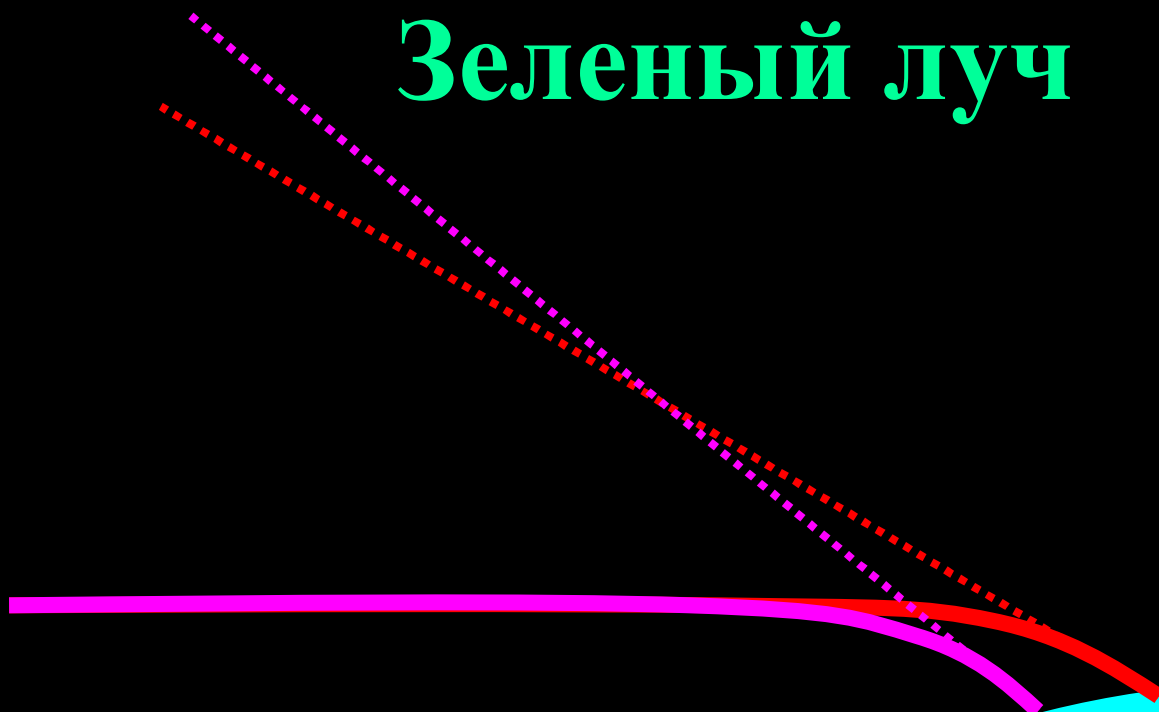
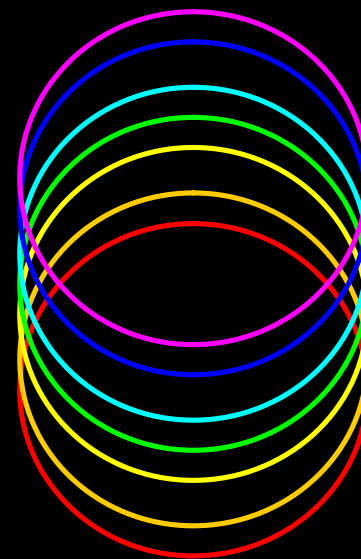


# Искажение формы небесных тел





# Зеленый луч





# Зеленый луч



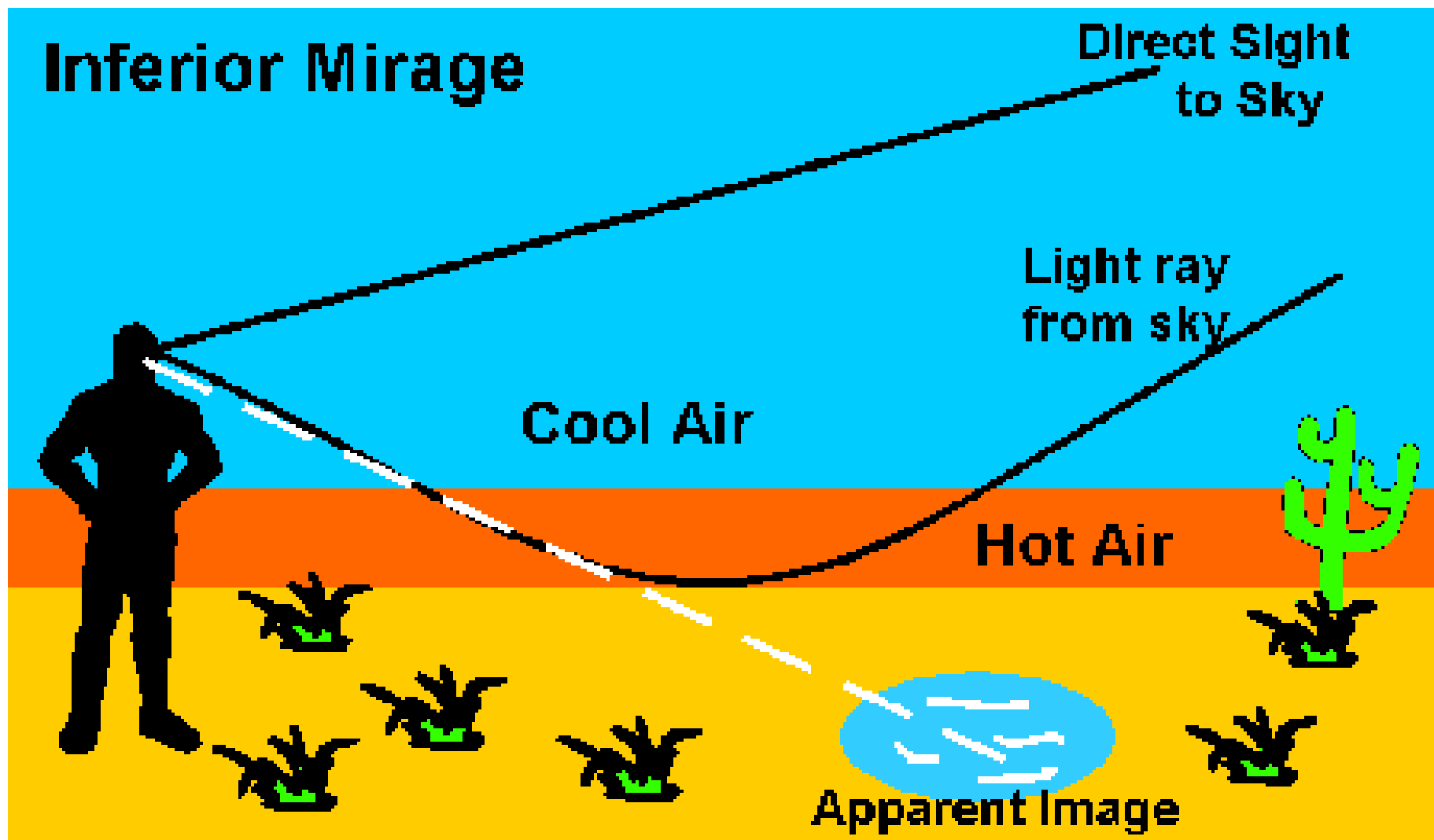
**Миражи** – оптическое явление в атмосфере, состоящее в том, что вместе с отдалённым предметом (или участком неба) видно его мнимое изображение, смещенное относительно предмета

**Причина образования** – ПВО света на границах, разделяющих слои воздуха с различной температурой

\*\*\* в зависимости от расположения по отношению к предмету различают **верхний**, **нижний** и **боковой** миражи

\*\*\* мираж всегда виден в той области, где выше температура воздуха

# Нижний мираж





Явления,  
вызываемые  
поглощением и  
рассеянием

# Закон Бугера (1729 г.)

$$dI = -\sigma I dx$$

показатель  
ослабления

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma \cdot x}$$

В атмосфере и в океане

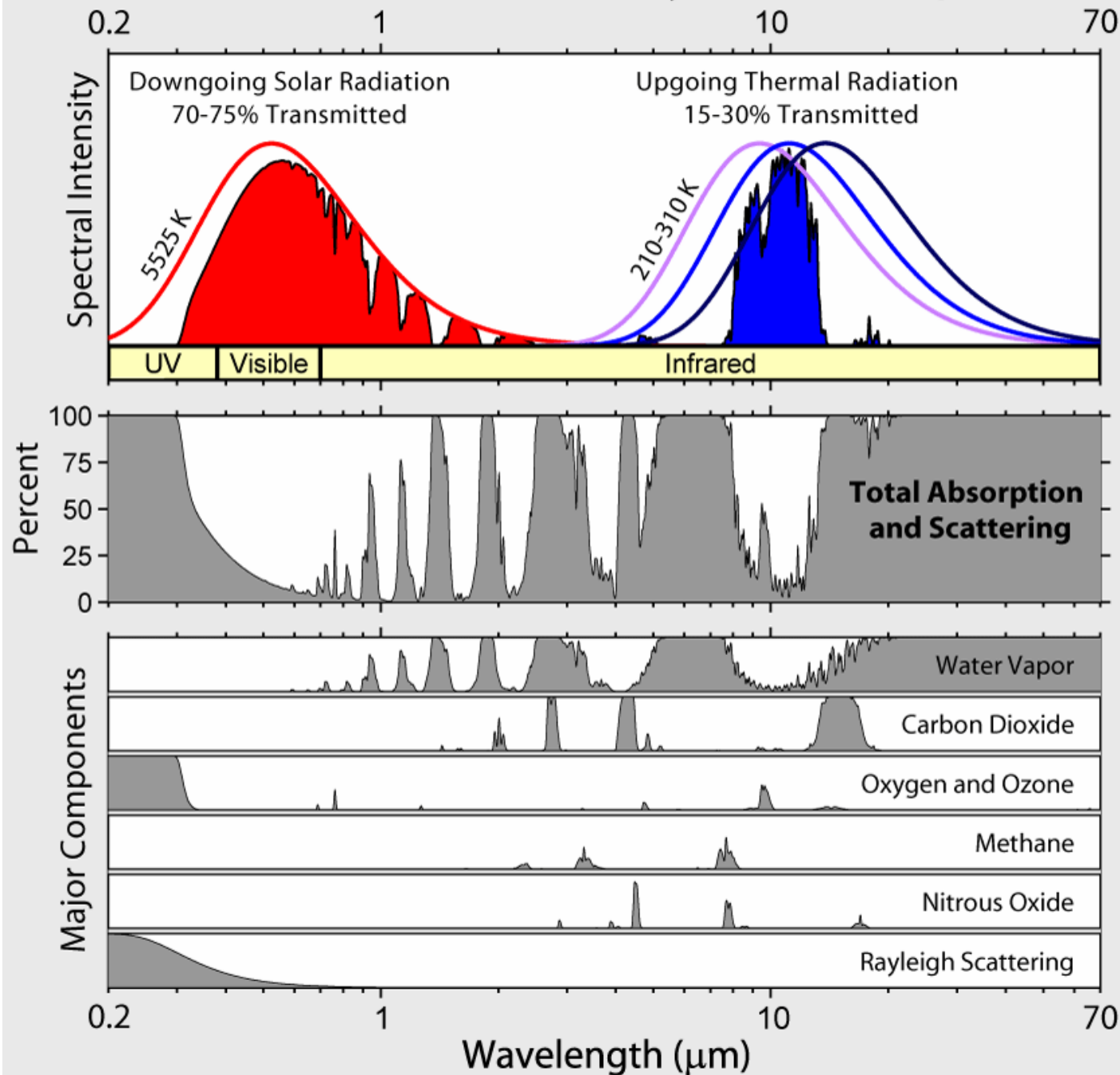
$$\sigma = \sigma(\lambda)$$



**Pierre Bouguer**  
1698-1758

French  
mathematician,  
geophysicist,  
geodesist, and  
astronomer

# Radiation Transmitted by the Atmosphere



Нормированные  
спектры  
излучения  
Солнца и Земли

Спектр  
поглощения  
атмосферы

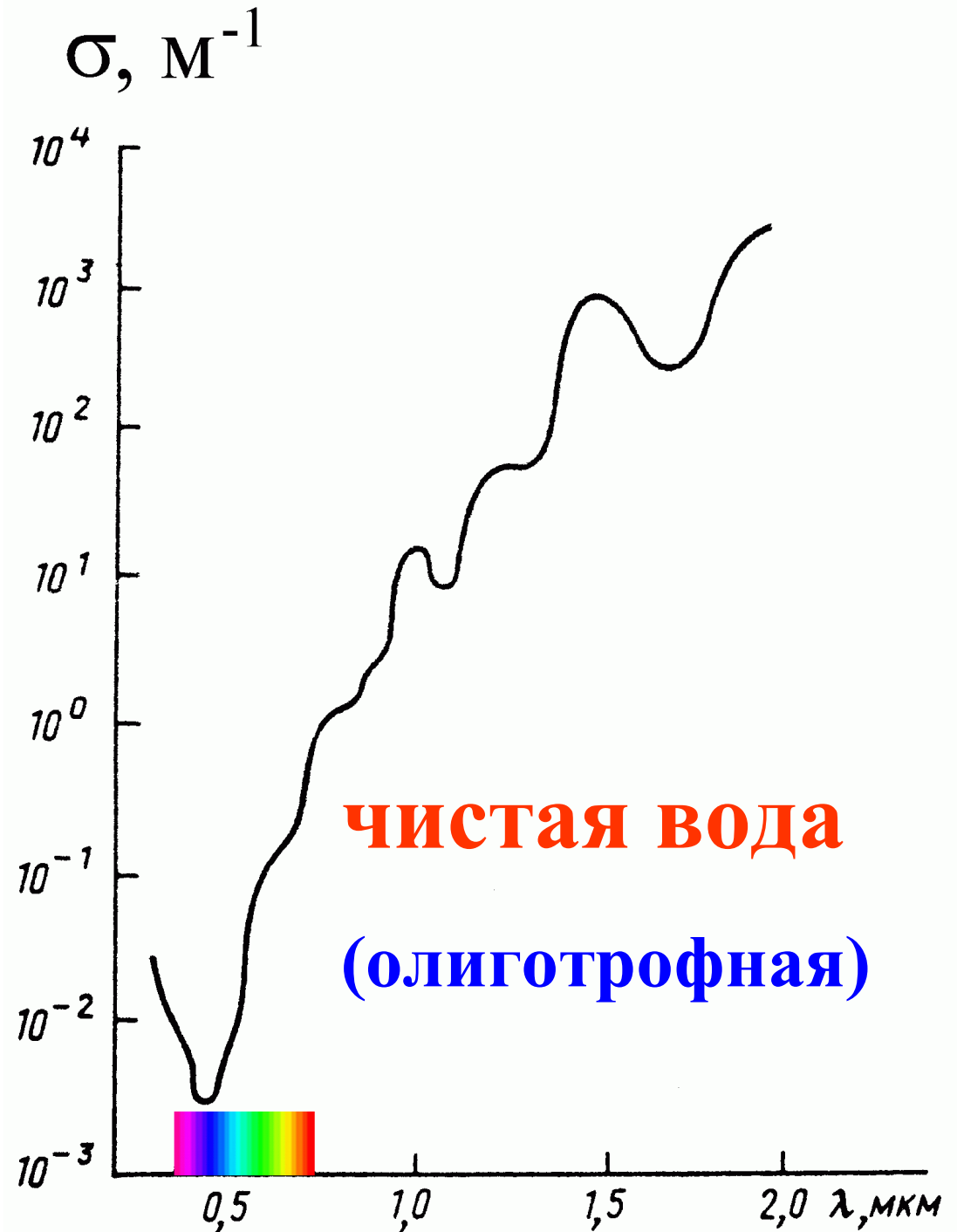
водяной пар  
углекислый газ  
кислород и озон  
метан  
закись азота

Коэффициент  
ослабления для  
морской воды

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma x}$$

$$\sigma = \sigma(\lambda)$$

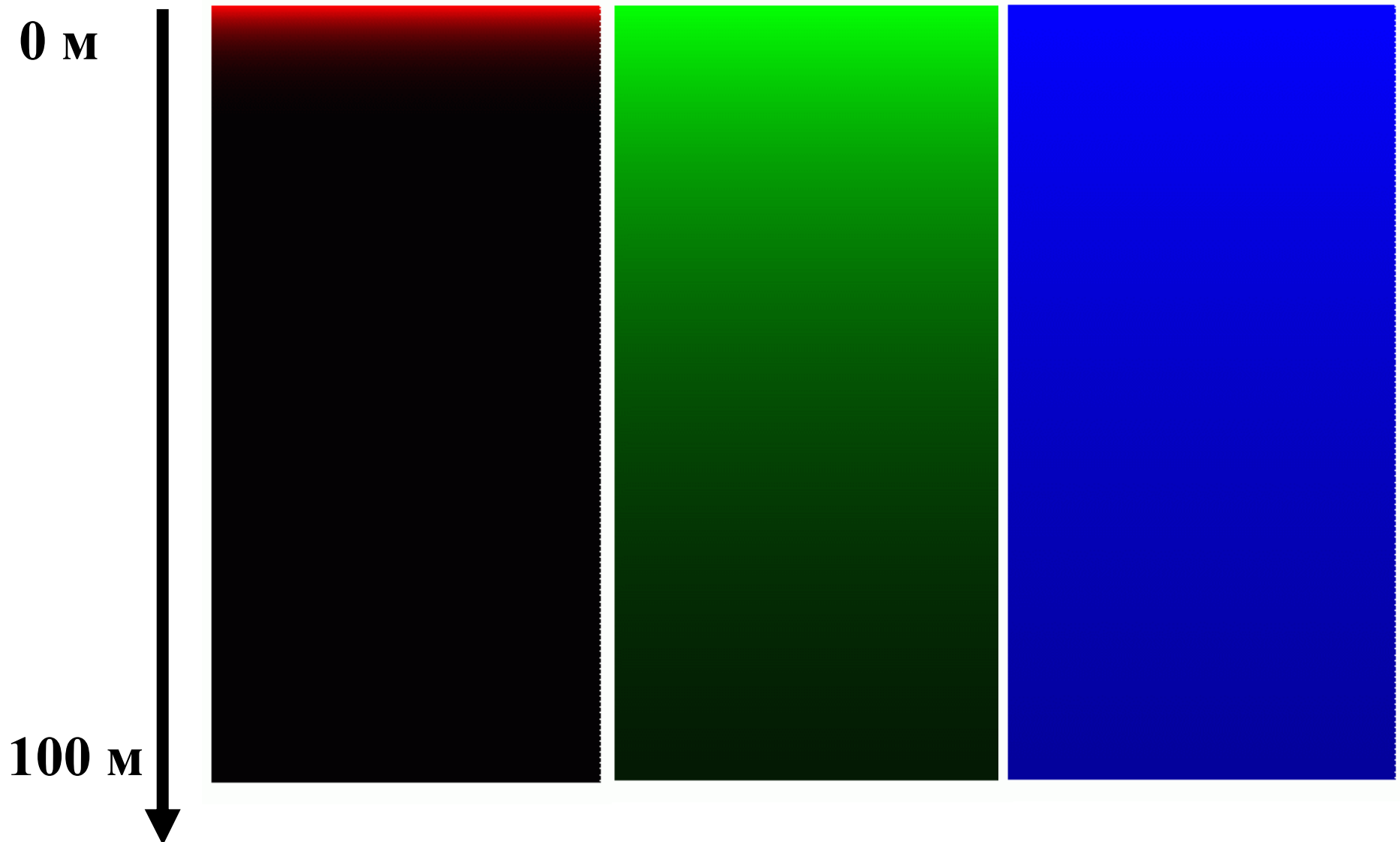
наличие  
желтого вещества  
меняет вид  
зависимости



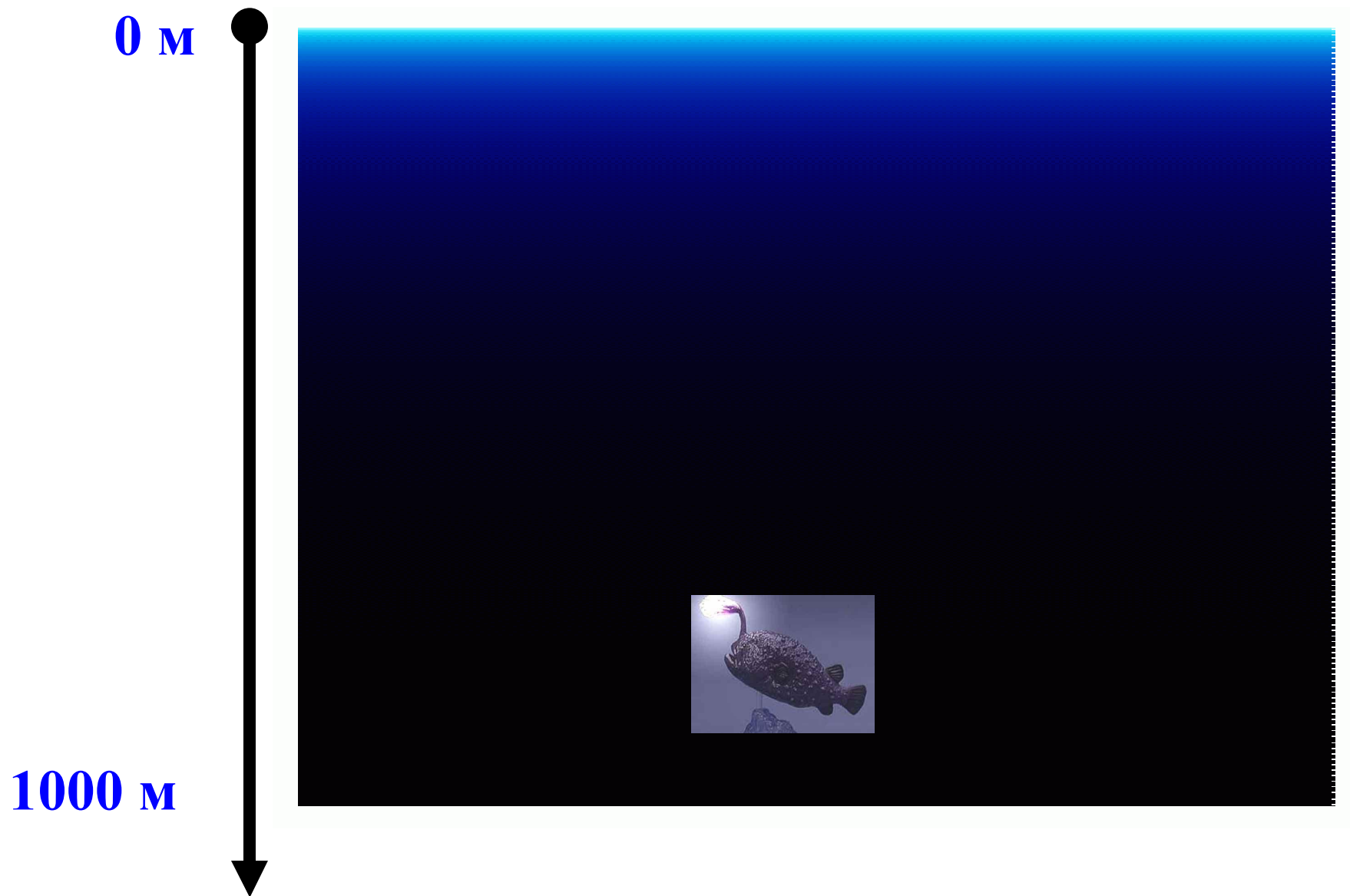


## Ослабление света с глубиной в чистой воде

$$\sigma=0.27 \text{ м}^{-1} \quad \sigma=0.023 \text{ м}^{-1} \quad \sigma=0.005 \text{ м}^{-1}$$



# Ослабление света с глубиной в чистой воде



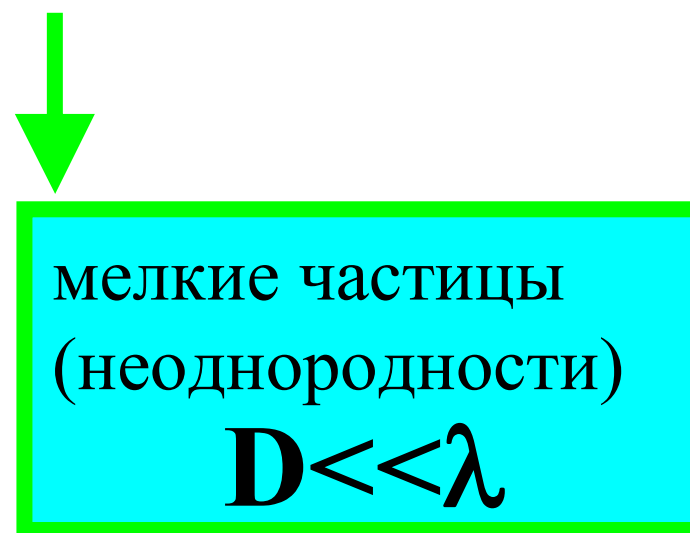
# Ослабление электромагнитного излучения есть следствие факторов:

1. Поглощения (переход энергии в тепло)

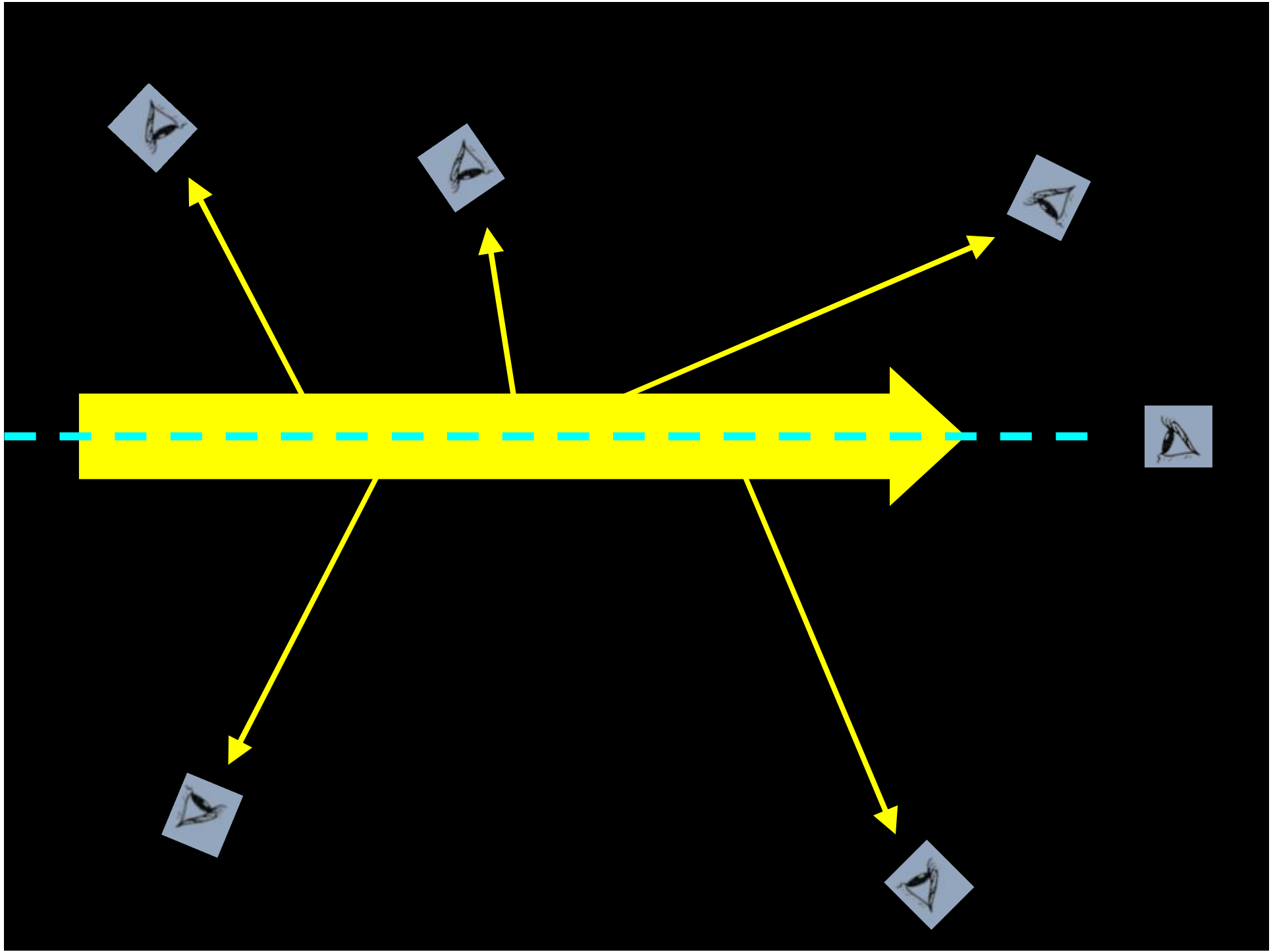
2. Рассеяния («переизлучения»)



рассеяние Ми



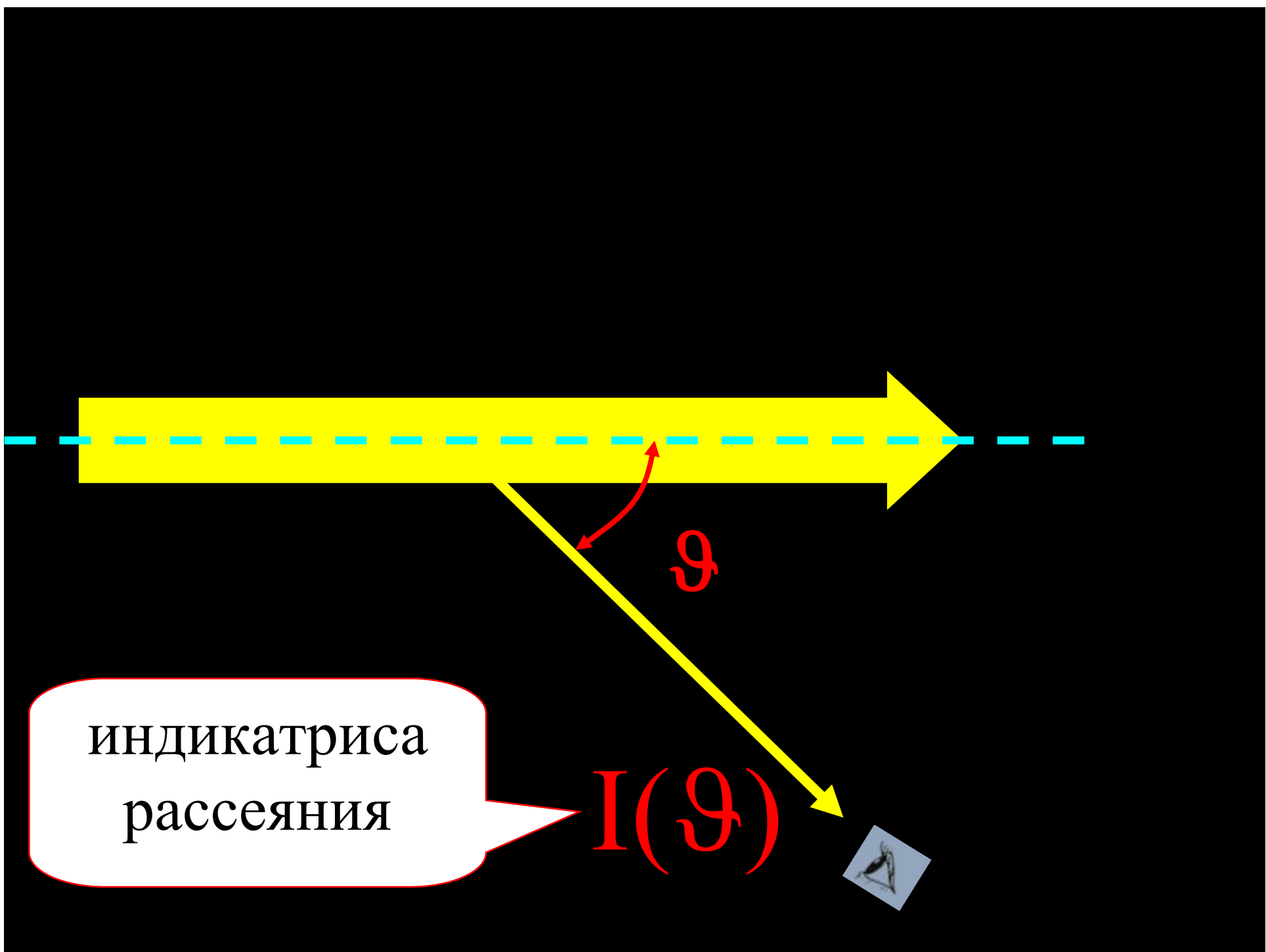
рассеяние Рэля  
или молекулярное

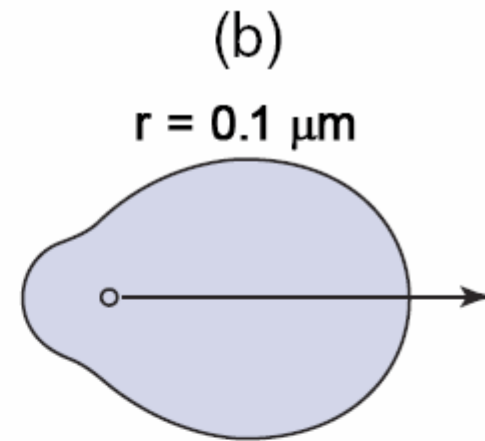
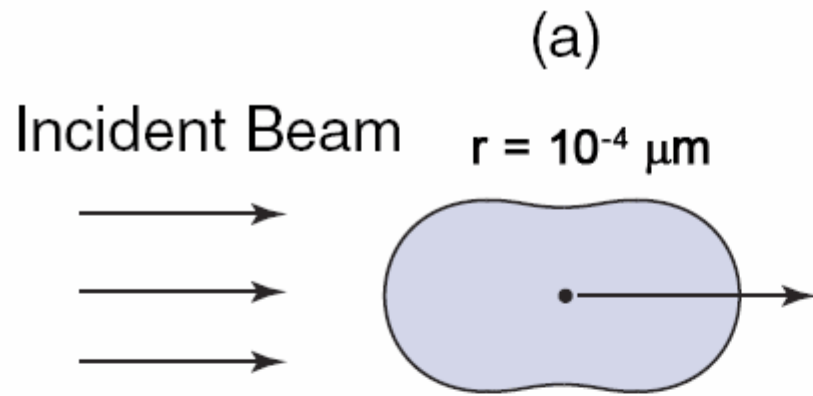


индикатриса  
рассеяния

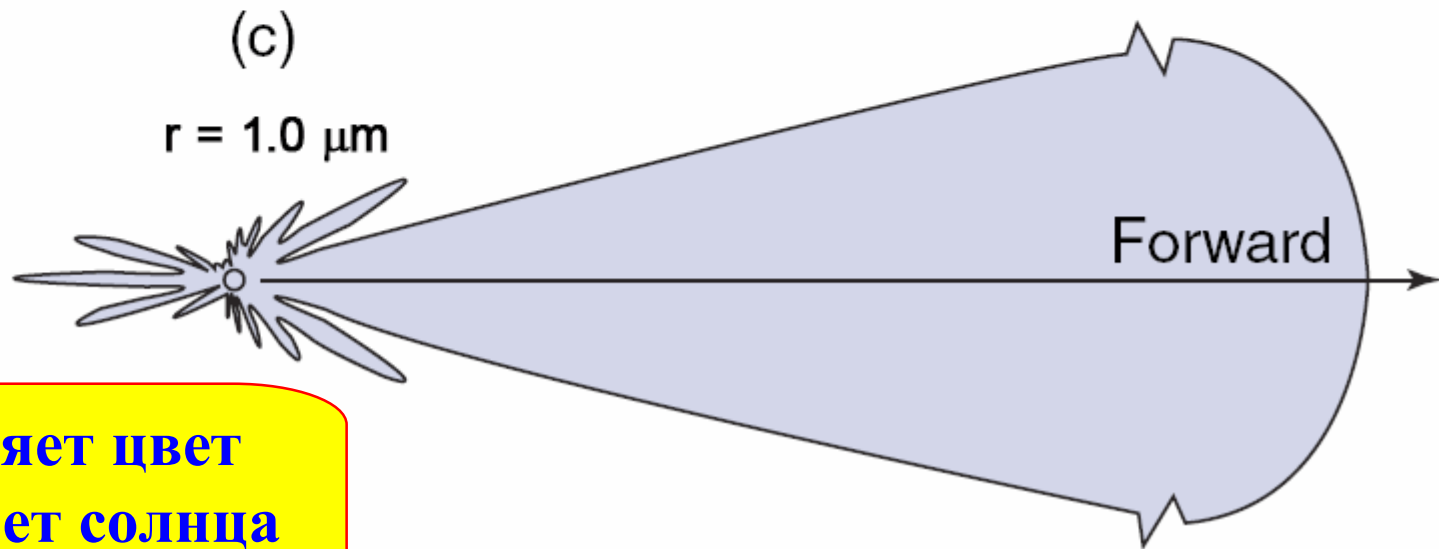
$$I(\vartheta)$$

$\vartheta$



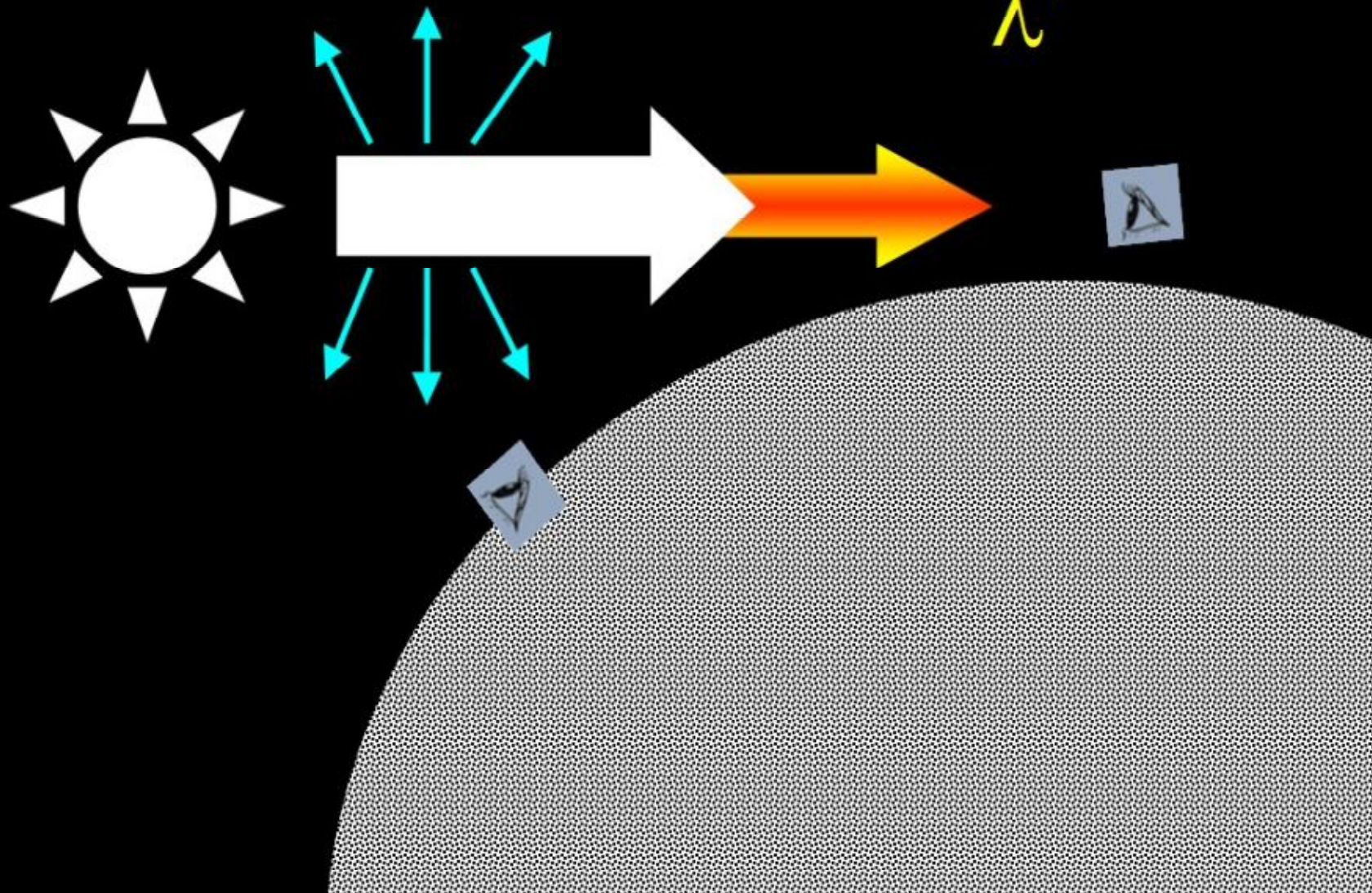


$$I \sim \frac{1}{\lambda^4} [1 + \cos^2 \vartheta]$$



определяет цвет  
неба и цвет солнца  
на закате

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}$$



$$I(x) = I_0 e^{-\sigma \cdot x}$$

$$\sigma = \kappa + \varepsilon$$

показатель  
поглощения

показатель  
рассеяния



## Типичные значения ( $\lambda=0.55$ мкм)

Среда	Показатель поглощения $\kappa, \text{м}^{-1}$	Показатель рассеяния $\varepsilon, \text{м}^{-1}$	Показатель ослабления $\sigma, \text{м}^{-1}$
Океан	<b>0.07</b>	<b>0.16</b>	<b>0.23</b>
Атмосфера	<b>0</b>	<b><math>2 \cdot 10^{-4}</math></b>	<b><math>2 \cdot 10^{-4}</math></b>

### Экстремальные значения показателя ослабления в океане

Саргассово  
море

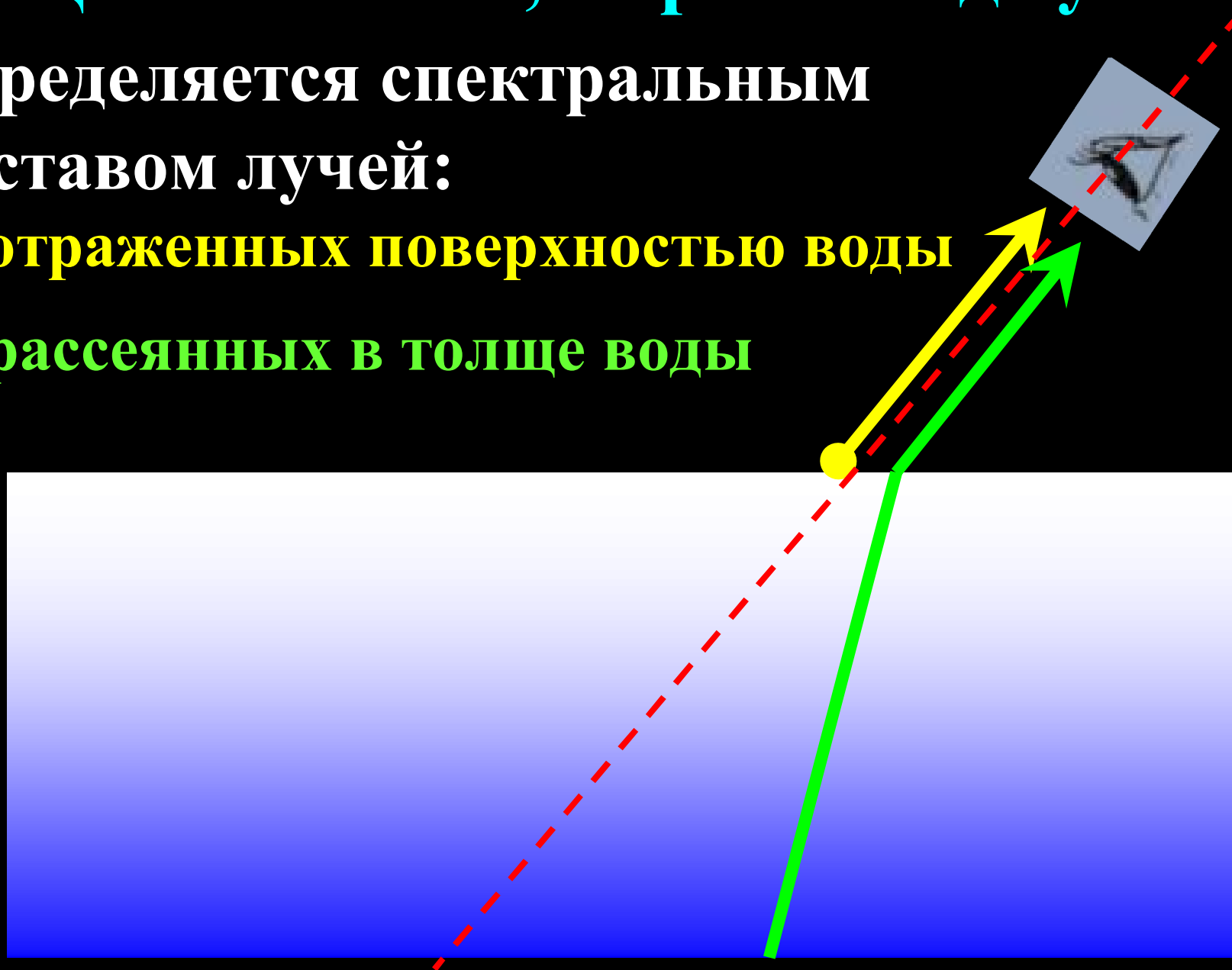
$$0.023 < \sigma < 3.3 \text{ м}^{-1}$$

Перуанский  
шельф

# Цвет океанов, морей и вод суши

определяется спектральным составом лучей:

1. отраженных поверхностью воды
2. рассеянных в толще воды

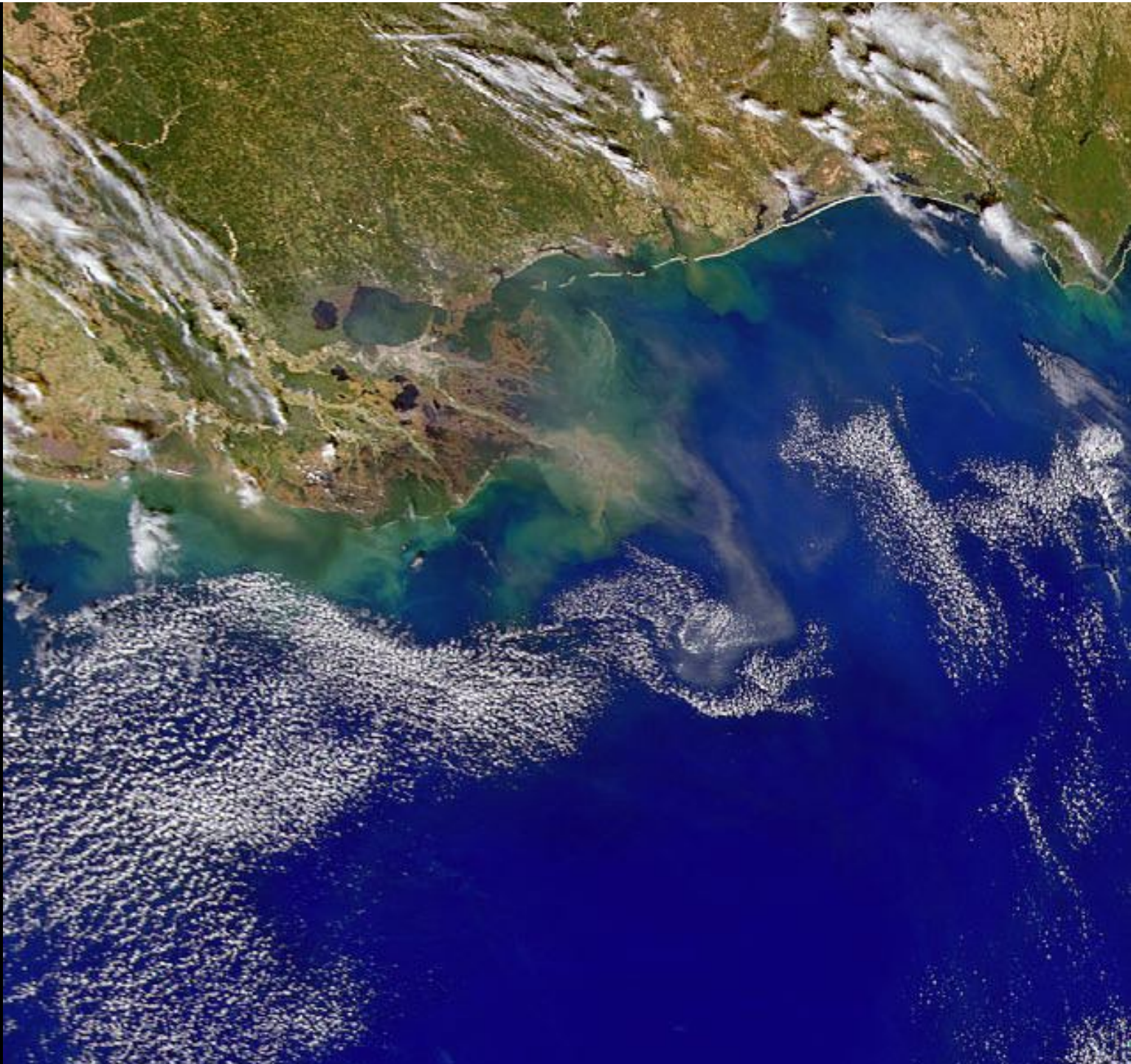


# Коэффициент отражения неполяризованного излучения на границе «воздух-вода» как функция угла падения



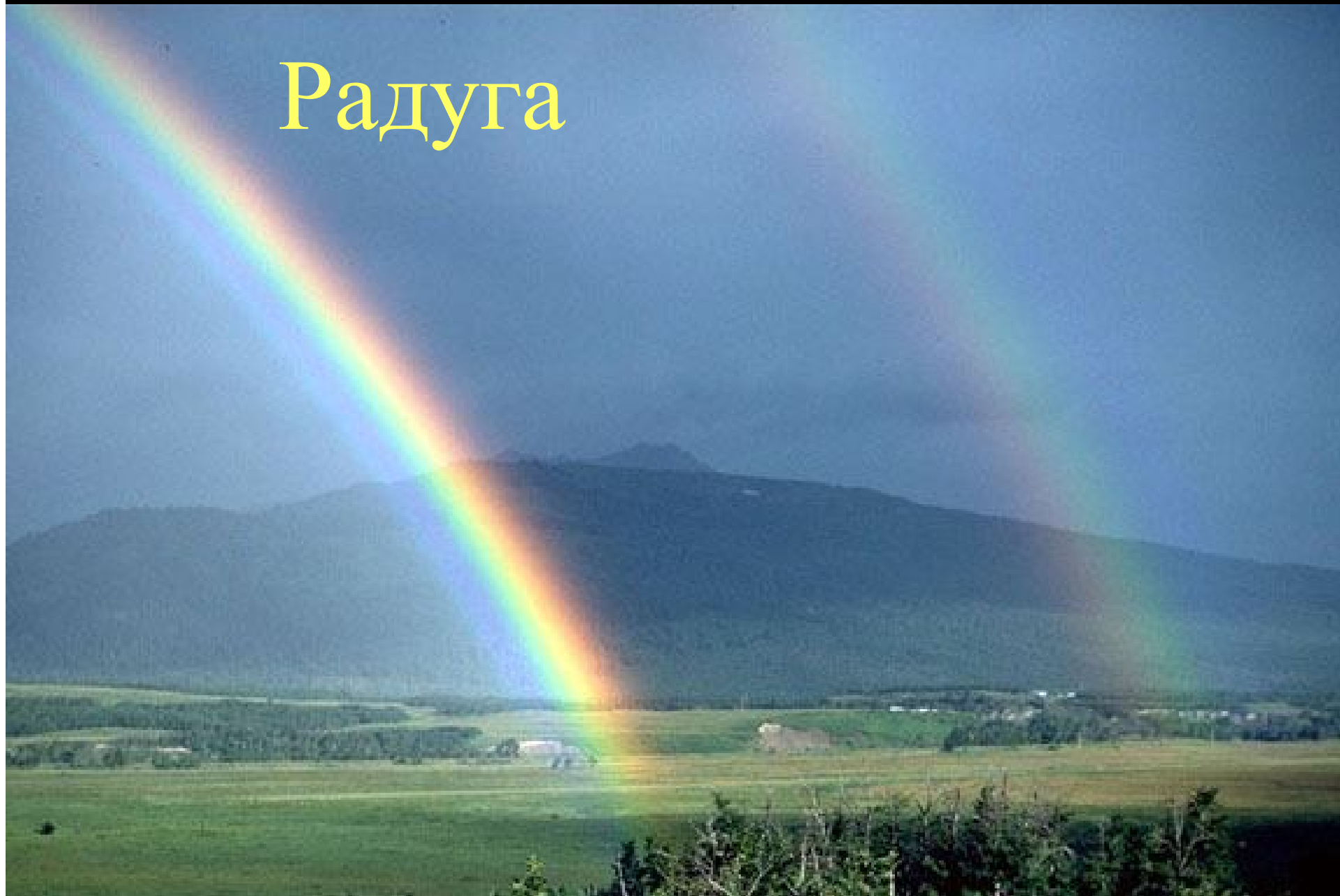




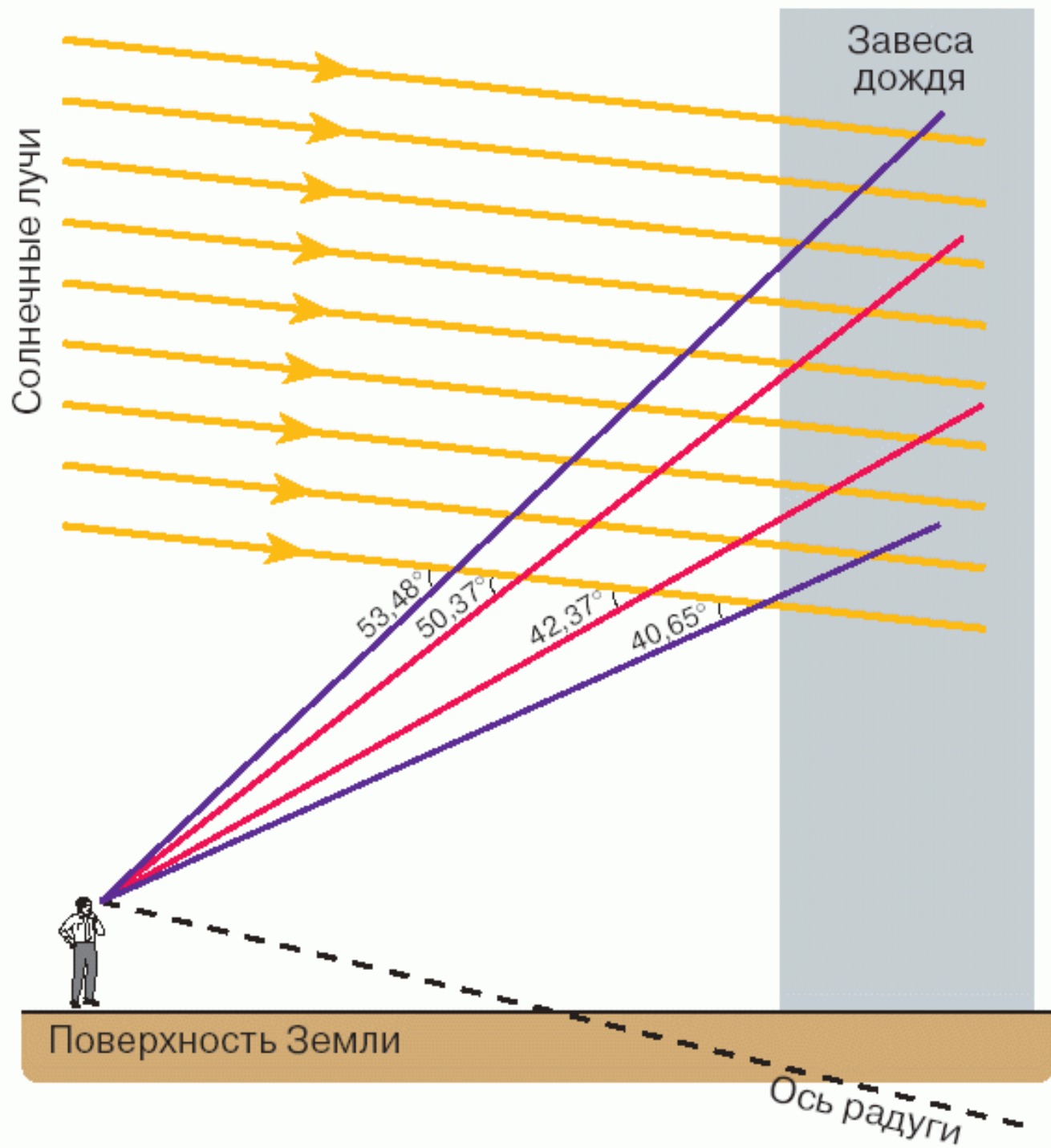


**Оптические  
явления,  
вызываемые  
ядрами  
конденсации**

# Радуга



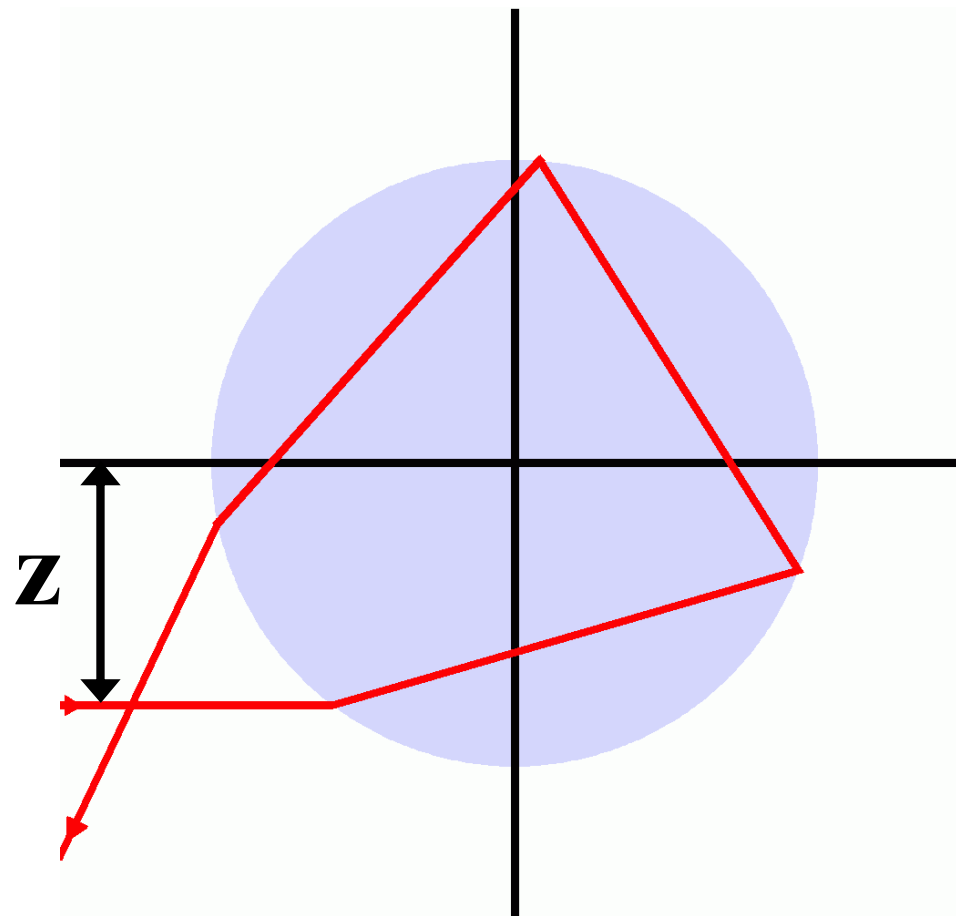
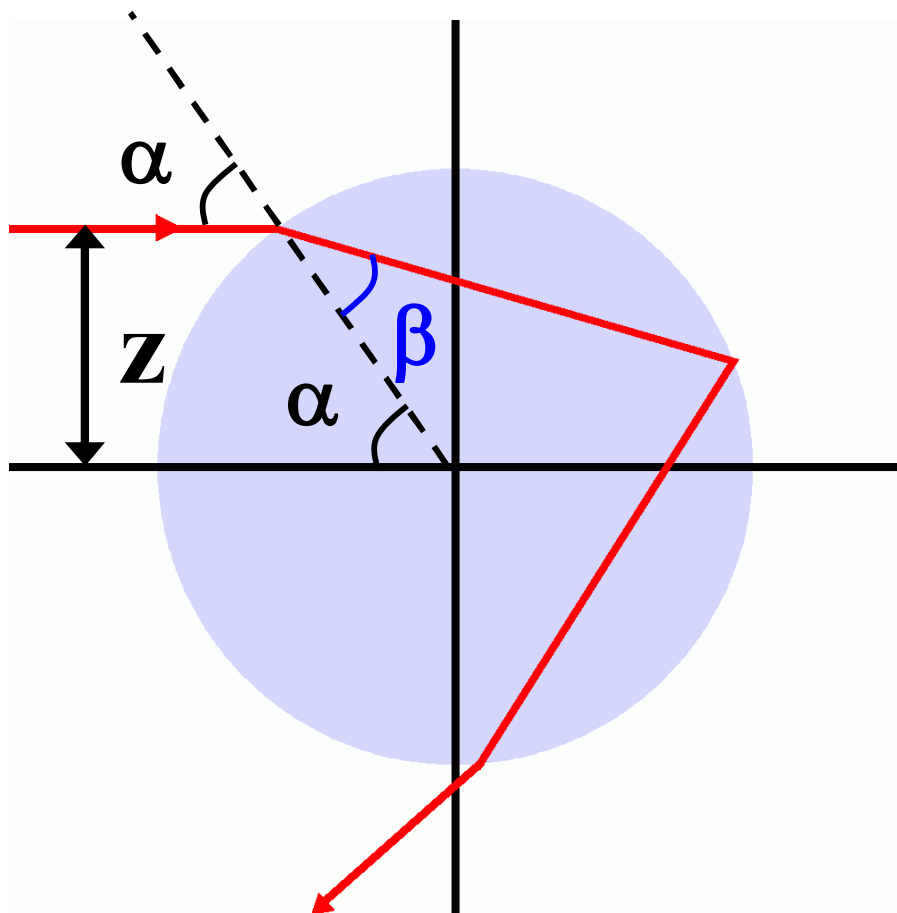




$$R=1$$

$$\sin \alpha = z$$

$$\sin \beta = z/n$$



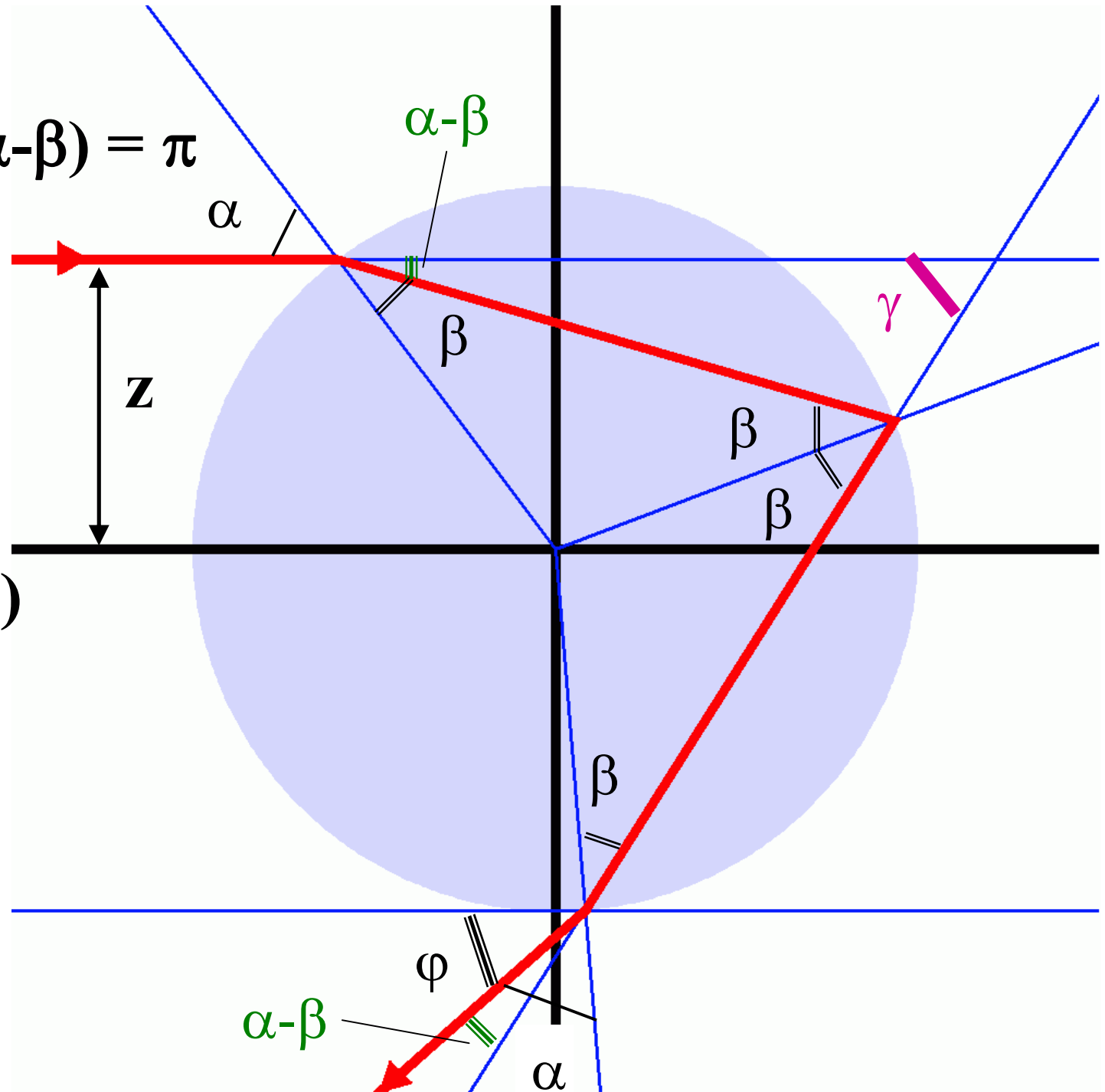
при  $R \gg \lambda$  размер капли роли не играет

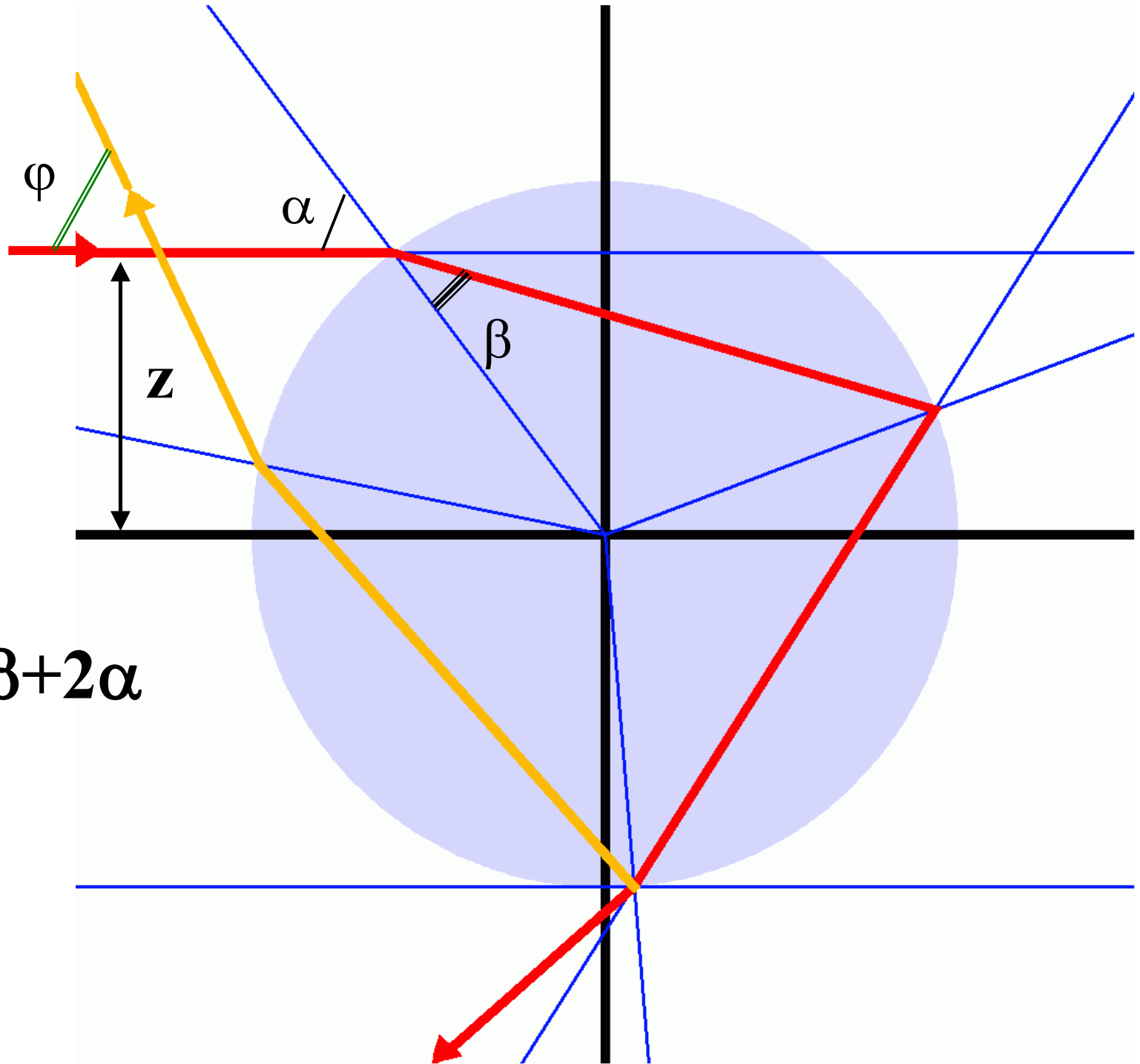
$$\gamma + (\pi - 2\beta) + (\alpha - \beta) = \pi$$

$$\gamma = 3\beta - \alpha$$

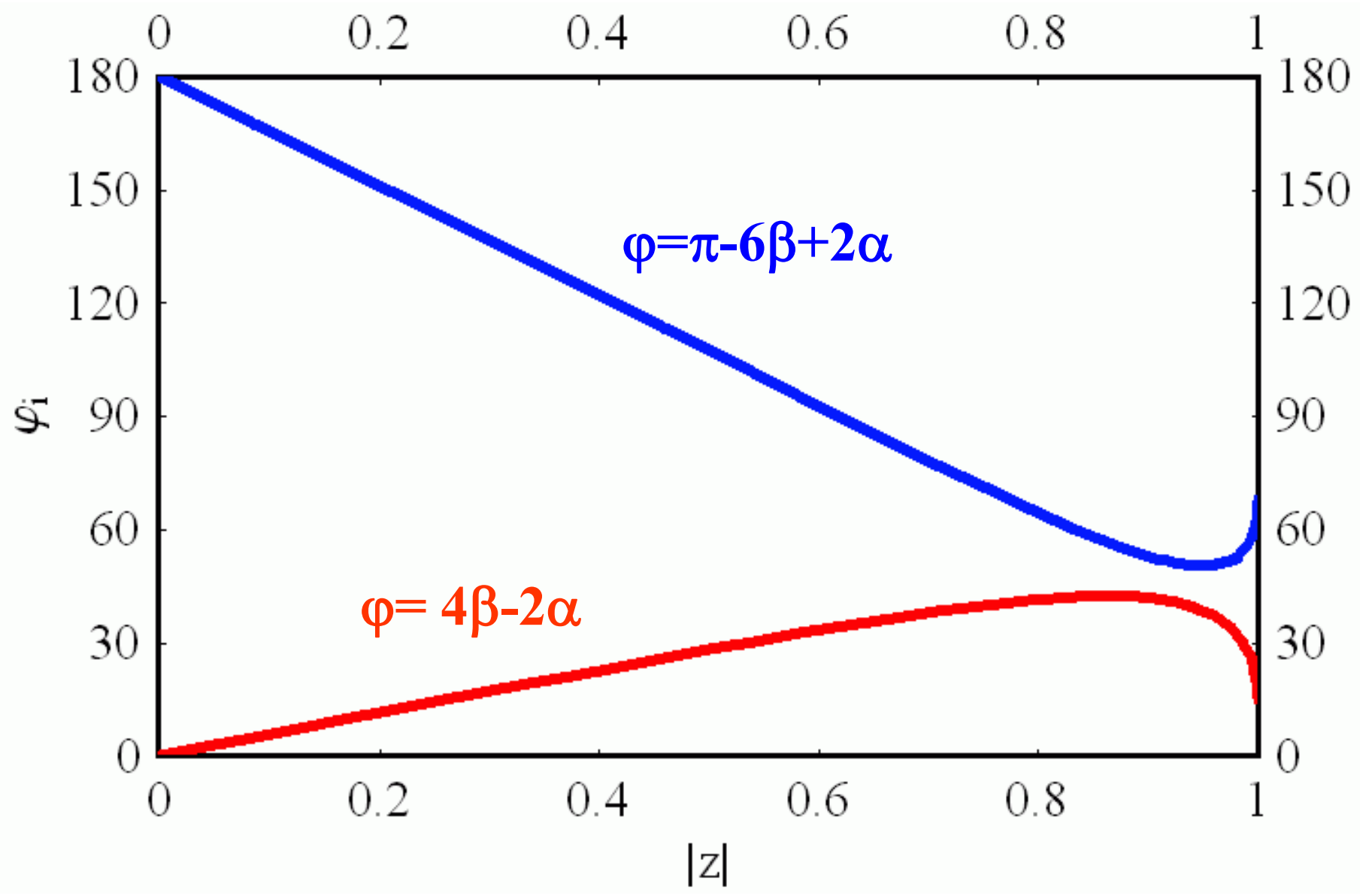
$$\varphi = \gamma - (\alpha - \beta)$$

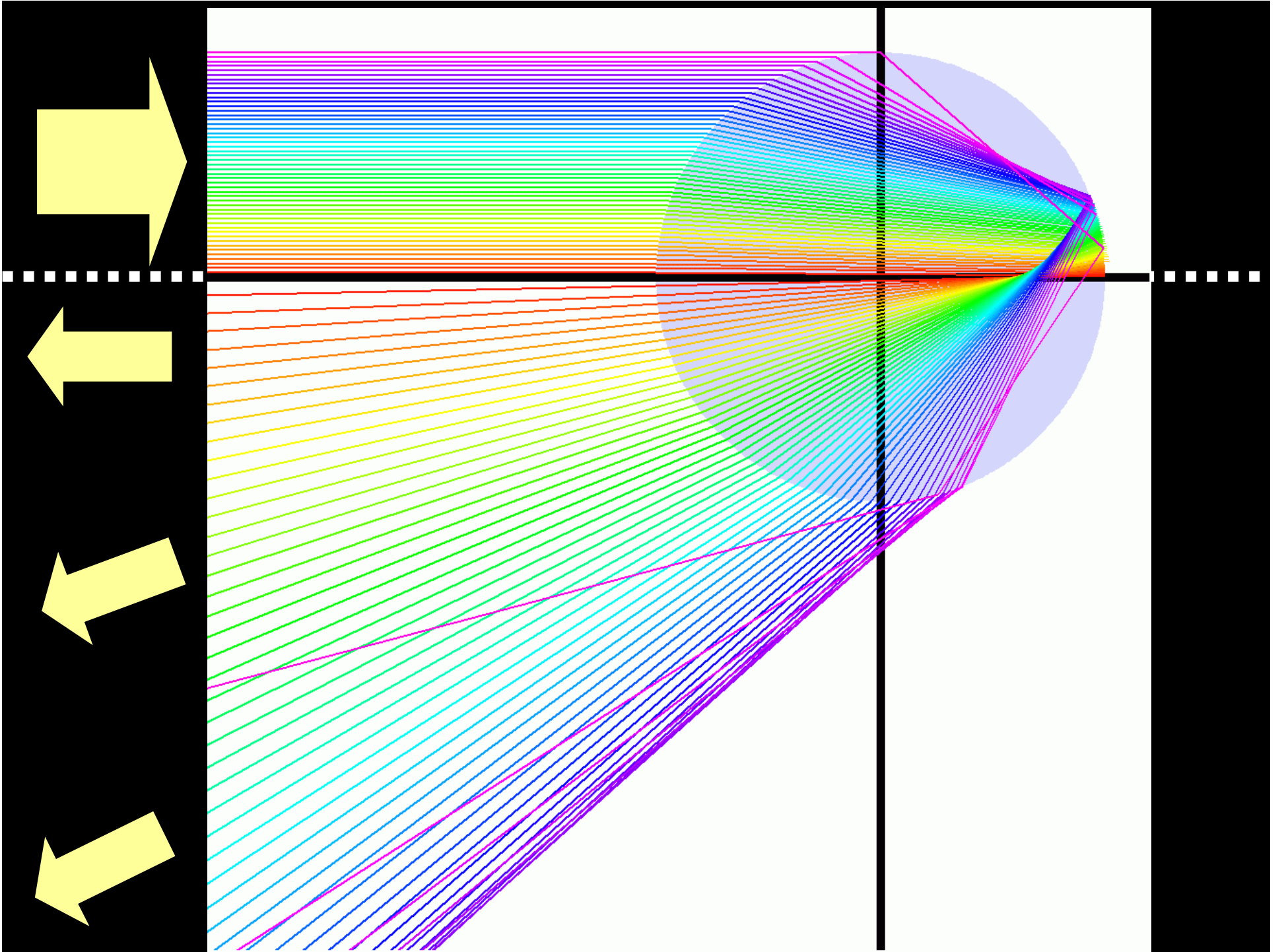
$$\varphi = 4\beta - 2\alpha$$

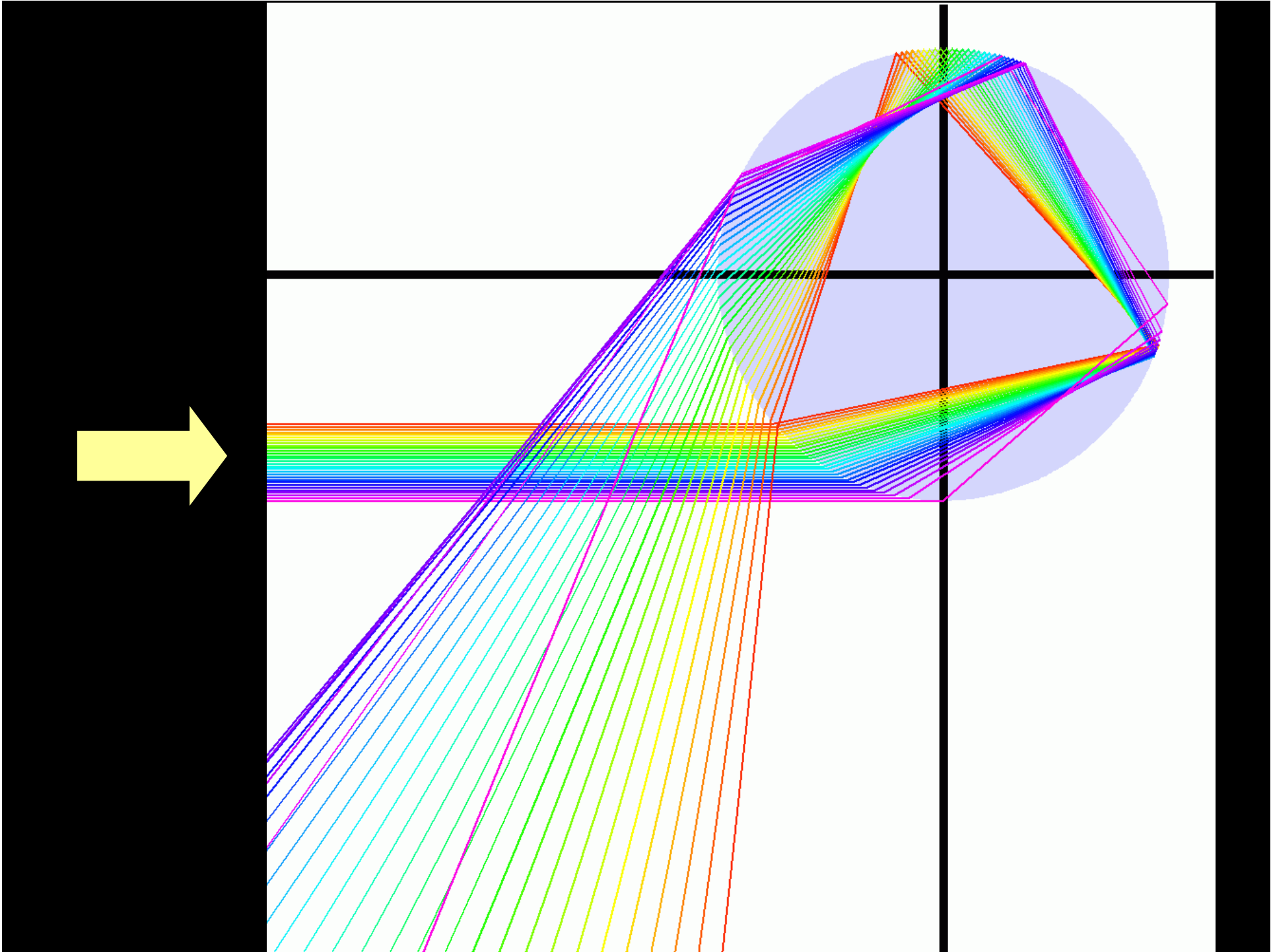


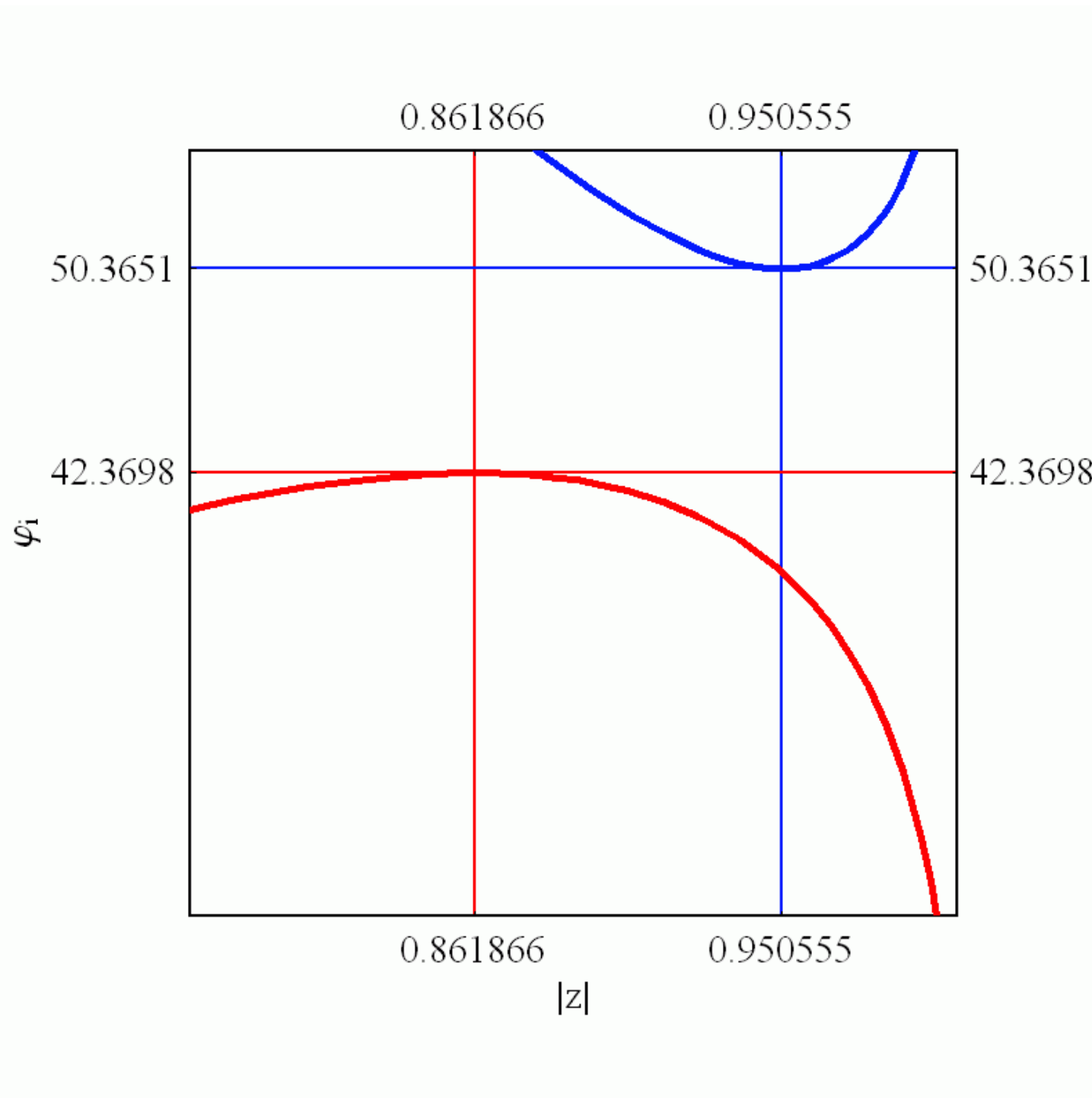


$$\varphi = \pi - 6\beta + 2\alpha$$

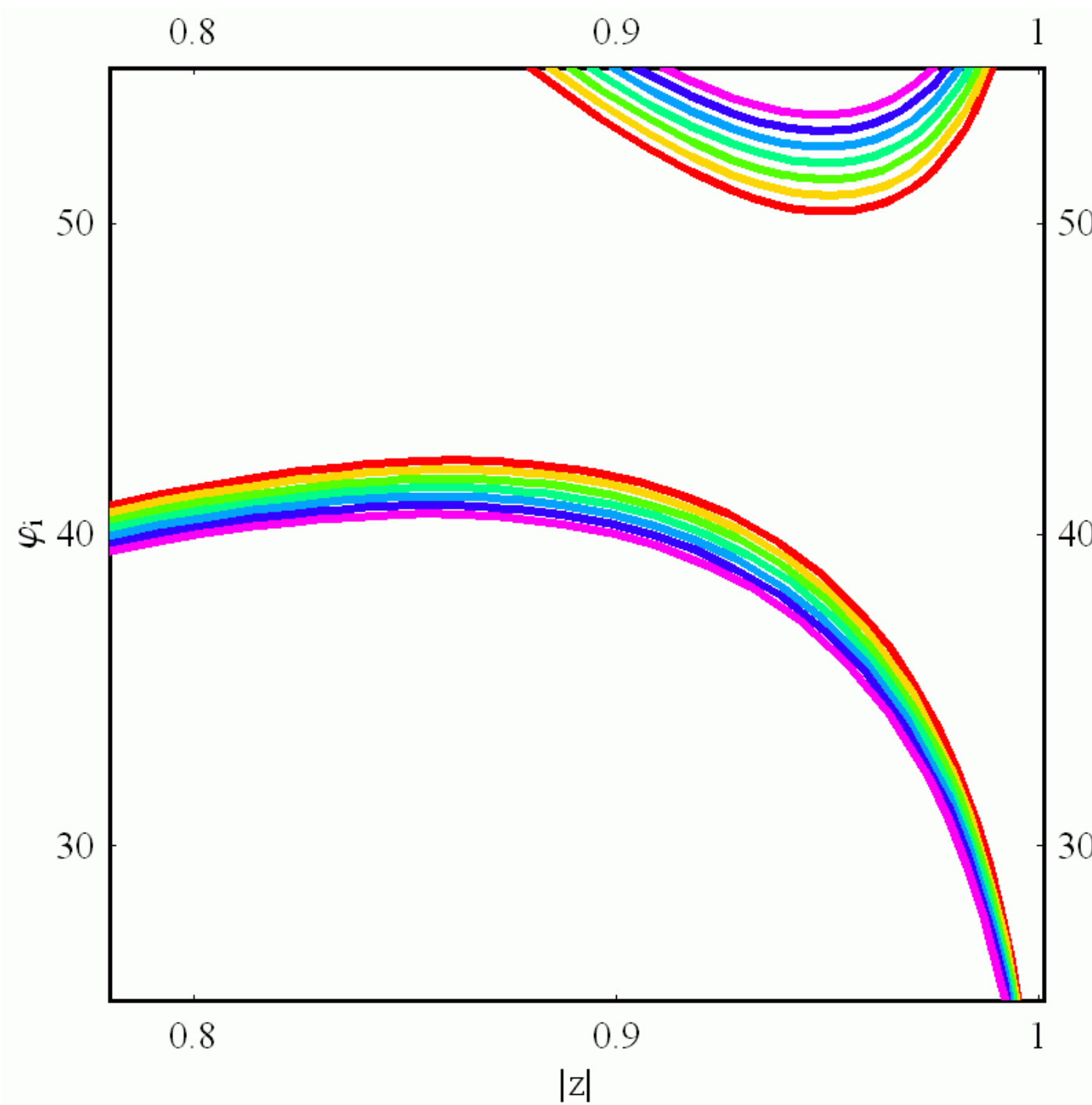


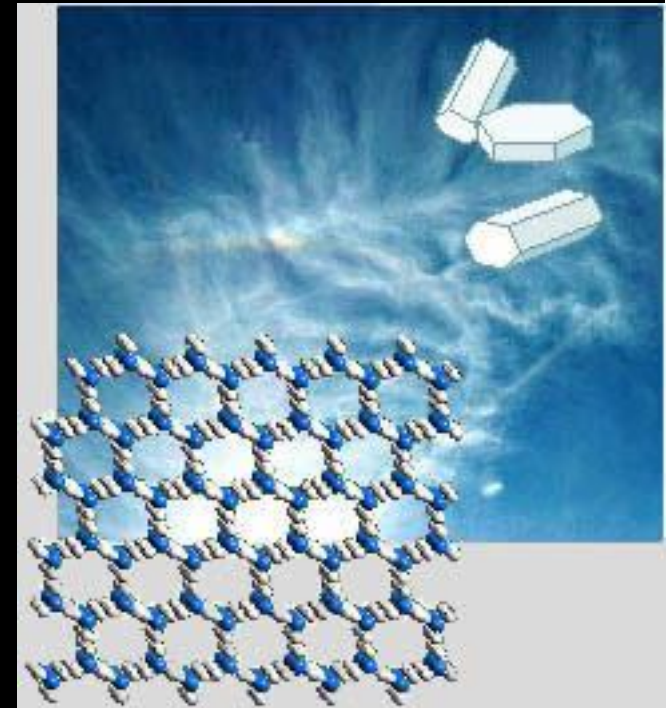
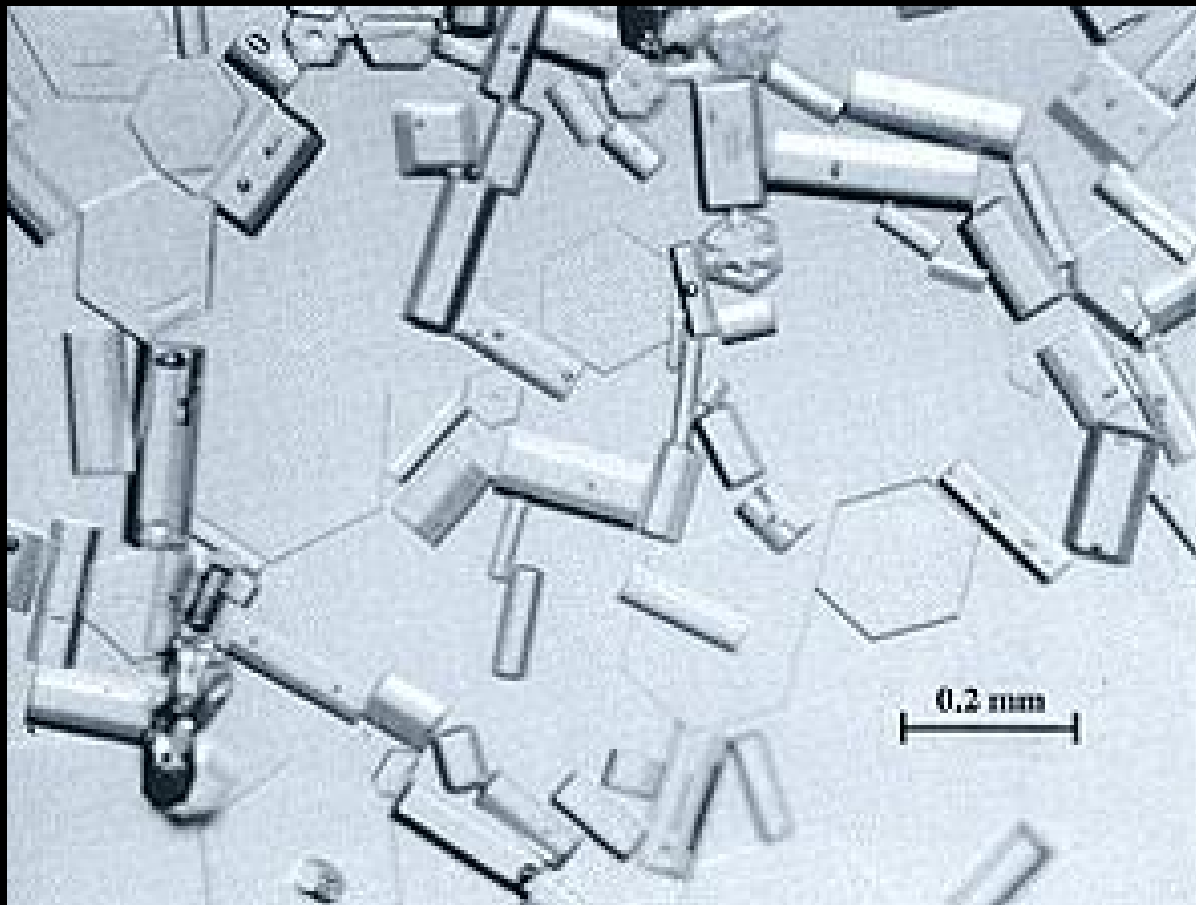
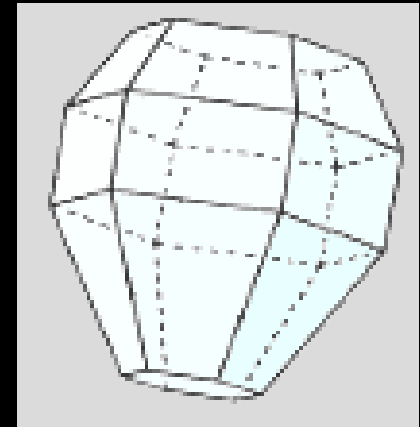
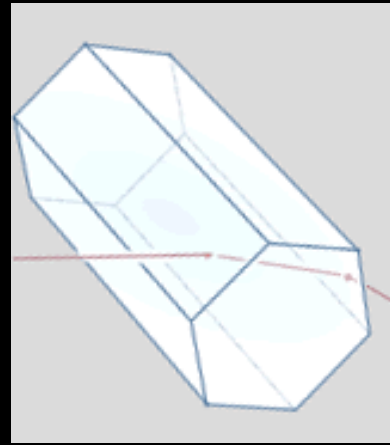
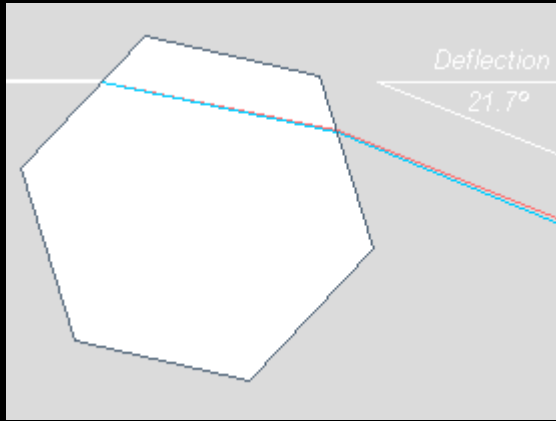








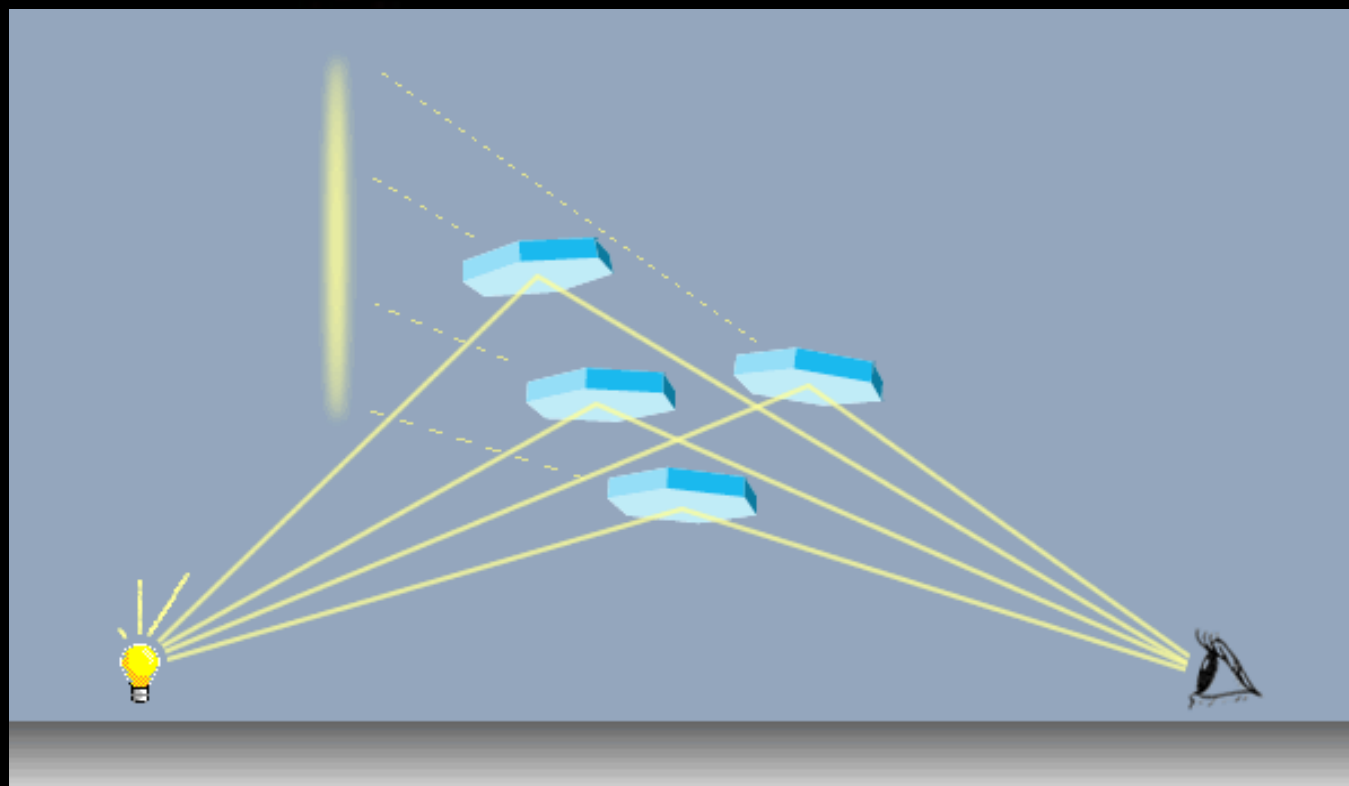




# Оптические эффекты, вызываемые кристаллами льда



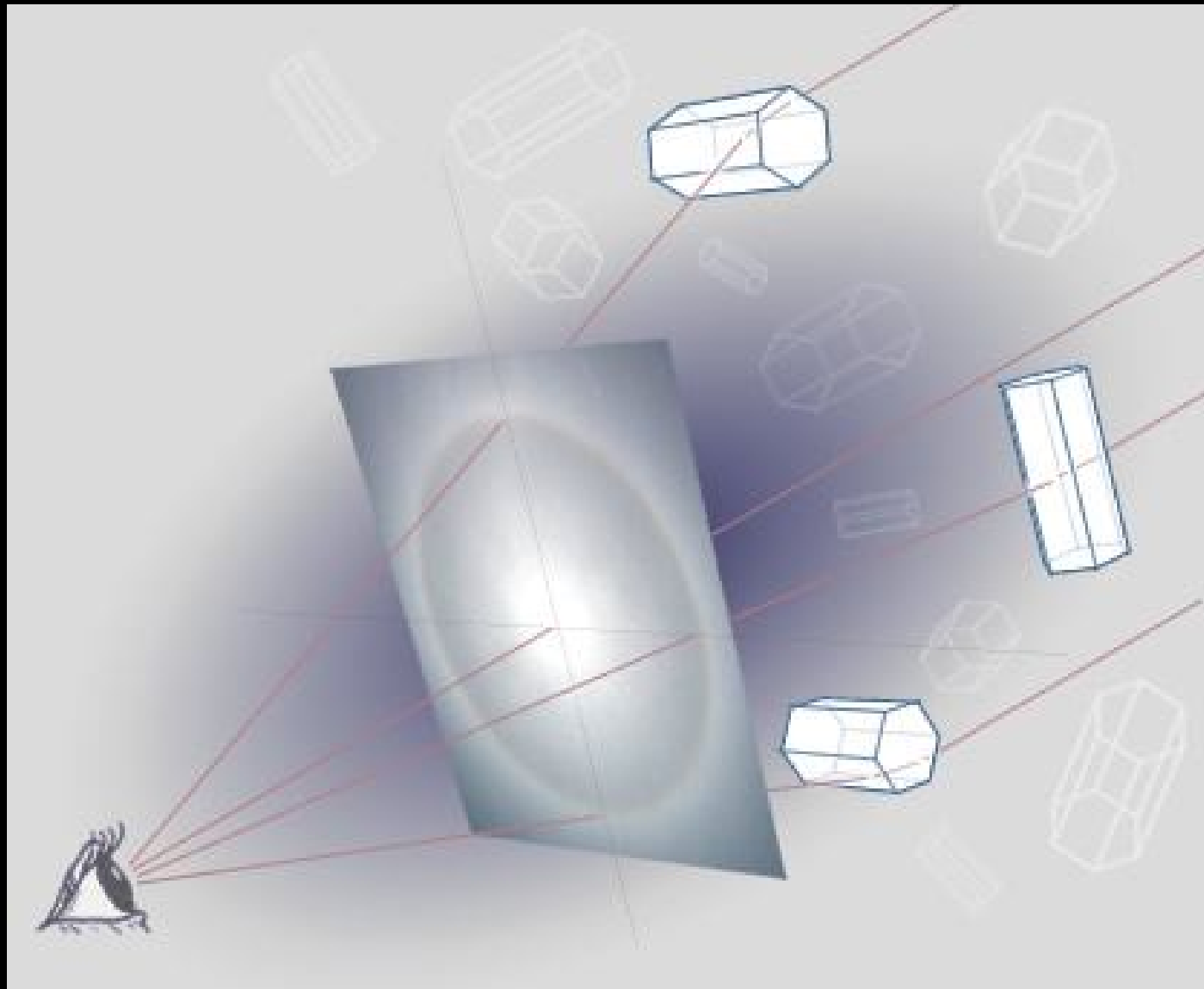
# Световые столбы

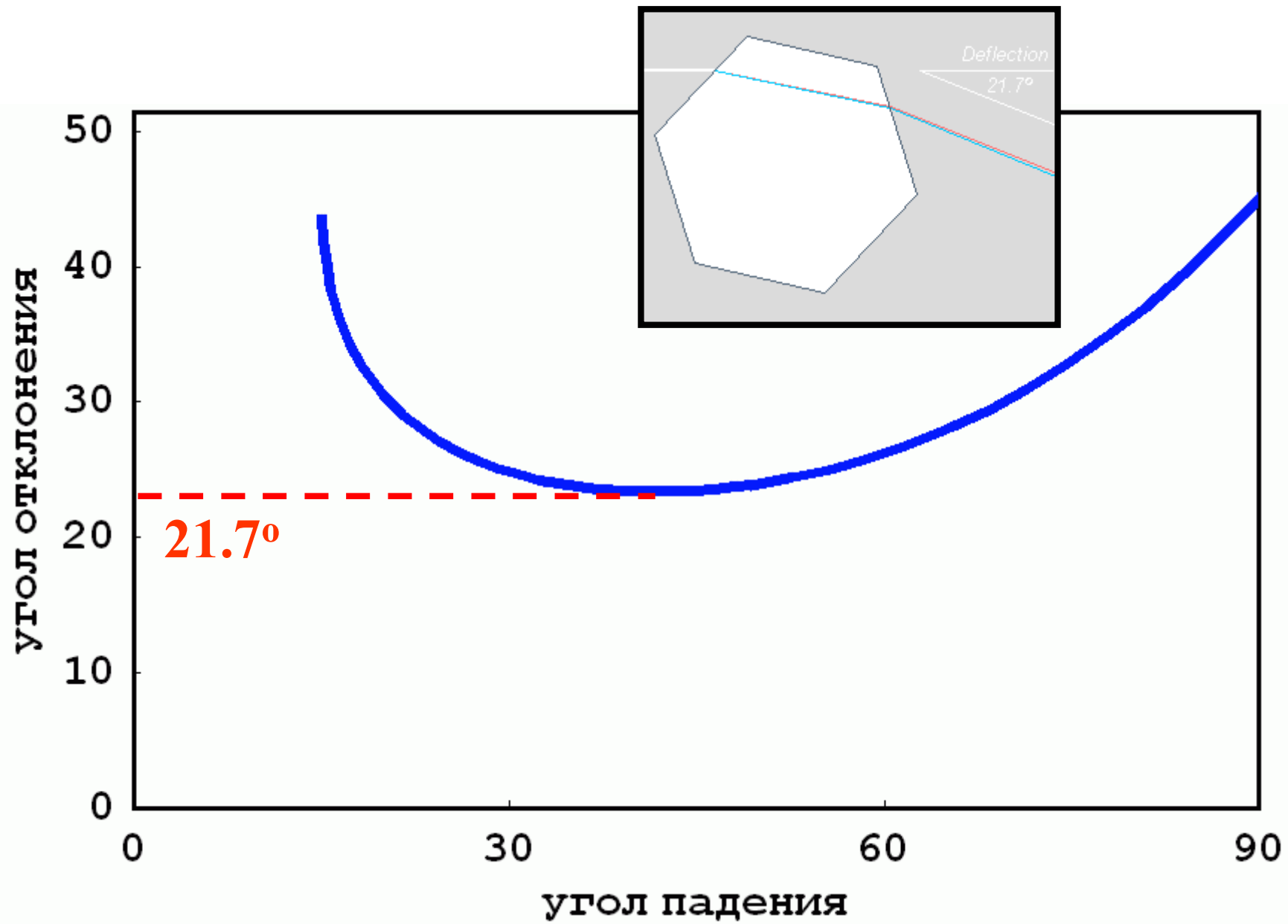


# Световой столб (Sun Pillar)



# Гало



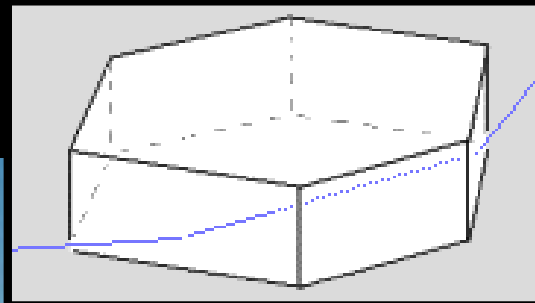
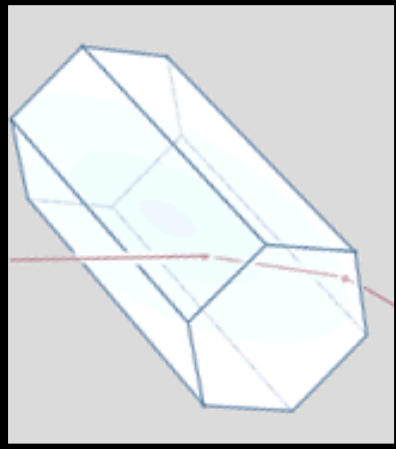


# 22 град. гало вокруг Луны





# Ложные солнца (Sundogs)

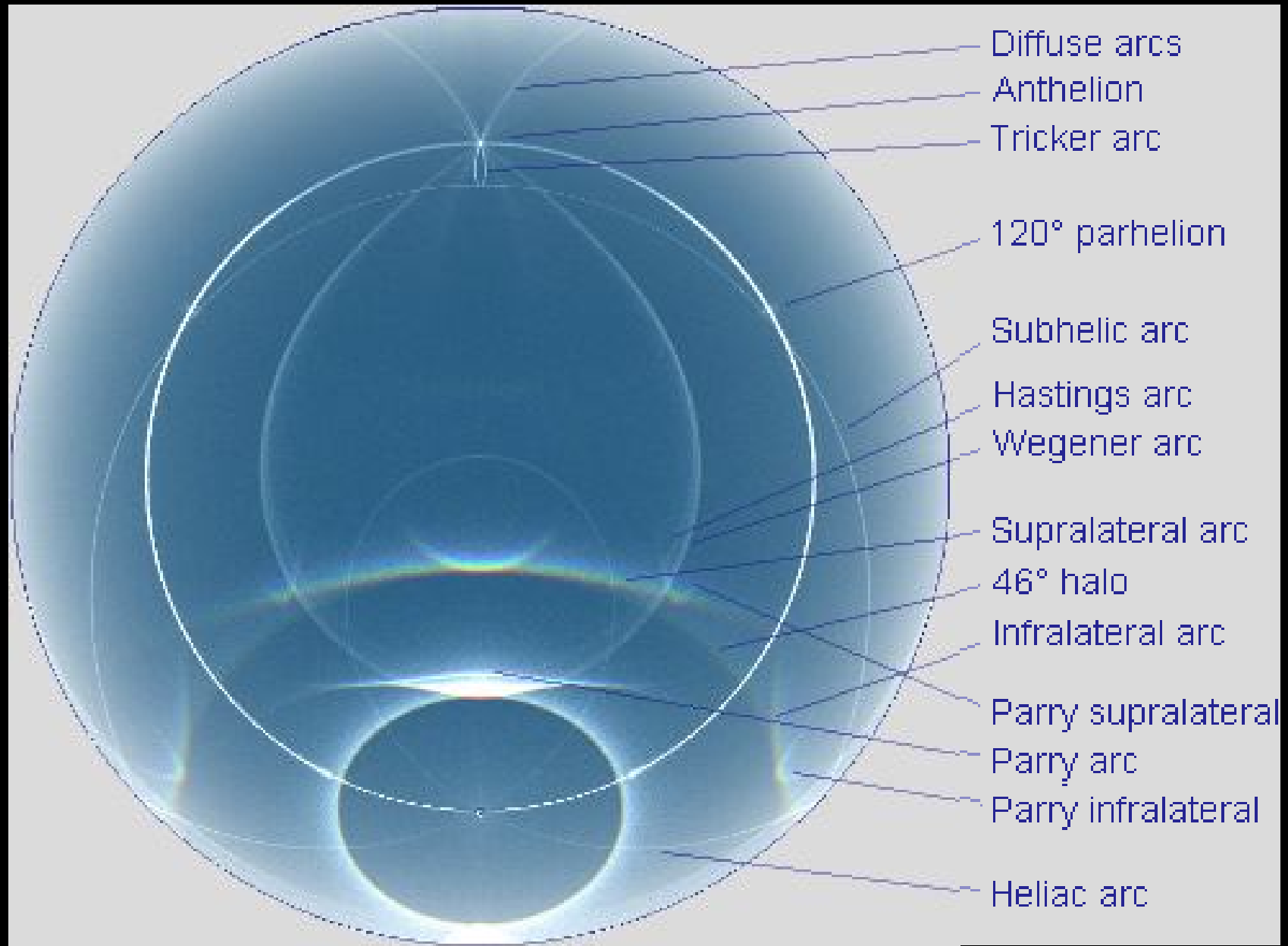


*diamond dust*



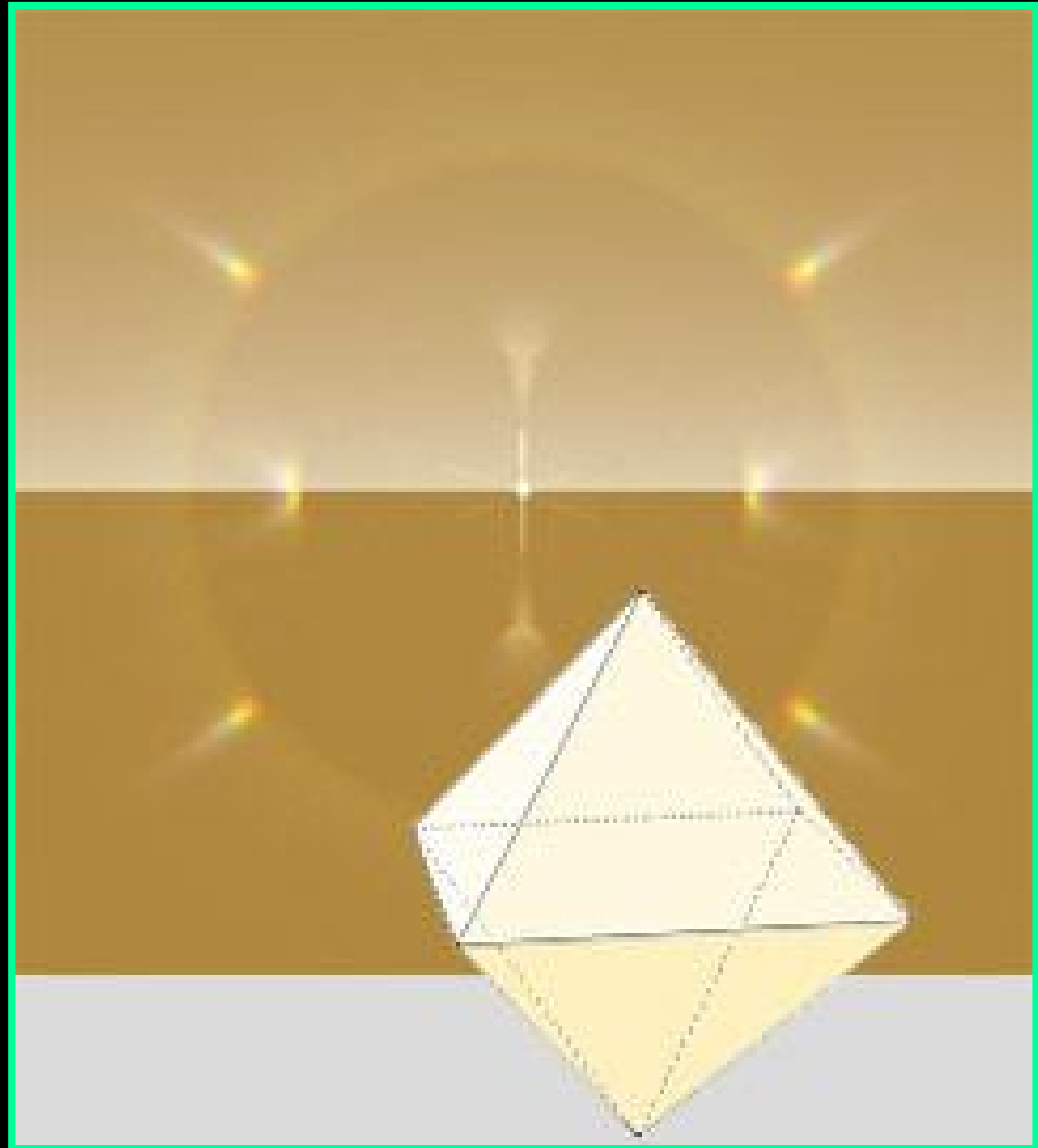
# Ложная Луна (Moon Dog)







**Кристаллы  
аммония  
(атмосферы  
Юпитера и  
Сатурна)**



# Atmospheric Optics

<http://www.atoptics.co.uk/>

# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №10

---

Воронина Елена Викторовна

*кафедра физики Земли*


*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*



# Физика твёрдой Земли



# Программа курса

- Гравитационное поле Земли
  - Строение Земли по сейсмическим данным
  - Электромагнитное поле Земли
  - Тепловое поле Земли
- 

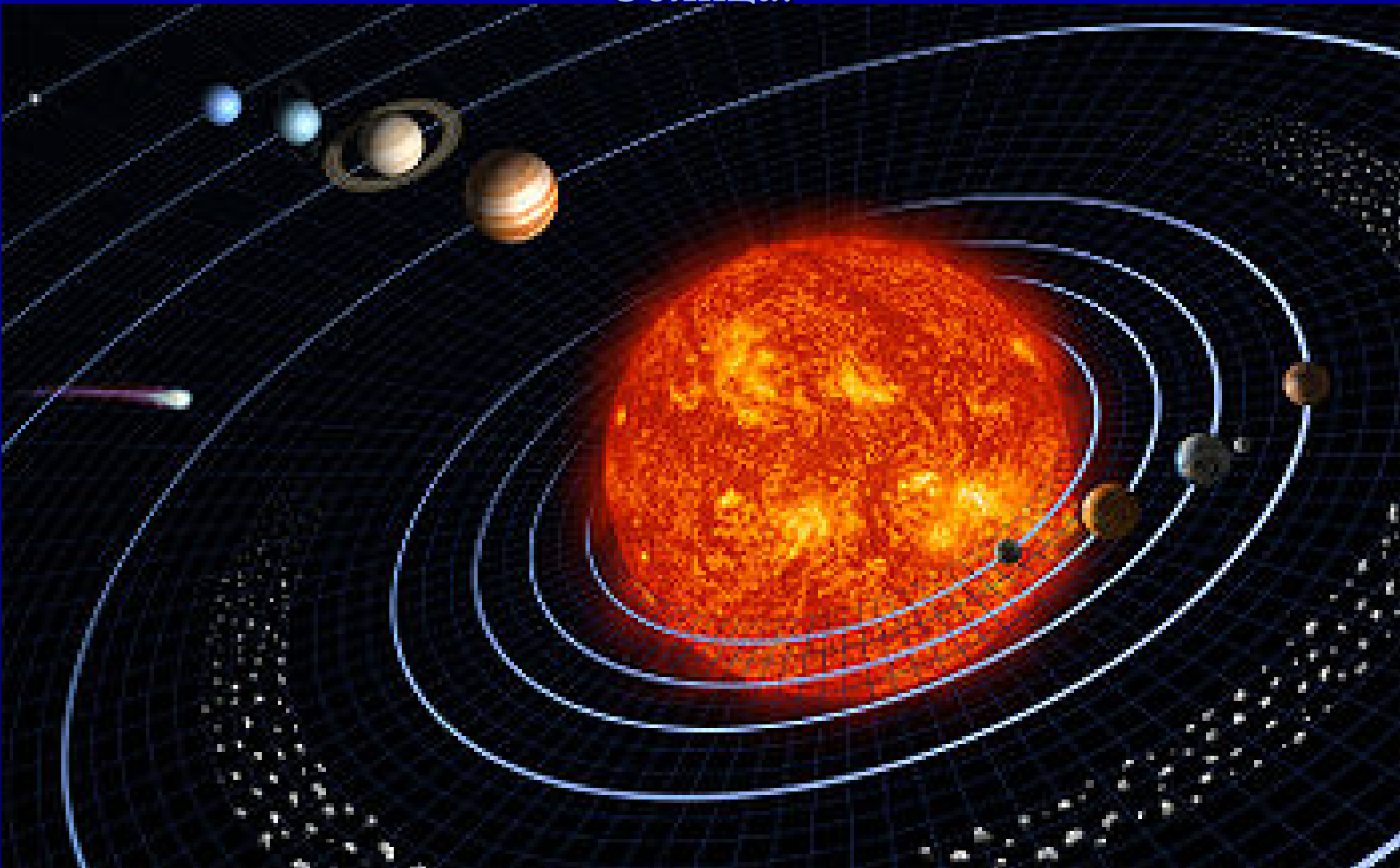
# Понятие гравитации.

- **Гравита́ция** (от лат. *gravitas* — «тяжесть») — универсальное фундаментальное взаимодействие между всеми материальными телами. В приближении малых скоростей и слабого гравитационного взаимодействия описывается теорией тяготения Ньютона, в общем случае описывается общей теорией относительности Эйнштейна.
- В рамках классической механики гравитационное взаимодействие описывается законом всемирного тяготения Ньютона, который гласит, что сила гравитационного притяжения между двумя материальными точками массы  $m$  и  $M$ , разделёнными расстоянием  $R$ , пропорциональна обоим массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними — то есть:

$$F = G \frac{mM}{R^2}$$

- Здесь  $G$  — гравитационная постоянная, равная  $6.67 \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг с}^2)$ . Следовательно, две материальные точки массой 1 кг каждая, находящиеся друг от друга на расстоянии 1 м, взаимно притягиваются гравитационной силой, равной  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н}$ .

Гравитация удерживает планеты на орбитах вокруг Солнца.



# Гравитационное поле Земли

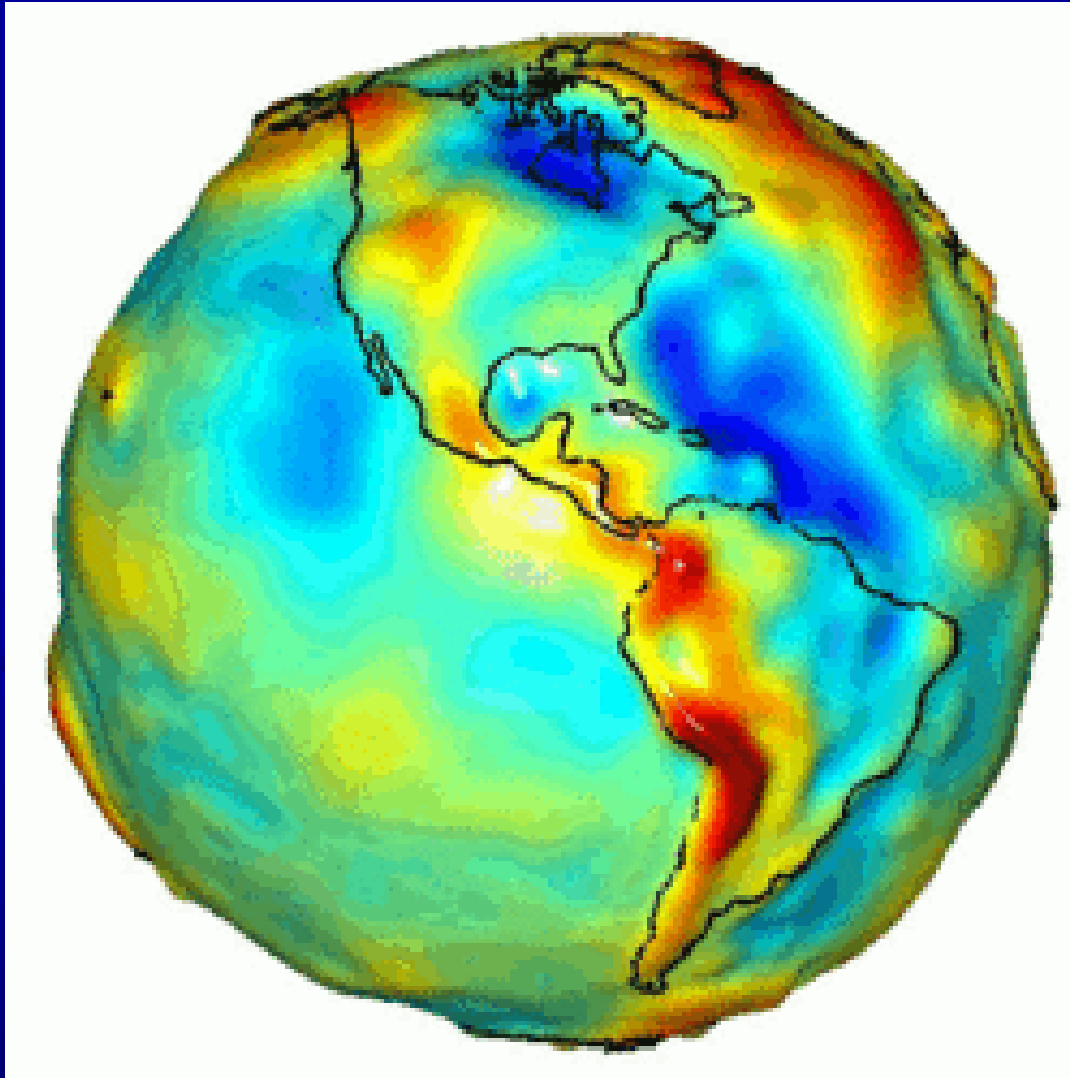
- Гравитационное поле Земли - поле силы тяжести, обусловленное притяжением (тяготением) Земли и центробежной силой, вызванной ее суточным вращением. Гравитационное поле Земли незначительно зависит также от притяжения Луны, Солнца и других небесных тел и масс земной атмосферы.

$$F_{тяж} = F_{гр} + F_{цб}$$

- Потенциал силы тяжести  $W$  складывается из гравитационного потенциала  $U$  и потенциала центробежной силы  $Q$ :

$$W = U + Q$$

# Фигура Земли



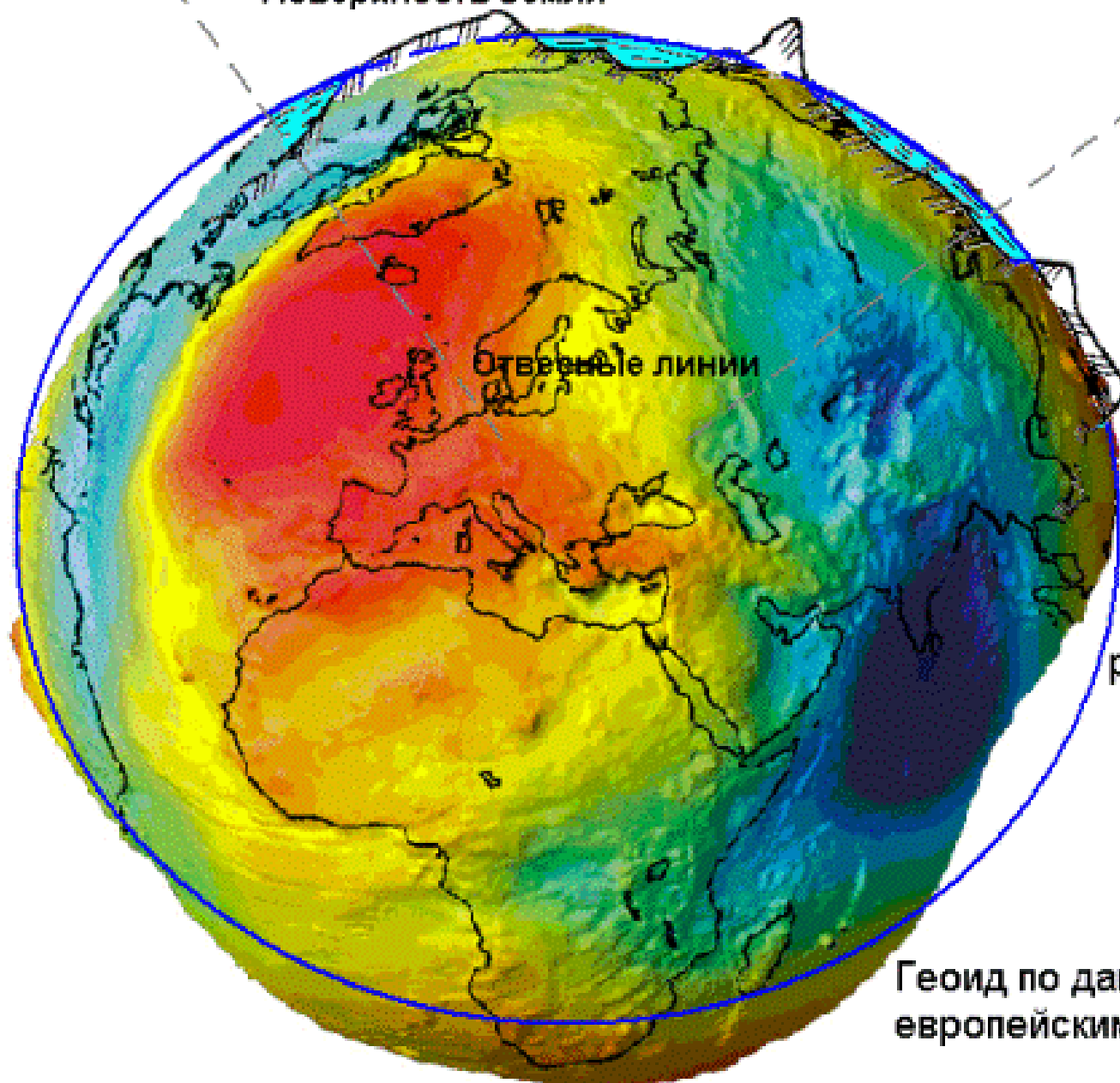
- **Геоид** (греч. *geoeides*, от *гео* — Земля и *eidos* — вид), фигура, которую образовала бы поверхность Мирового океана и сообщающихся с ним морей при некотором среднем уровне воды, свободной от возмущений приливами, течениями, разностями атмосферного давления и т.д.
- На суше поверхность геоида является внутренней поверхностью

Поверхность Земли

Отвесные линии

референц-эллипсоид

Геоид по данным, переданным европейским спутником GOCE



# Схематическое представление поверхности Земли и сжатие Земли



Сжатие Земли:

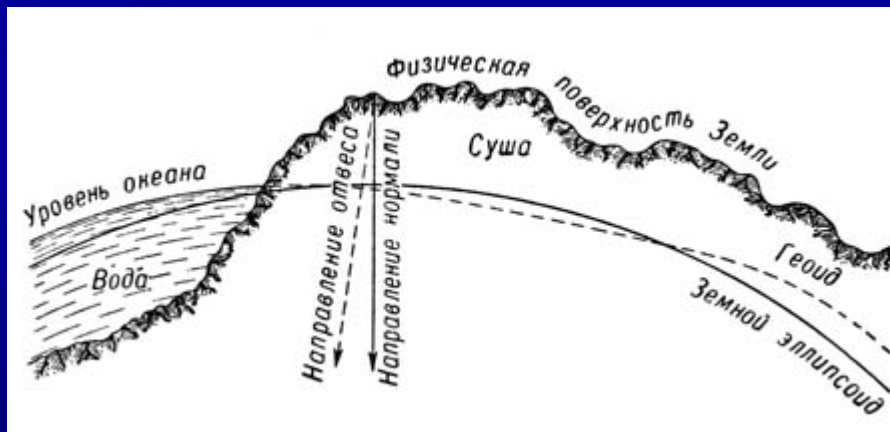
$$\alpha = \frac{a - b}{a} = \frac{1}{298.25}$$

Экваториальный радиус:

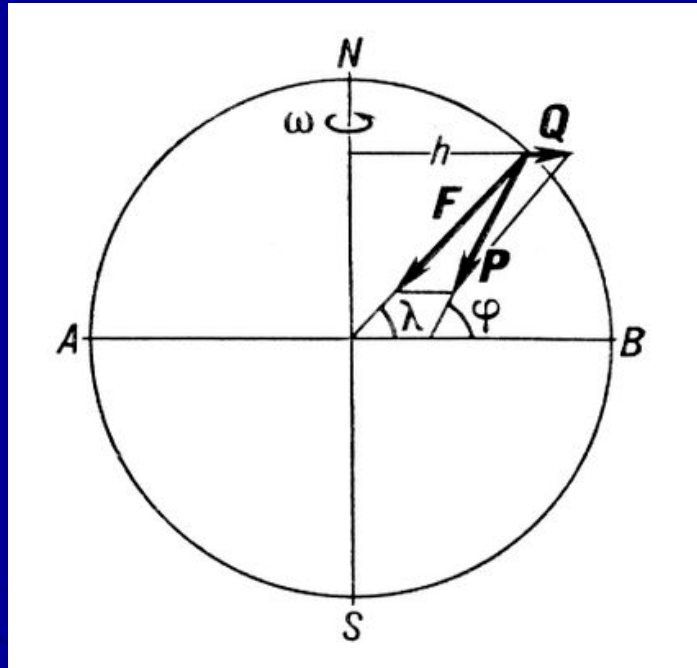
$$a = 6378 \text{ км}$$

Полярный радиус:

$$b = 6356 \text{ км}$$



# Сила тяжести



$$P = mgh$$

$g$  - ускорение силы тяжести

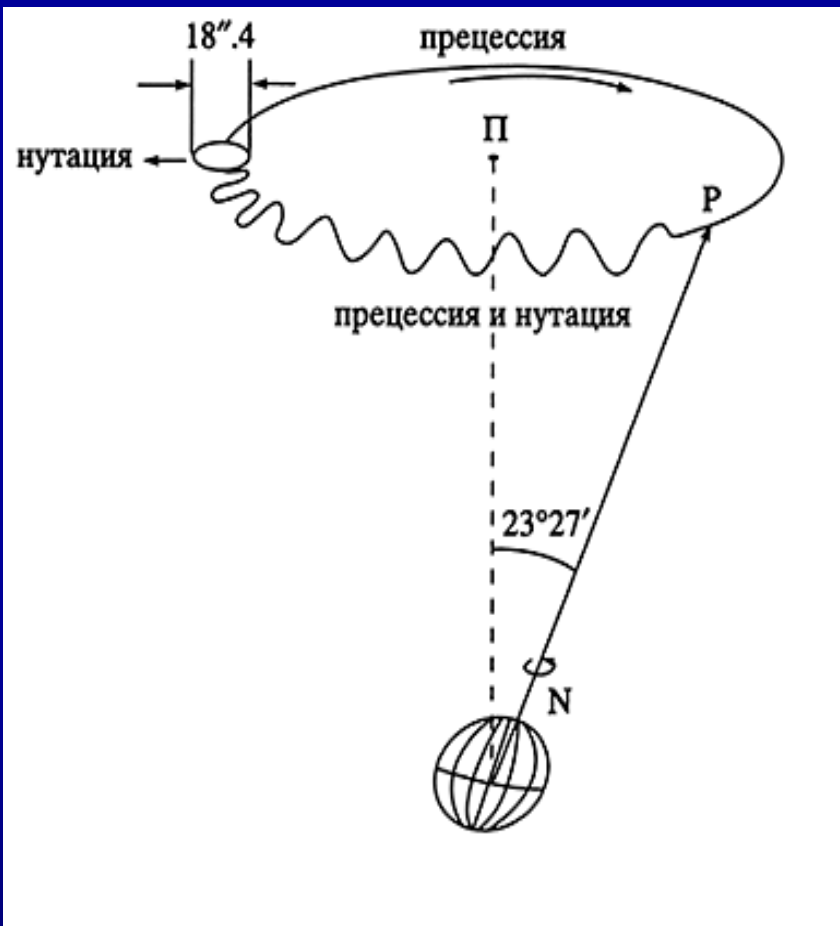
$h$  - высота

Сила тяжести  $P$ - сила:  
- действующая на любую материальную точку, находящуюся вблизи земной поверхности.

Определяется как геометрическая сумма силы тяготения Земли  $F$  и центробежной силы инерции  $Q$ , учитывающей эффект суточного вращения Земли. Сила тяжести направлена по вертикали в данной точке земной поверхности и не совпадает с силой тяготения.



# Движение оси вращения Земли в пространстве для внеземного наблюдателя

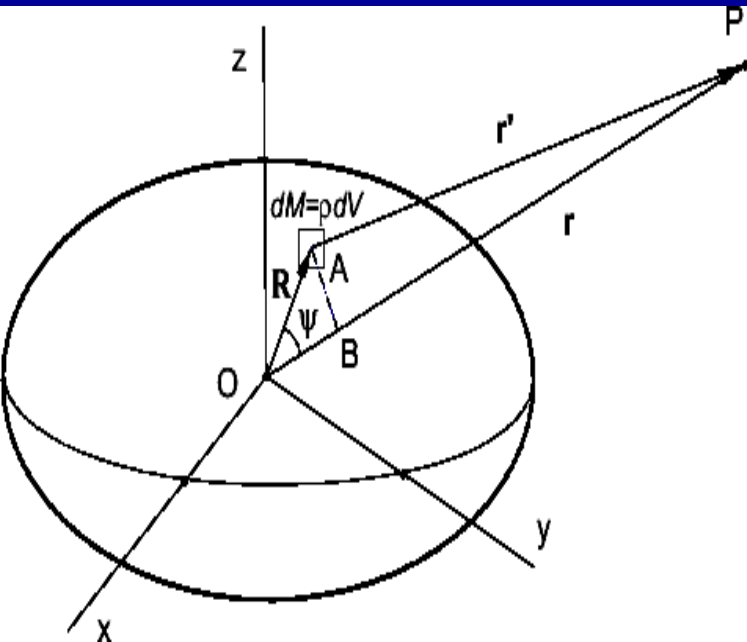


**Прецессия** — явление, при котором ось вращающегося объекта поворачивается, например, под действием внешних моментов.

По современным данным, полный цикл земной прецессии составляет около 25 765 лет.

**Нута́ция** (от лат. *nūtāre* - колебаться) — слабое нерегулярное движение вращающегося твёрдого тела, совершающего прецессию.

# Гравитационный потенциал элемента массы.



$$dU(r) = -\frac{GdM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^n P_n(\cos\psi)$$

$$P_0(\cos\psi) = 1$$

$$P_1(\cos\psi) = \cos\psi$$

$$P_2(\cos\psi) = \left(\frac{3}{2}\cos^2\psi - \frac{1}{2}\right)$$

$n$  - степень полиномов Лежандра

$$dU(r) = -\frac{GM}{r} = -\frac{GdM}{r \sqrt{1 - \left(\frac{R}{r}\right)^2 - 2\left(\frac{R}{r}\right)\cos\psi}}$$

$$dM = \rho dV$$

$\rho$  - плотность  $V$  - объем

Гравитационный потенциал Земли определяется из решения системы уравнений:

$$\nabla^2 U = -4\pi G \rho(r) \quad \text{внутри Земли (уравнение Пуассона)}$$

$$\nabla^2 U = 0 \quad \text{вне Земли (уравнение Лапласа)}$$

Нормальный гравитационный потенциал:

$$U = -\frac{GM}{r} \left[ 1 - J_2 \left( \frac{a}{r} \right)^2 P_2(\cos \theta) + \dots \right]$$

$$J_2 = 1.0826 \times 10^{-3}$$

динамический гравитационный момент

$$\alpha = \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 a^3}{GM}$$

$$GM = 3.98 \times 10^{14} \frac{\mathcal{M}^3}{\mathcal{C}^2}$$

Потенциал центробежных сил:

$$Q = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos \varphi$$

$$\omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ 1/с}$$

- угловая  
скорость  
вращения,

$\varphi$  - широта

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi;$$

полярный угол



Гравитационный потенциал зависит не только от широты, но и от долготы:

$$U(r, \varphi, \lambda) = -\frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n \left(A_n^m \cos m\lambda + B_n^m \sin m\lambda\right) P_n^m(\cos \theta)$$

$A_n^m$ ,  $B_n^m$  - сферические функции;

$P_n^m$  - присоединенные функции Лежандра

$0 < m < n$

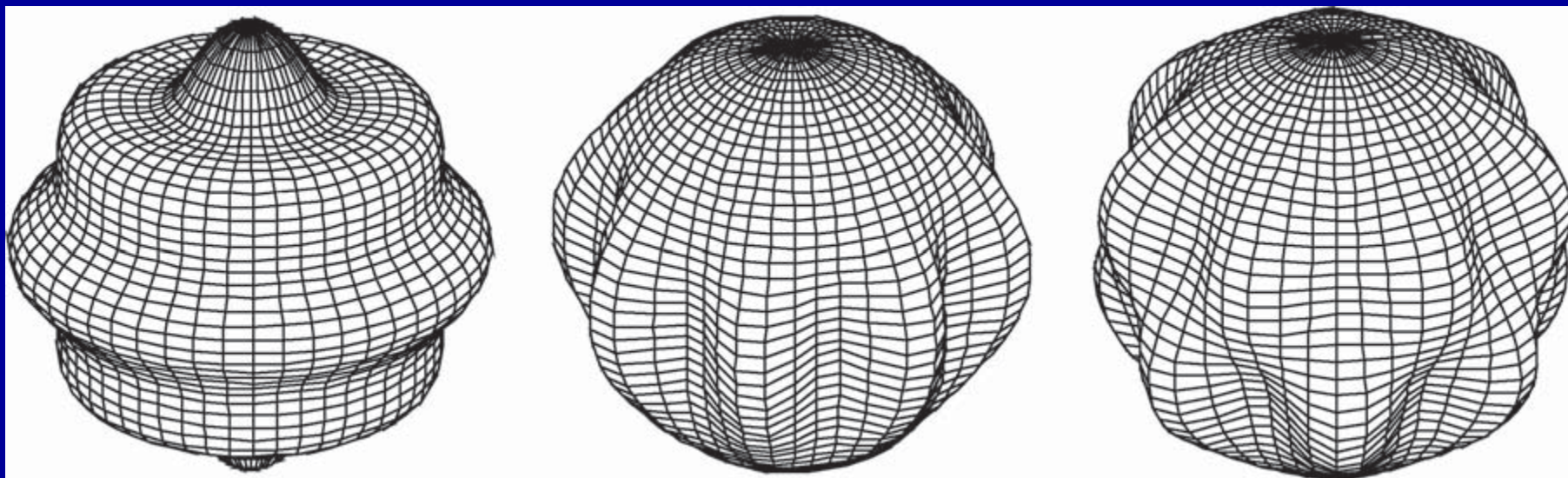
$m = 0$  - зональные гармоники;

$n = m$  - секториальные гармоники

$\lambda$  - долгота

- Предположения:
1. фигура планеты – тело вращения,
  2. начало системы координат совпадает с центром масс.
  3. направления осей координат параллельны главным осям инерции

# Зональные, секториальные и тессеральные гармоники на сфере.



Предположения: 1. фигура планеты – тело вращения,  
2. начало системы координат совпадает с центром масс.  
3. направления осей координат параллельны  
главным осям инерции

# Потенциал силы тяжести.

$$W = -\frac{GM}{r} \left[ 1 - J_2 \left( \frac{a}{r} \right)^2 P_2(\cos \theta) \right] - \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta$$

Ускорение силы тяжести  $g = -gradW$

$$g = -\frac{\partial W}{\partial r} = \frac{GM}{a} \left[ -\frac{a}{r^2} + \frac{3}{2} J_2 \frac{a^2}{r^4} (3 \cos^2 \theta - 1) + q \frac{r}{a^2} \sin^2 \theta \right]$$

$$q = \frac{\omega^2 a}{g_{\text{экв}}} = 3.45 \times 10^{-3} \quad \text{-отношение центробежной силы к силе тяжести на экваторе}$$

На экваторе

$$g_{\text{экв}} = -\frac{GM}{a^2} \left( 1 + \frac{3}{2} J_2 - q \right) = 9.78 \frac{\mathcal{M}}{c^2}$$

На полюсе

$$g_{\text{пол}} = 9.83 \frac{\mathcal{M}}{c^2}$$

# Формула Клеро

Ускорение, направленное по нормали к поверхности геоида не зависит от массы тела, но зависит от положения тела на поверхности Земли

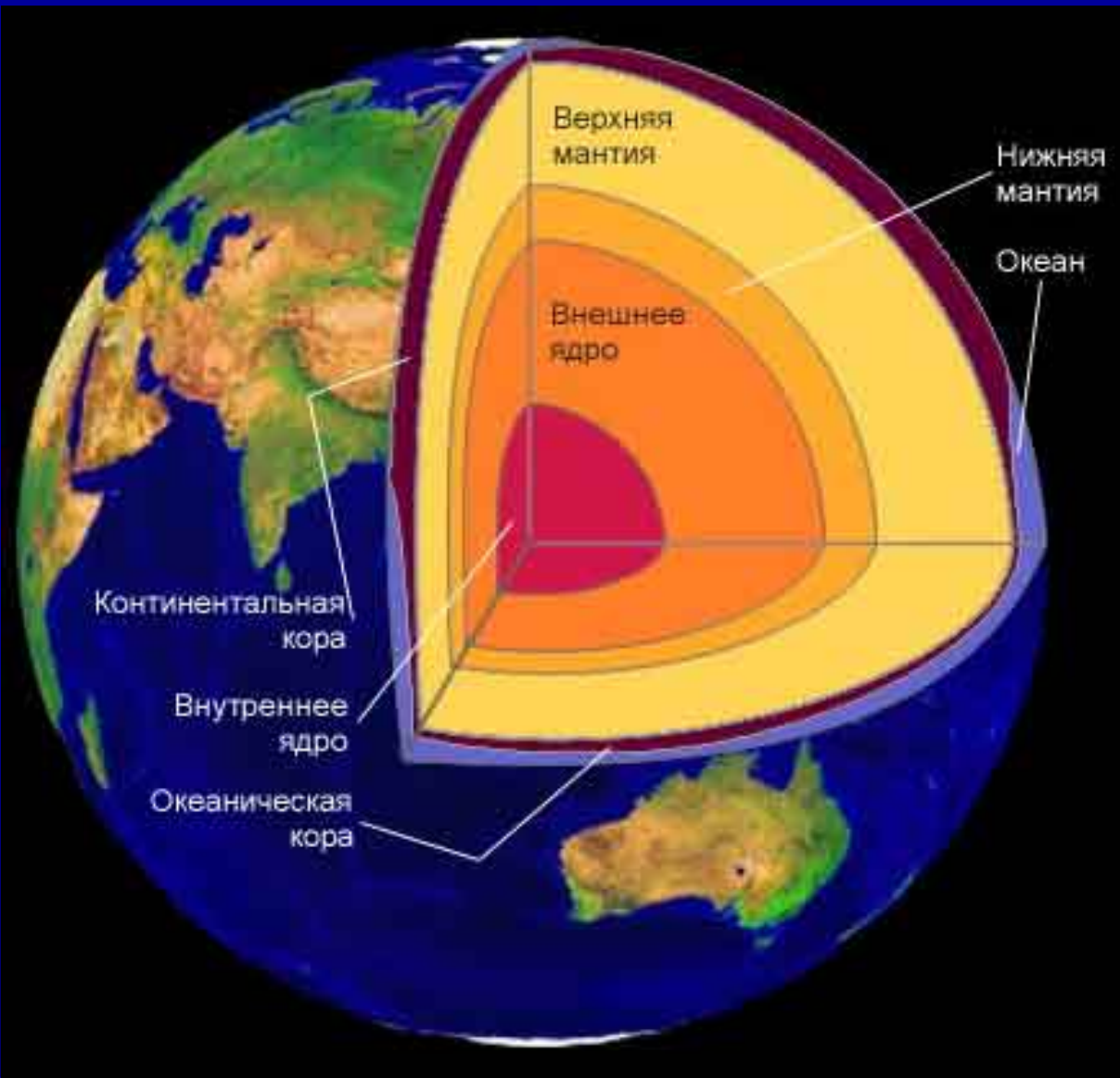
$$g = g_{\text{ЭКВ}} \left( 1 + \beta \sin^2 \varphi \right)$$

Параметр, выражающий связь ускорения силы тяжести со сжатием

$$\beta = \frac{5}{2} q - \alpha$$

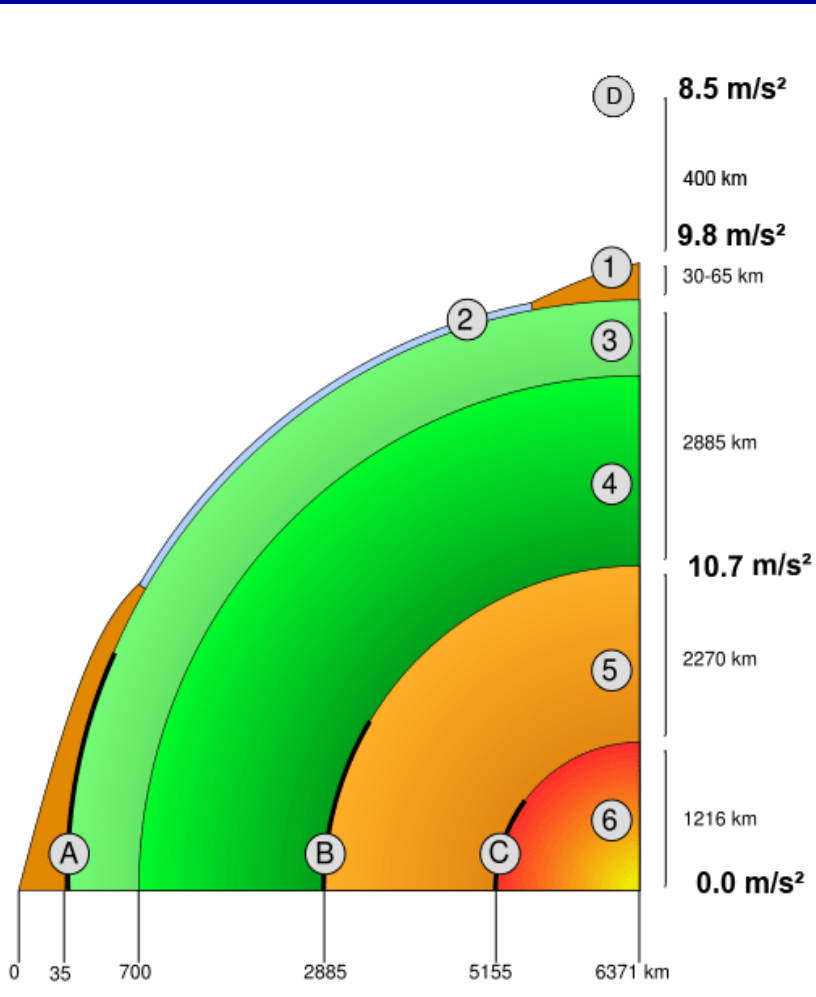


# Схема внутреннего строения Земли.

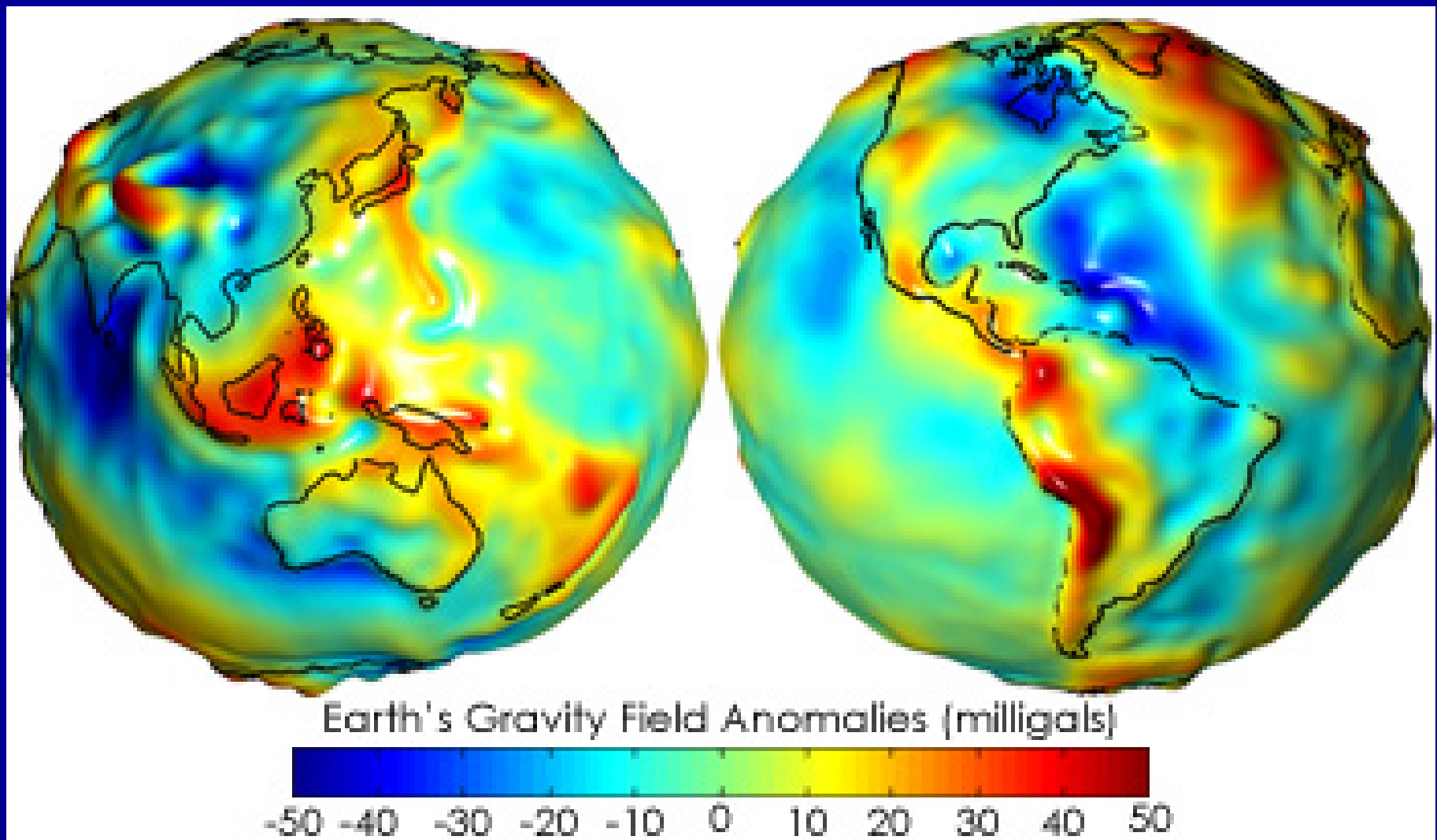


Земля, как и другие планеты земной группы, имеет слоистое внутреннее строение. Она состоит из твёрдых силикатных оболочек (коры, крайне вязкой мантии), и металлического ядра. Внешняя часть ядра жидкая (значительно менее вязкая, чем мантия), а внутренняя — твёрдая.

# Изменение ускорения силы тяжести в недрах Земли и на высоте орбит спутников.

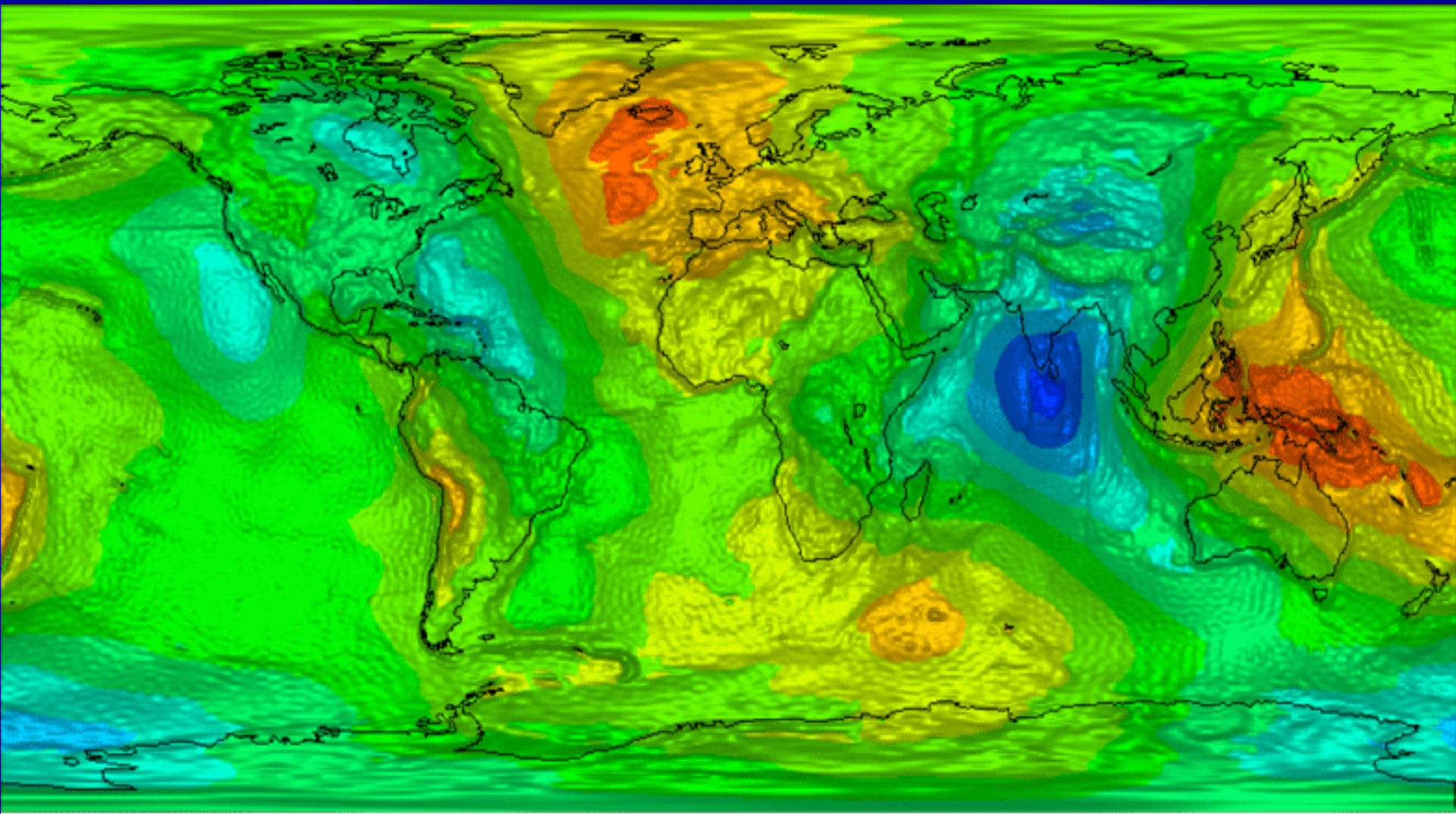


- А- граница между земной корой и мантией (Мохоровичича)
- В – граница между мантией и внешним ядром (Гутенберга)
- С – граница между внешним и внутренним ядром (Леманн)
- 1 – континентальная кора
- 2 – океаническая кора
- 3 – верхняя мантия
- 4 – нижняя мантия
- 5 – внешнее ядро
- 6 - внутреннее ядро
- D – высота орбит спутников

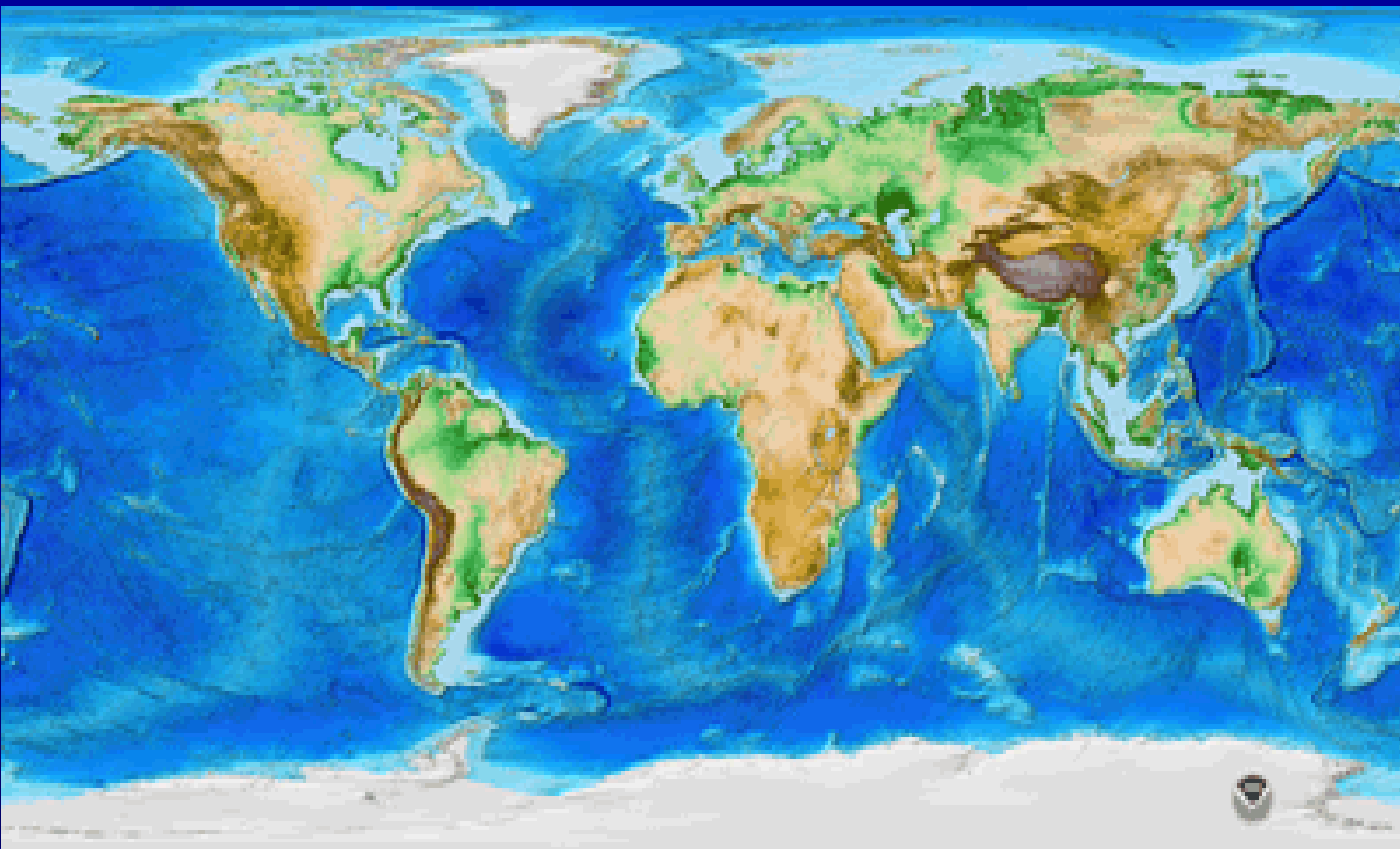


- Гравитационная аномалия - разность между наблюдаемой силой тяжести и ее нормальным (теоретическим) значением в той же точке.
- Единицы измерения: 1 гал=1см/с<sup>2</sup>  **$1\text{млг} = 10^{-3}\text{гал}$**

# Карта аномалий геоида, полученная по спутниковым данным в 2010 году



# Топография поверхности Земли



# Момент инерции Земли

- **Момент инерции** — физическая величина, мера инертности тела во вращательном движении вокруг оси, подобно тому, как масса тела является мерой его инертности в поступательном движении. Характеризуется распределением масс в теле: момент инерции равен сумме произведений элементарных масс на квадрат их расстояний до базового множества (точки, прямой или плоскости).
- Единица измерения СИ: кг·м<sup>2</sup>.

$$M_{\text{Земли}} = 5,97 \times 10^{24} \text{ кг}$$

$$I_{\text{шара}} = \frac{2}{5} m R^2$$

Момент относительно полярной оси

$$C = \int_V \rho l_1^2 dV = 0,3307 M_3 R^2$$

$$l_1 = r \sin \theta$$

Момент относительно экваториальной оси

$$A = \int_V \rho l_2^2 dV = 0,3296 M_3 R^2$$

$$l_2 = r \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \lambda}$$

# Моменты инерции планет и спутников Солнечной системы

$$\bar{I}_3 = \frac{C + 2A}{3} \cong 0,33076 M_3 R^2$$

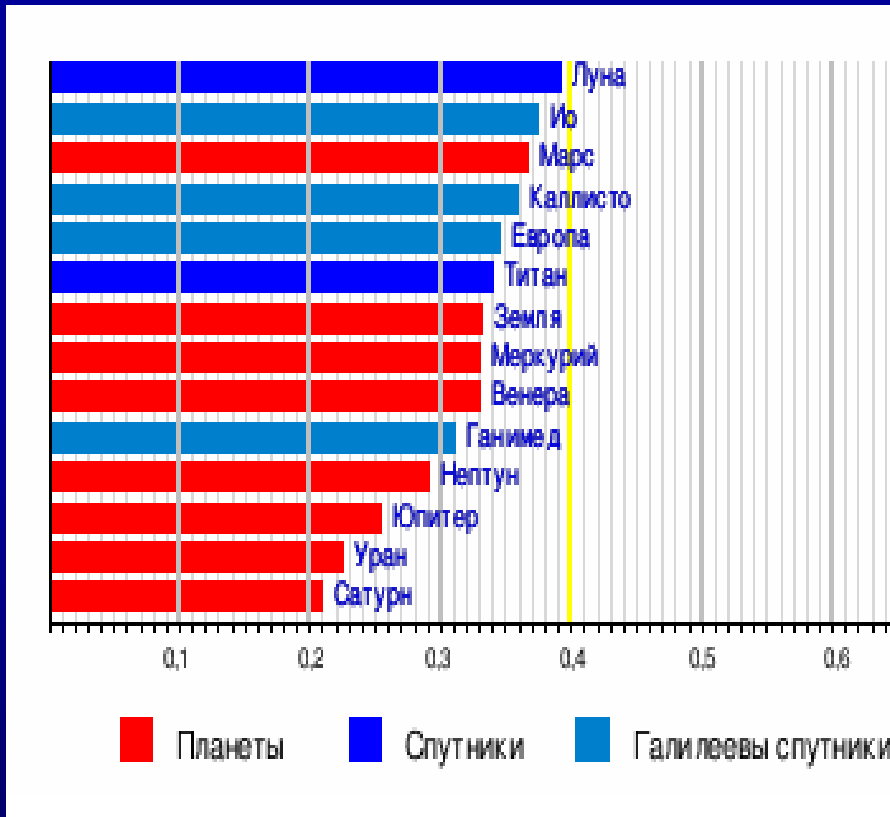
при:  $C \geq B \cong A$

Динамический гравитационный момент

$$J_2 = \frac{C - A}{M_3 R^2} = 1082,65 \times 10^{-6}$$

Постоянная прецессии

$$H = \frac{C - A}{C} = \frac{1}{305.51} \approx \alpha$$



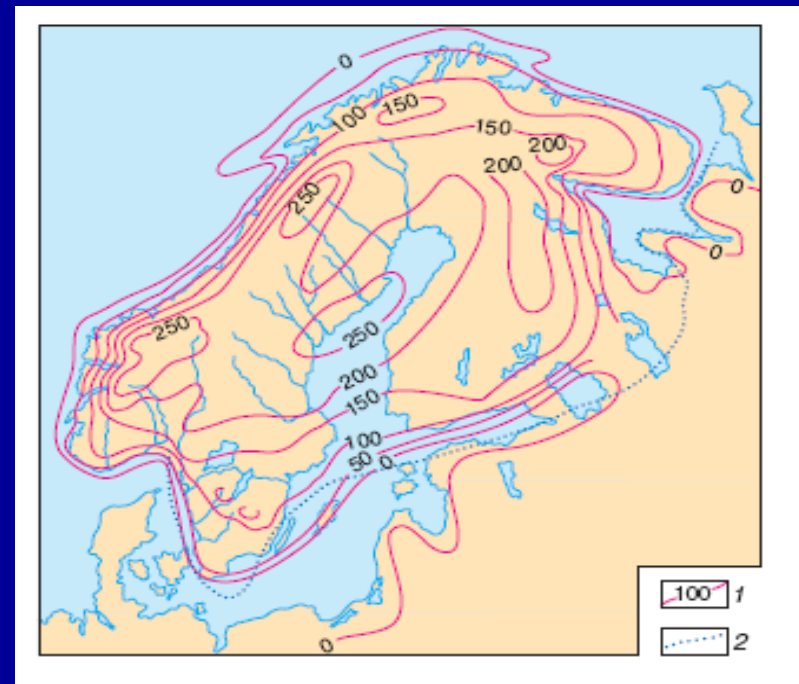
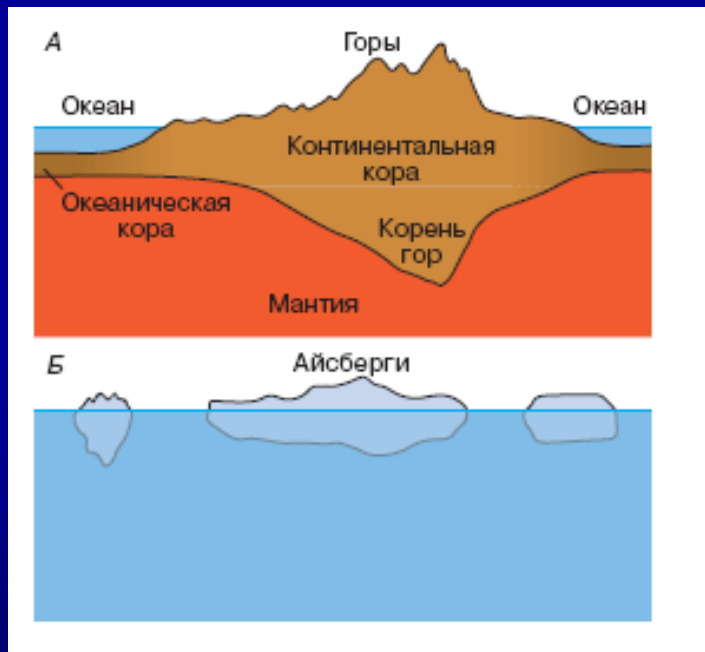
# Моменты инерции оболочек Земли и их масса

		A	C	M
		кг·м <sup>2</sup>		кг
1.	Внутреннее ядро	$5,86 \cdot 10^{34}$	$5,87 \cdot 10^{34}$	$9,85 \cdot 10^{22}$
2.	Внешнее ядро	$9,06 \cdot 10^{36}$	$9,08 \cdot 10^{36}$	$1,84 \cdot 10^{24}$
3.	Мантия	$7,01 \cdot 10^{37}$	$7,04 \cdot 10^{37}$	$4,00 \cdot 10^{24}$
4.	Земная кора	$8,34 \cdot 10^{35}$	$8,36 \cdot 10^{35}$	$3,098 \cdot 10^{22}$
Сумма		$8,01 \cdot 10^{37}$	$8,04 \cdot 10^{37}$	$5,97 \cdot 10^{24}$

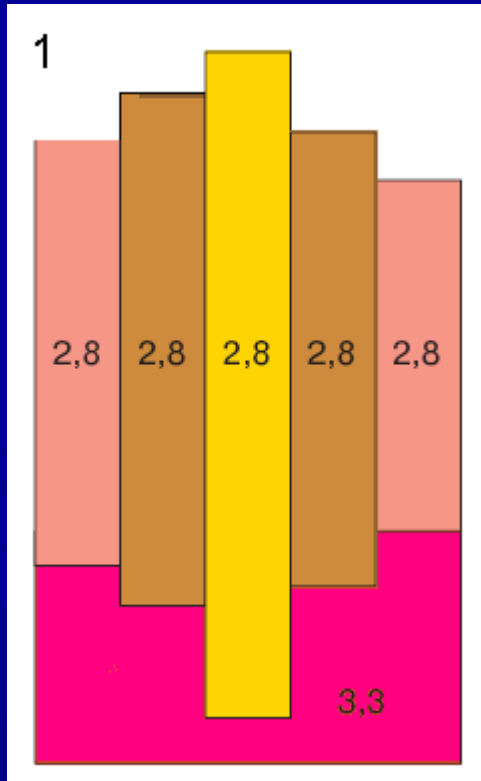


# Изостазия

**Изостазия** (изостатическое равновесие) — гидростатически равновесное состояние земной коры, при котором менее плотная земная кора (средняя плотность  $2.8 \text{ г/см}^3$ ) «плавает» в более плотном слое верхней мантии — астеносфере (средняя плотность  $3.3 \text{ г/см}^3$ ), подчиняясь закону Архимеда. Изостазия не является локальной, то есть в изостатическом равновесии находятся достаточно крупные (100—200 км) блоки.



# Изостазия по Эйри (1855г.)

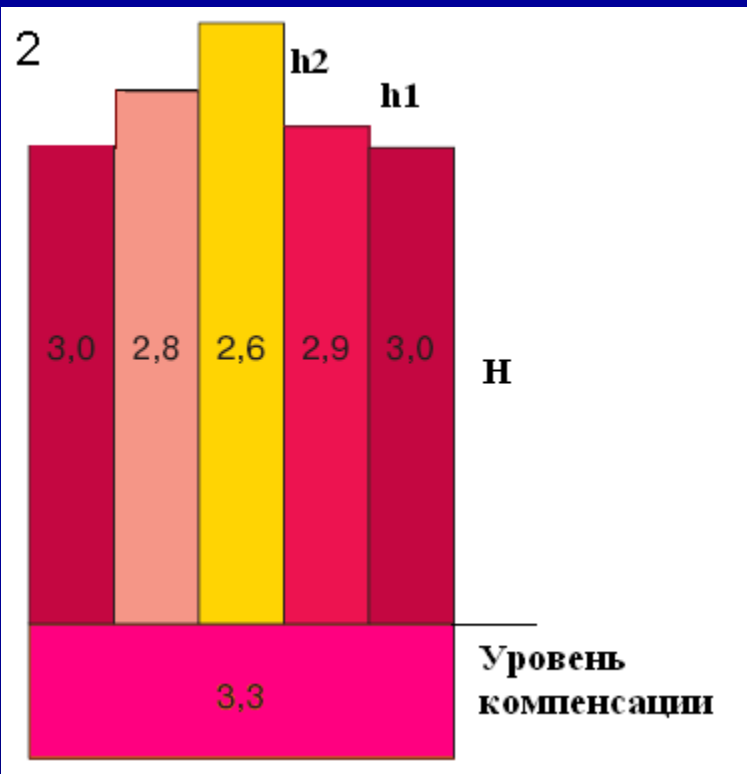


Земная кора состоит из блоков, имеющих **одинаковую плотность, но разную толщину.**

Толщина блоков и глубина их погружения наиболее велики в горных районах и минимальны в океанических впадинах. При этом материал субстрата перетекает от погружающихся частей к поднимающимся.

компенсация осуществляется как за счет изменения плотности самой коры, так и за счет изменения ее толщины

# Изостазия по Пратту (1886г.)



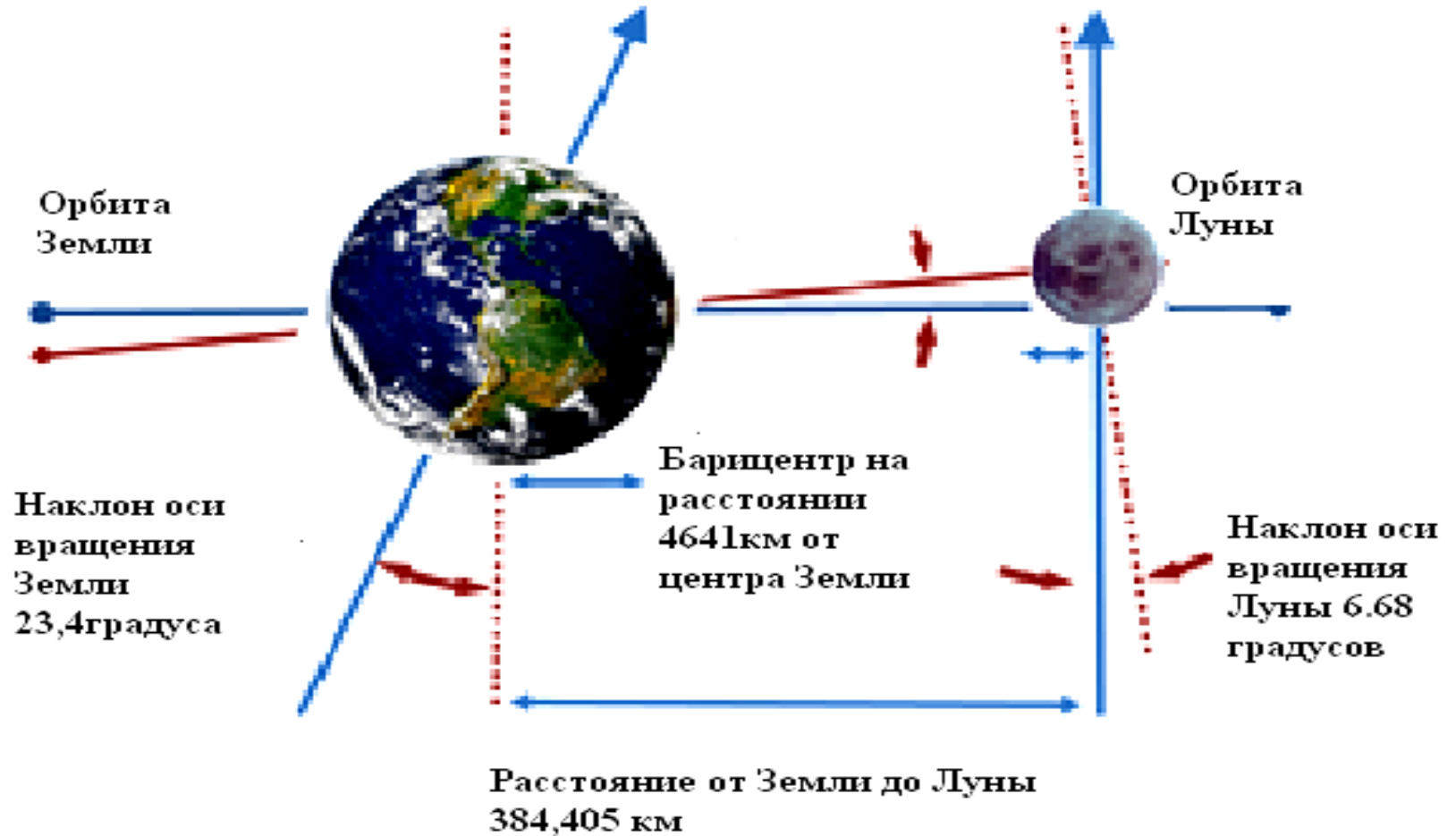
Разности высот рельефа обусловлены **разной плотностью** блоков земной коры: возвышенностям соответствует меньшая плотность, низменностям — большая.

$$\rho_1 H = \rho_2 (H + h_1) = \rho_3 (H + h_2)$$

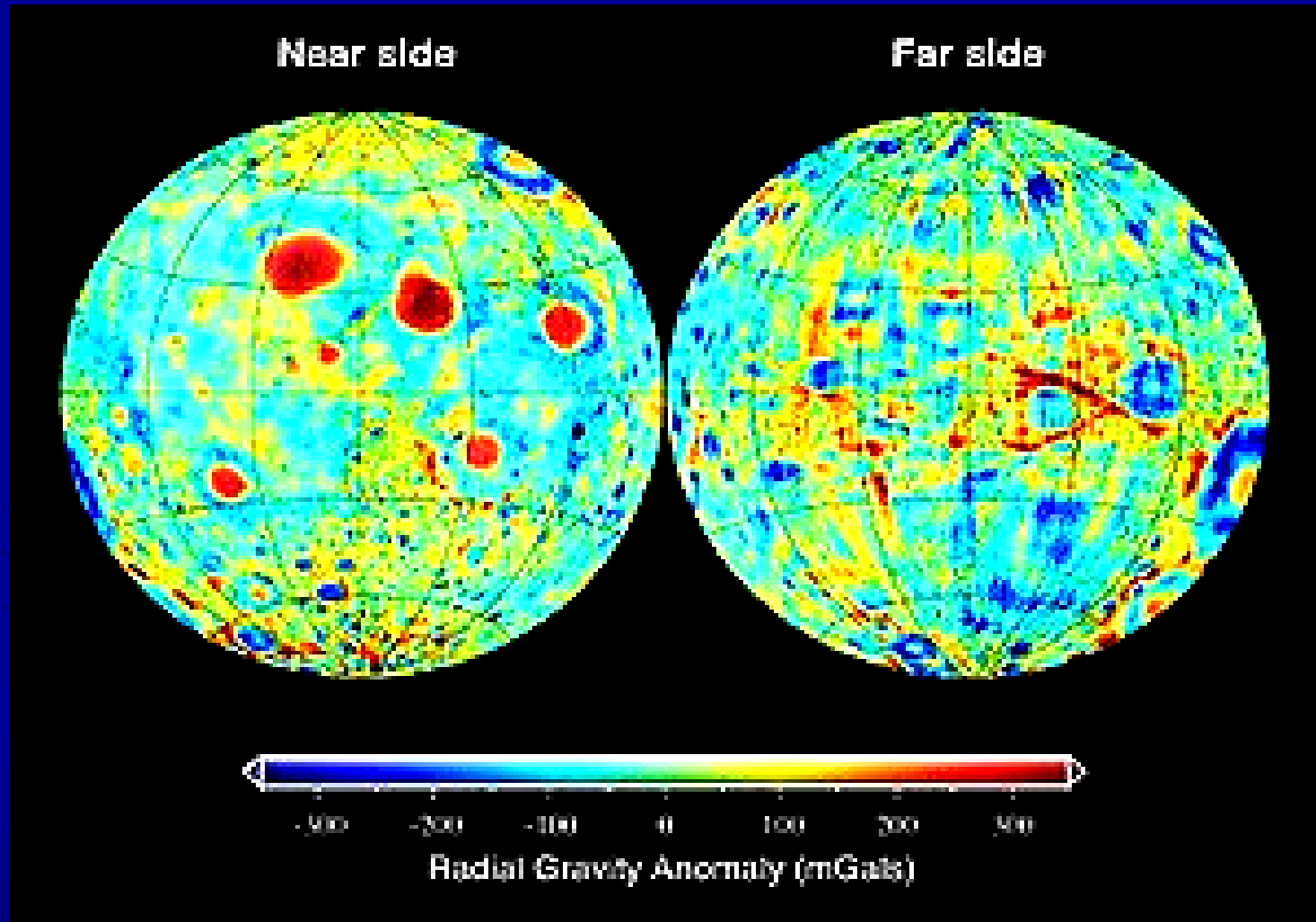
$$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$$

$$H < H + h_1 < H + h_2$$

# Система Земля – Луна.



# Гравитационные аномалии на поверхности Луны



# Приливообразующий потенциал Луны

$$W = V + Q + \delta W$$

$$\delta W = \frac{GM_{\text{Луны}}}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{R_{\text{Л}}}{r} \right)^n \times P_n \cos \theta$$

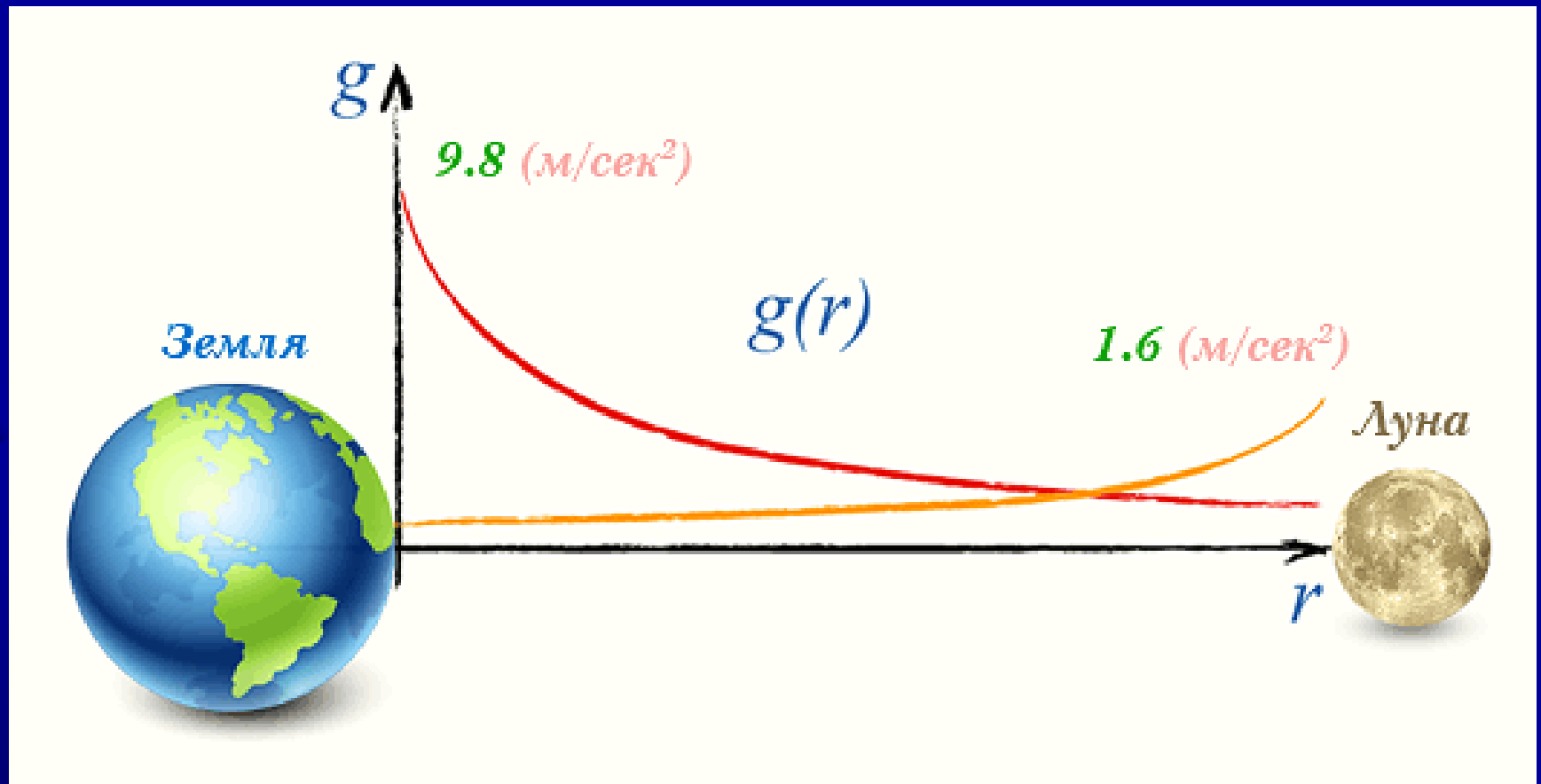
$$M_{\text{Луны}} = 7,34 \times 10^{22} \text{ кг}$$

$$R_{\text{Луны}} = 1737 \text{ км}$$

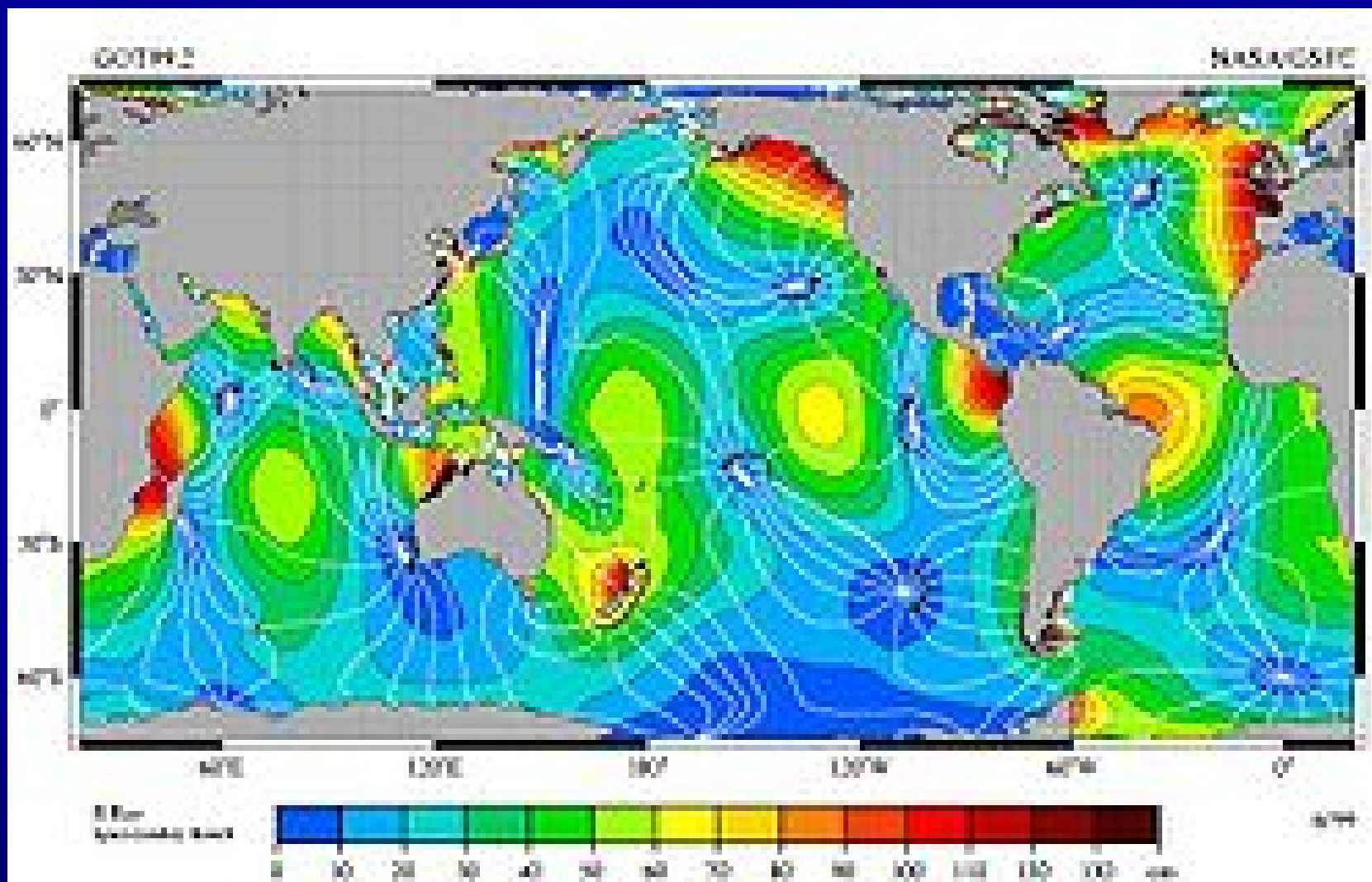
$$g_{\text{Луны}} = 1,62 \frac{\mathcal{M}}{\text{с}^2}$$



Ускорение силы тяжести Земли при удалении от нее – уменьшается, а ускорение силы тяжести Луны – растет.



# Доминирующая составляющая прилива





# Приливы в заливе Фанди.



**Прили́в** и **отли́в** — периодические вертикальные колебания уровня океана или моря, являющиеся результатом изменения положений Луны и Солнца относительно Земли вместе с эффектами вращения Земли и особенностями данного рельефа и проявляющееся в периодическом **горизонтальном** смещении водных масс.

# Параметры Земли

Масса Земли	$5,97 \cdot 10^{24}$ кг
Средний радиус	6371 км
Экваториальный радиус	6378 км
Полярный радиус	6357 км
Сжатие	1/298,257
Ускорение на экваторе	9,78 м/с <sup>2</sup>
Ускорение на полюсе	9,83 м/с <sup>2</sup>
Гравитационный момент	$1082,6 \cdot 10^{-6}$
Средний момент инерции	$0,3307MR^2$
Угловая скорость вращения	$7,29 \cdot 10^{-5}$ рад/с

# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №11

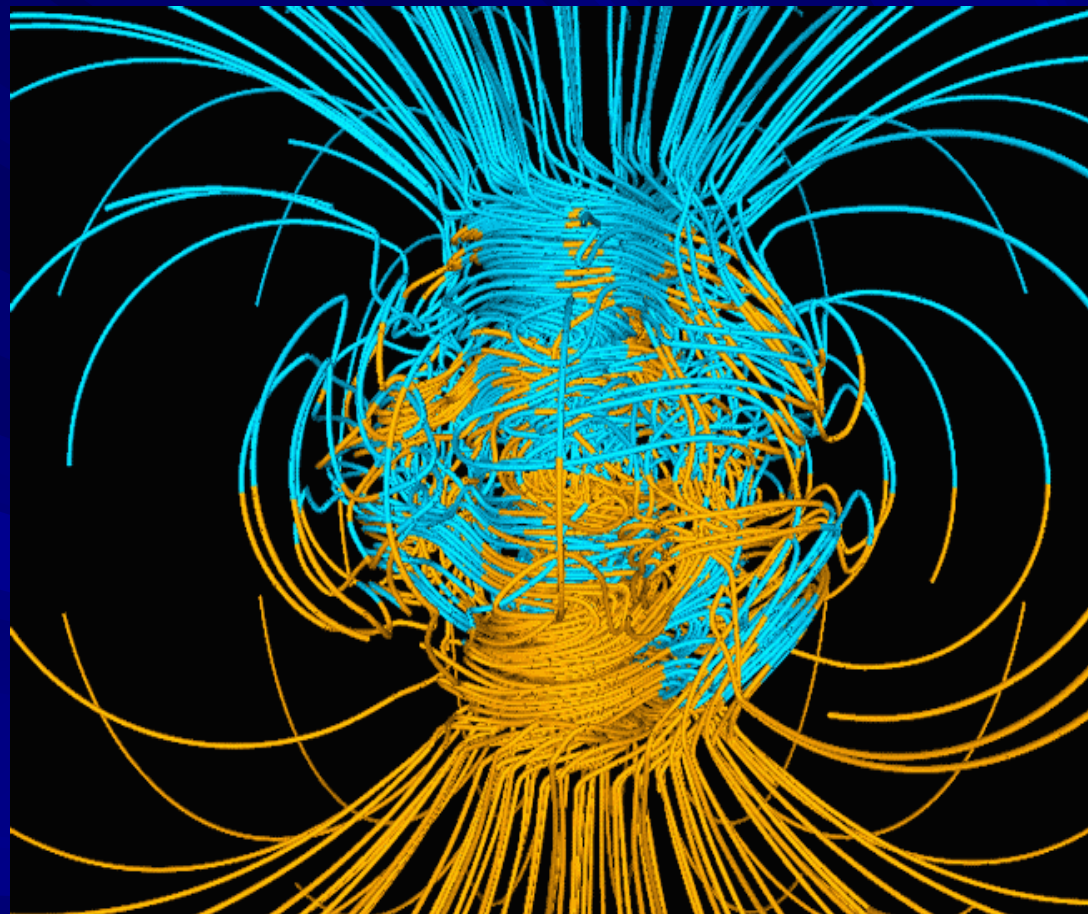
---

Воронина Елена Викторовна

*кафедра физики Земли*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

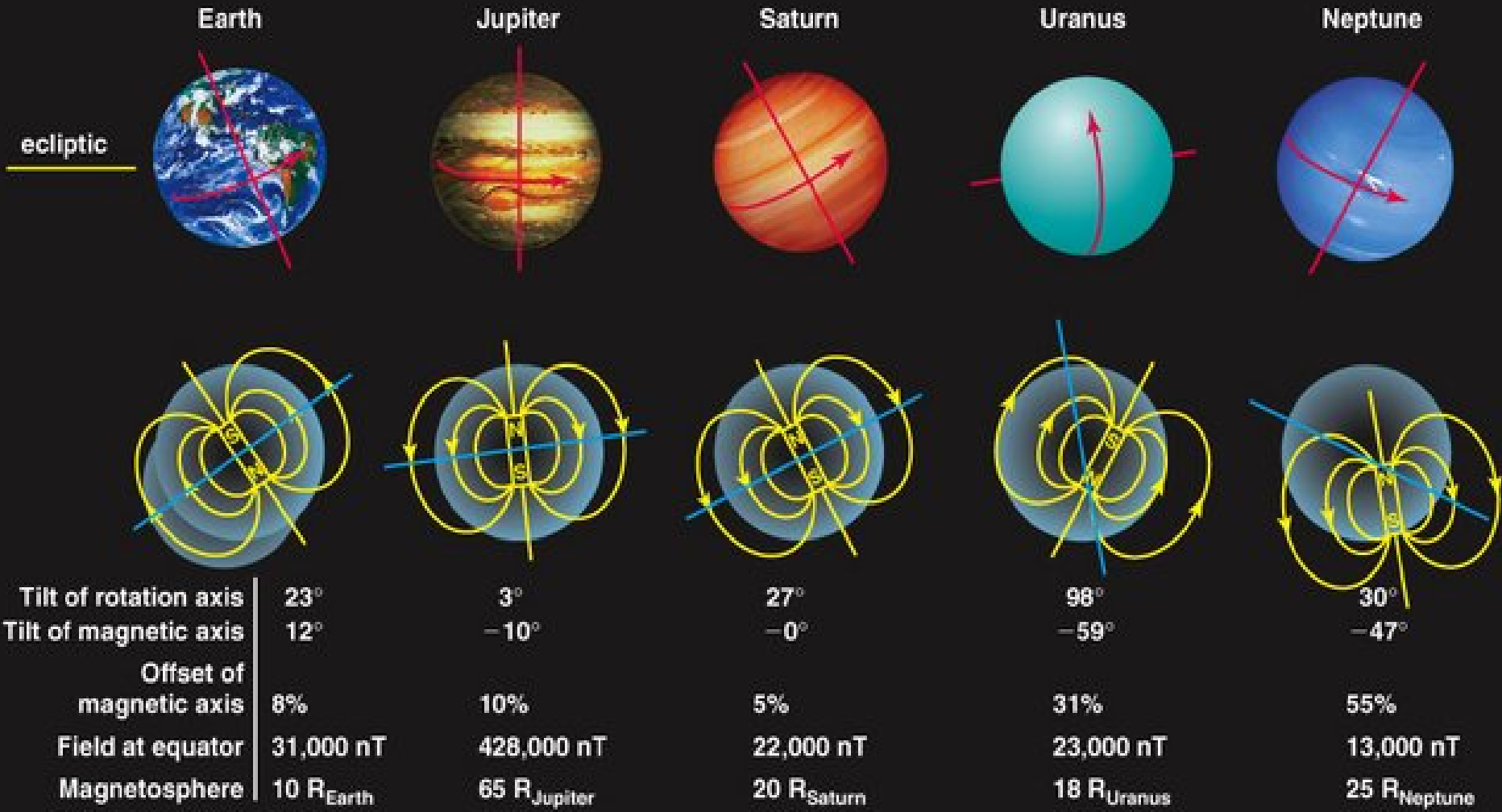
# Магнитное поле Земли.



# Рассматриваемые вопросы:

- Магнитосфера. Составляющие магнитного поля Земли. Главное магнитное поле.
- Элементы геомагнитного поля. Геомагнитный потенциал и коэффициенты Гаусса. Движение магнитных полюсов.
- Аномальное поле: западный дрейф, линейчатые структуры дна океана, Курская магнитная аномалия.
- Палеомагнетизм. Магнитохронологическая шкала. Инверсии. Полярные сияния.

# Магнитное поле Земли и планет Солнечной системы

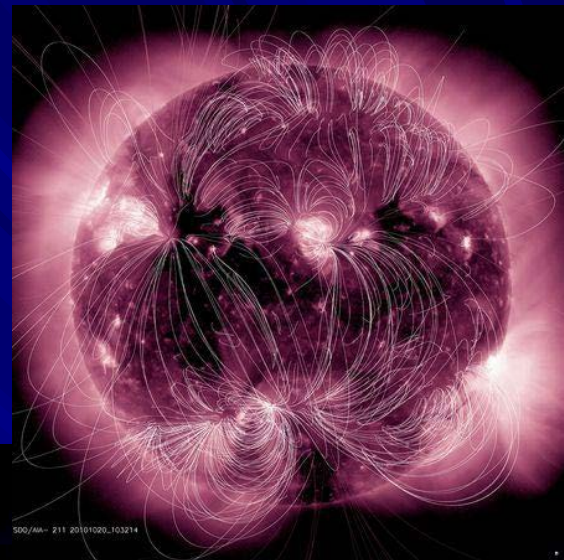


# Составляющие магнитного поля Земли.

- Главное магнитное поле с источником в области ядра Земли -95%
- Аномальное магнитное поле с источниками в области земной коры -4%
- Электромагнитное поле с источниками в околоземном пространстве -1%

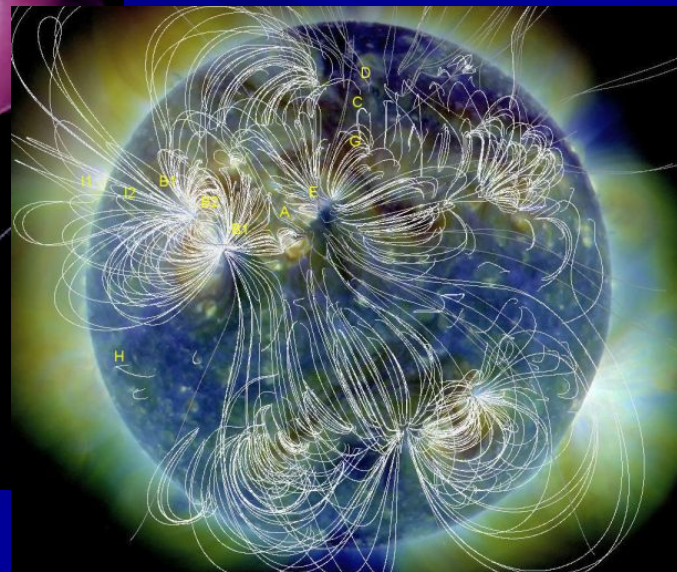
Характерной особенностью магнитного поля Земли является его изменчивость во времени и пространстве, которая называется вариациями магнитного поля.

# Магнитное поле Солнца: инверсии через 11 лет.



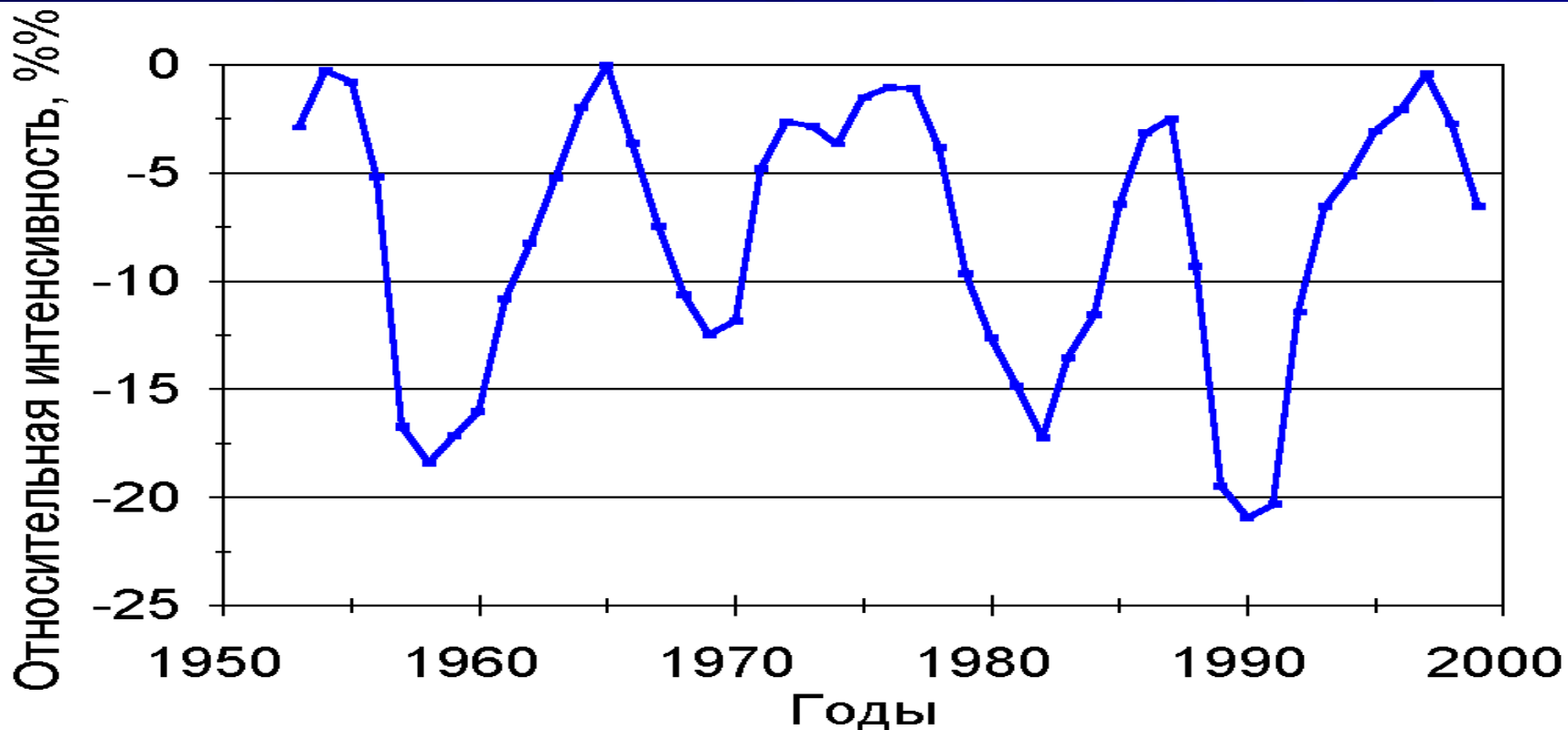
500/АА- 211 20101020\_103214

*Солнечные пятна-  
области очень  
сильного  
магнитного поля*

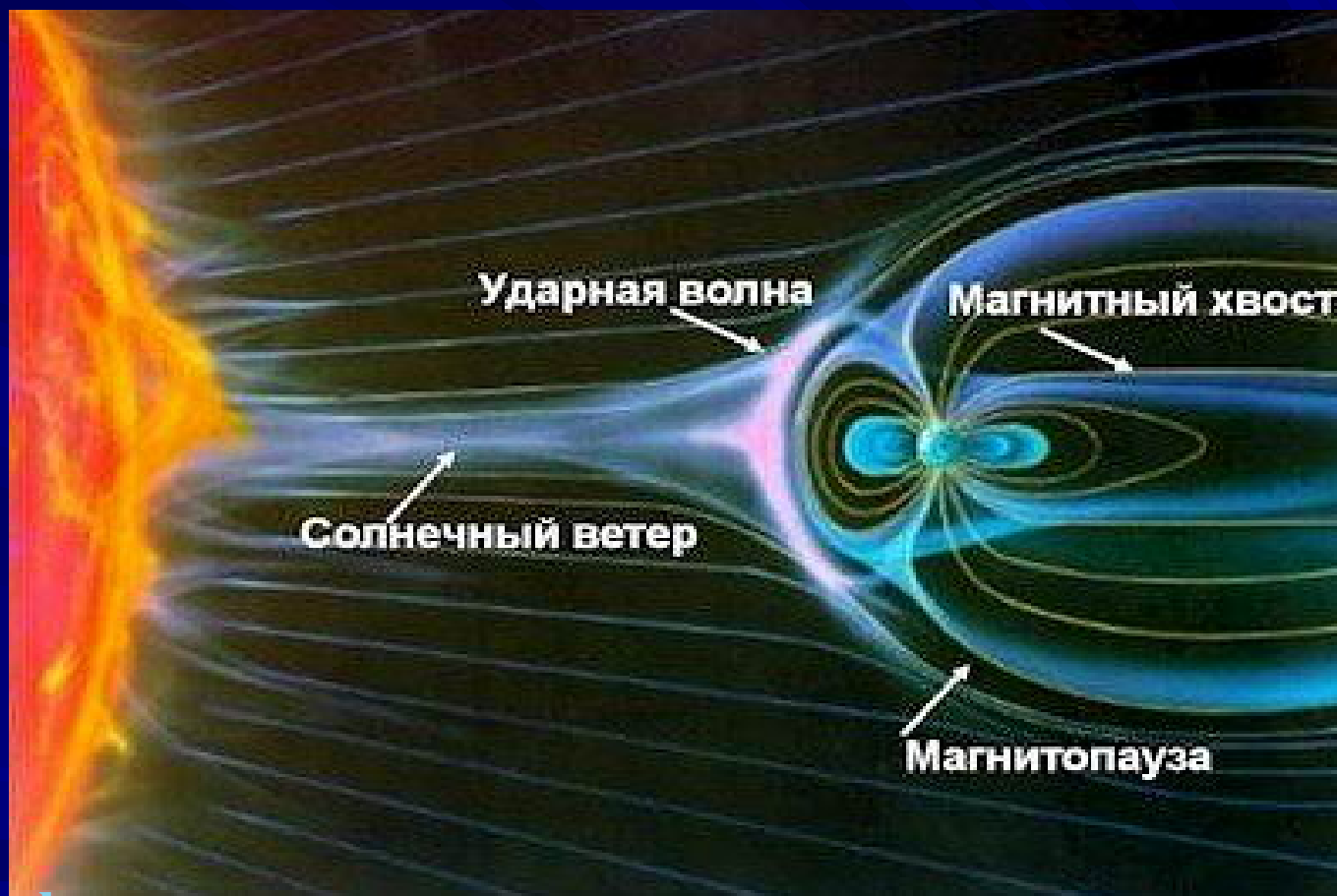




# Интенсивность космического излучения

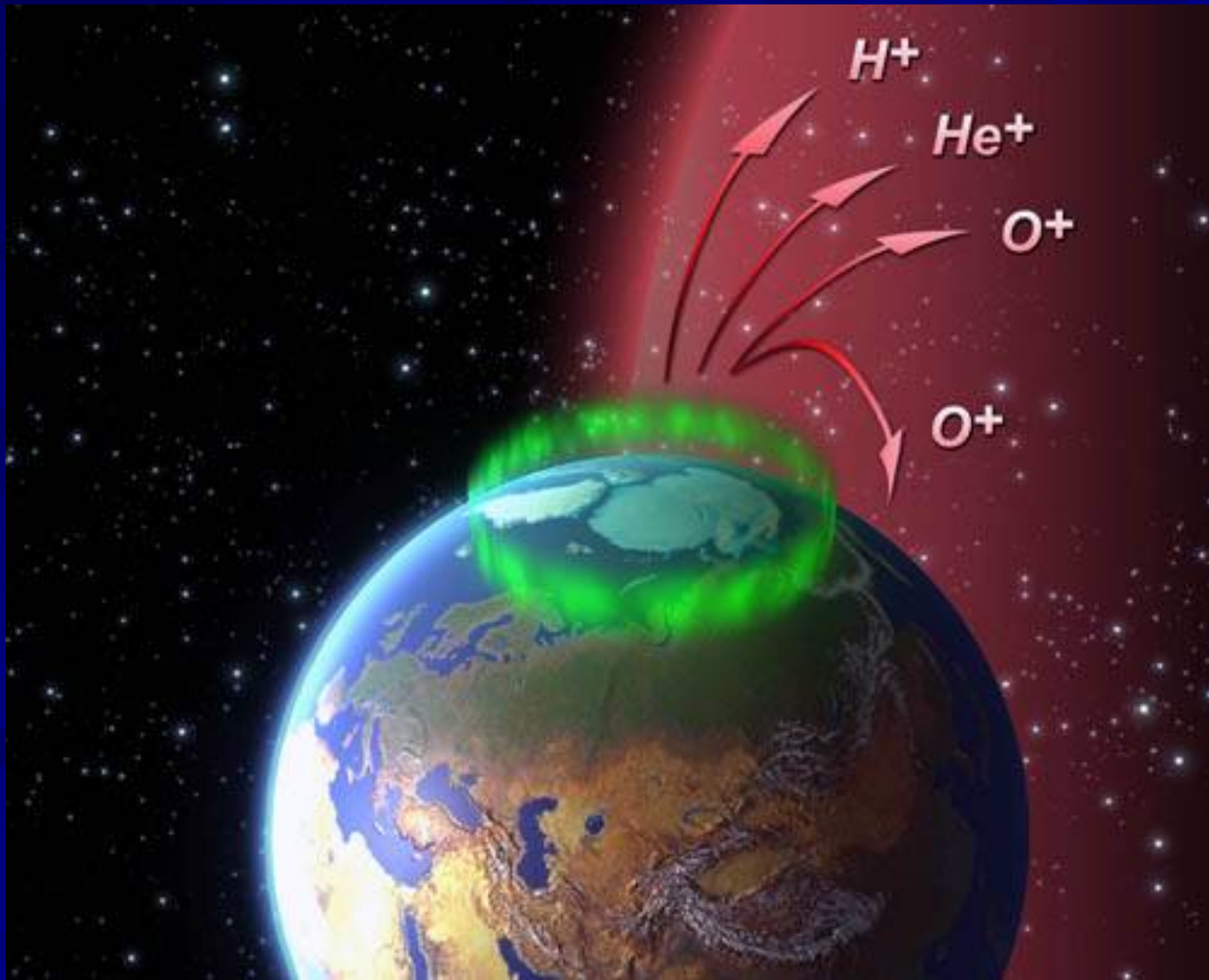


Электромагнитное поле возникает за счет обтекания магнитосферы Земли солнечным ветром.

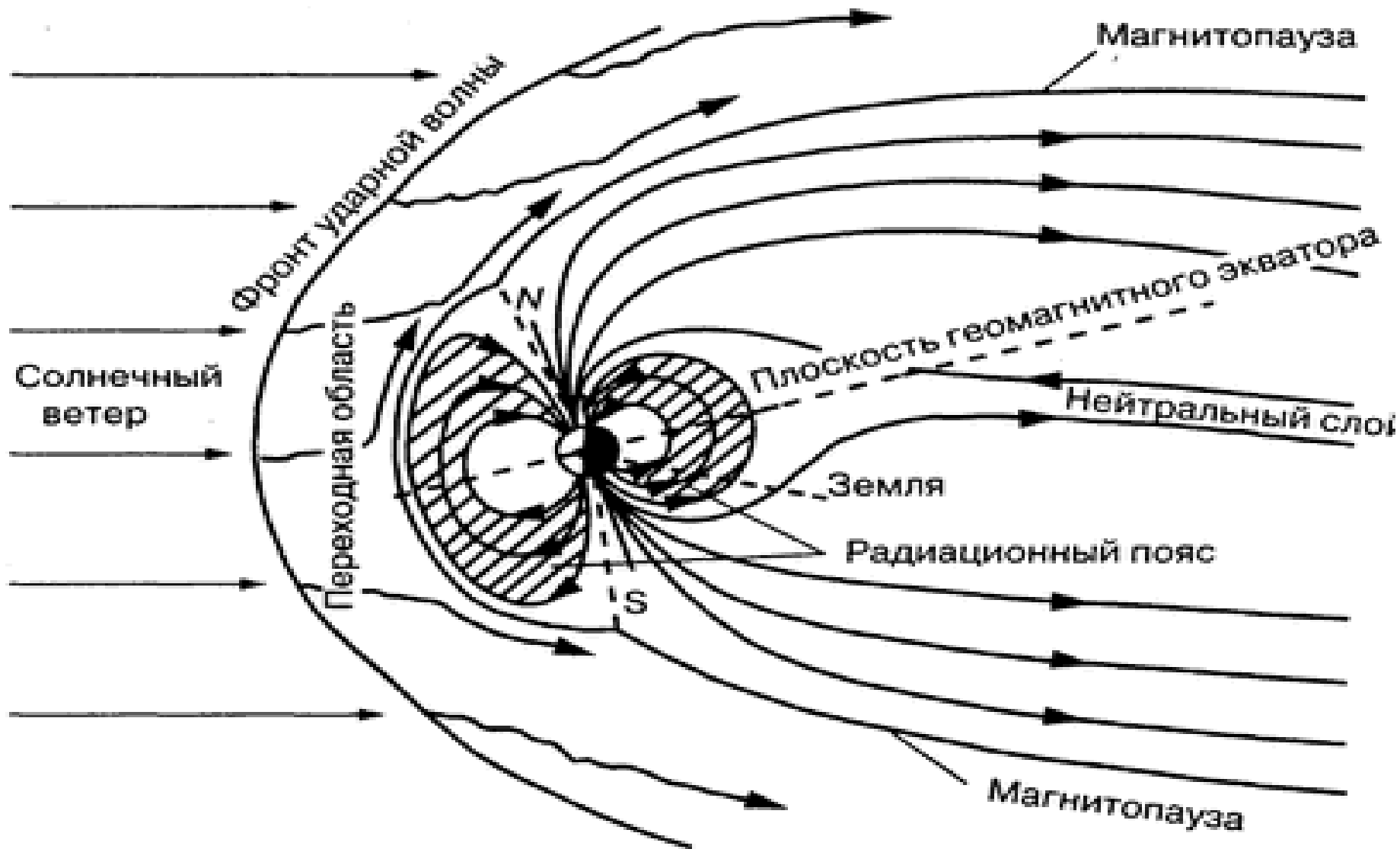


**Магнитосфера** — область пространства вокруг планеты, которая образуется, когда поток заряженных частиц, например солнечного ветра, отклоняется от своей первоначальной траектории под воздействием внутреннего магнитного поля планеты. Размер магнитосферы 10-12 радиусов Земли.

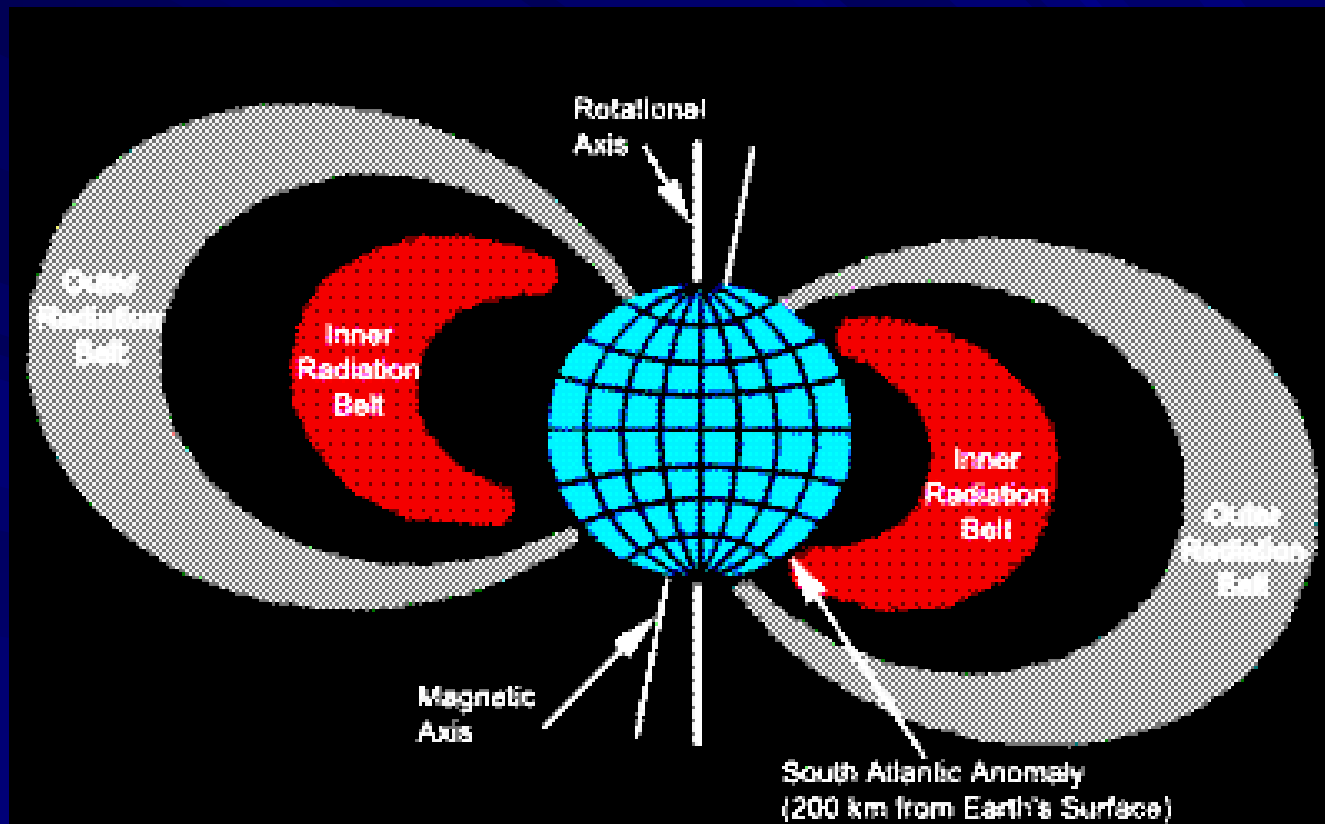
# Солнечный ветер вытягивает газы из атмосферы планеты



# Структура электромагнитного поля

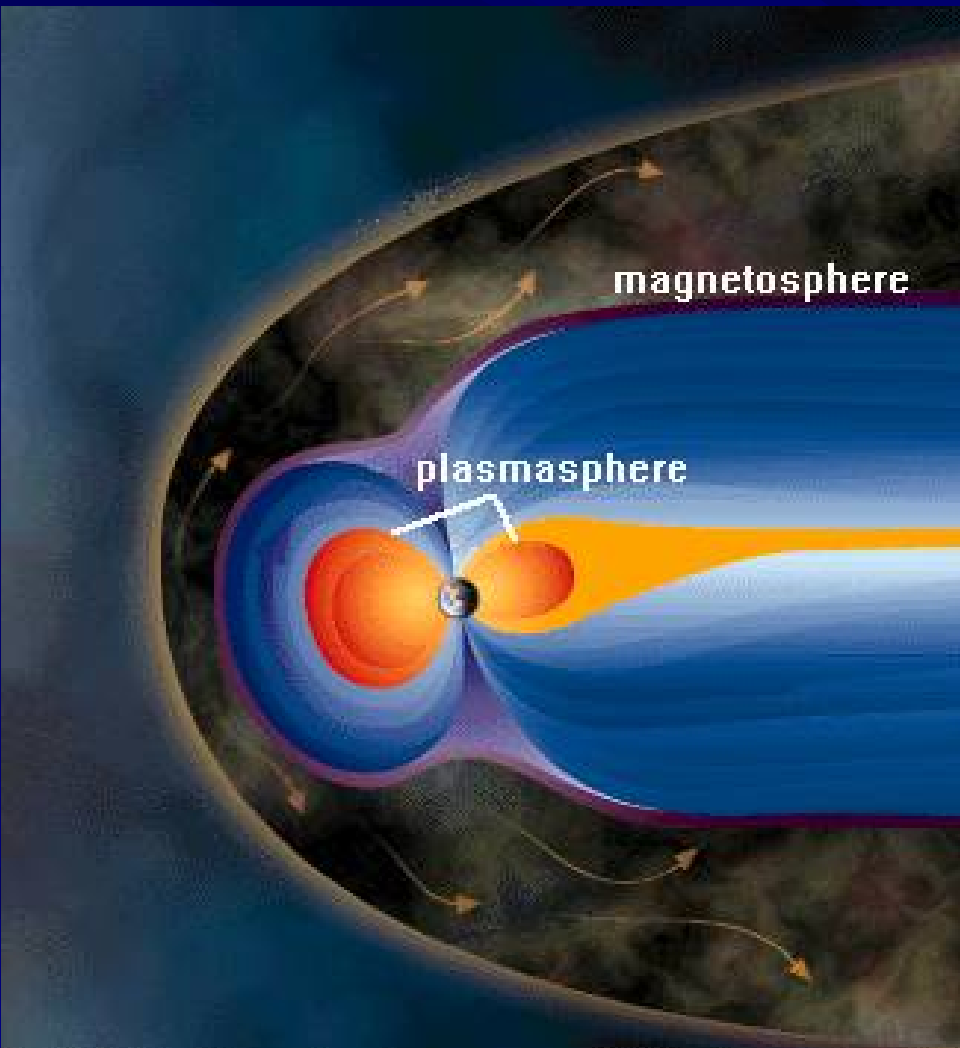


# Радиационные пояса Земли



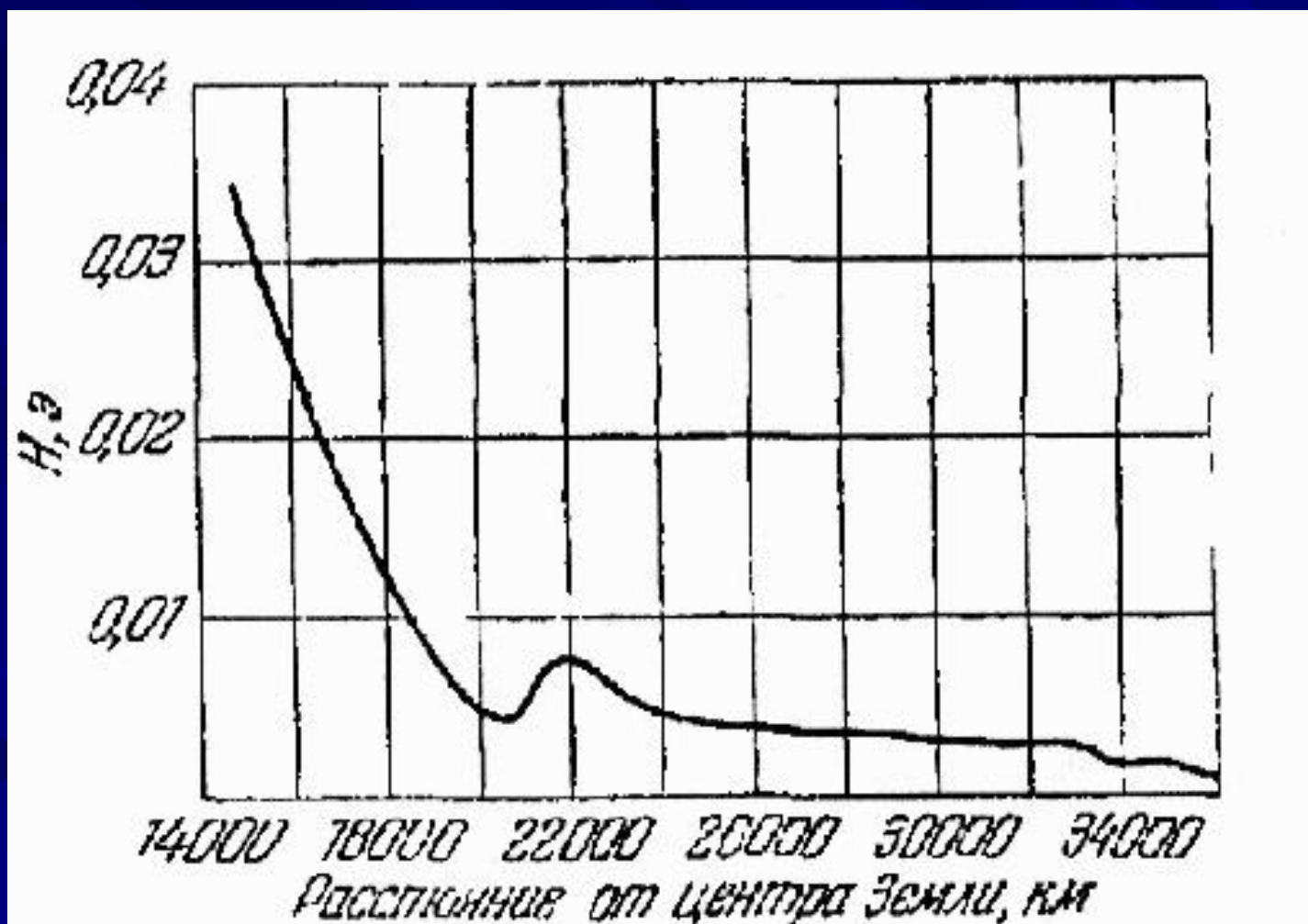
**Радиационный пояс** — область магнитосфер планет, в которой накапливаются и удерживаются проникшие в магнитосферу высокоэнергичные заряженные частицы (в основном протоны и электроны).

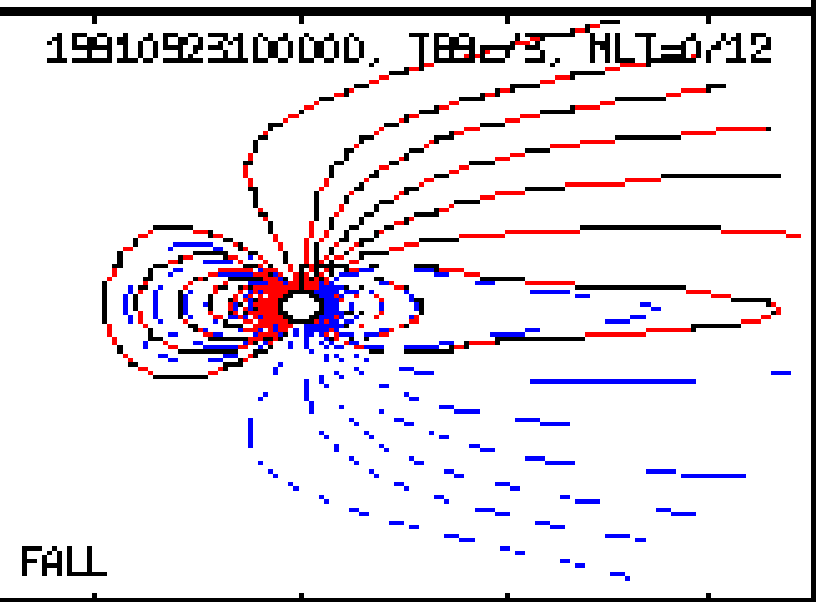
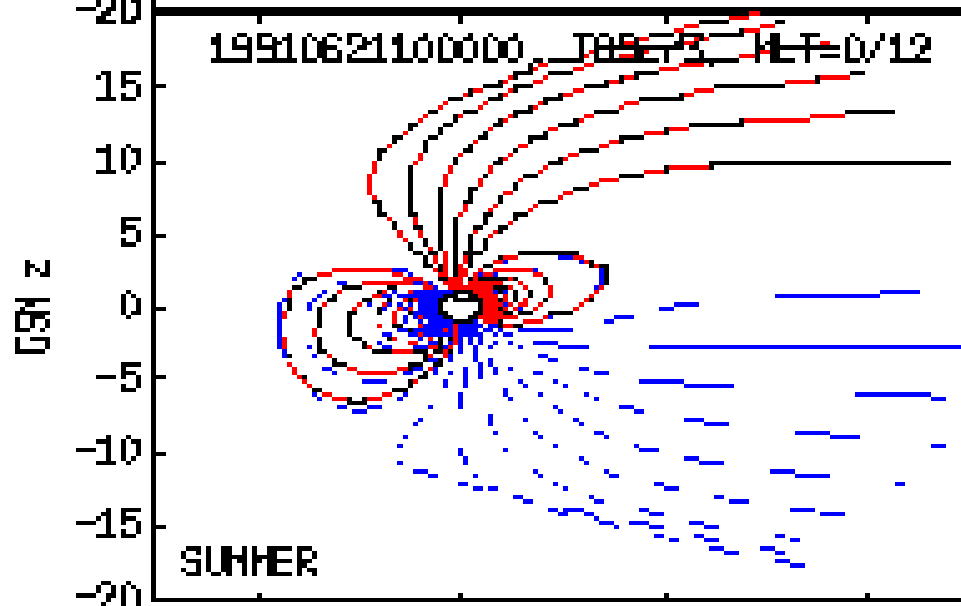
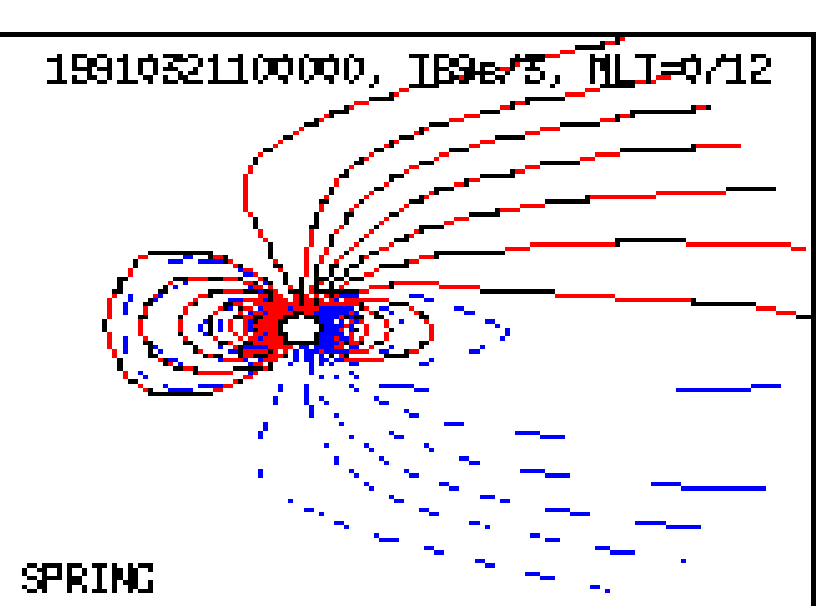
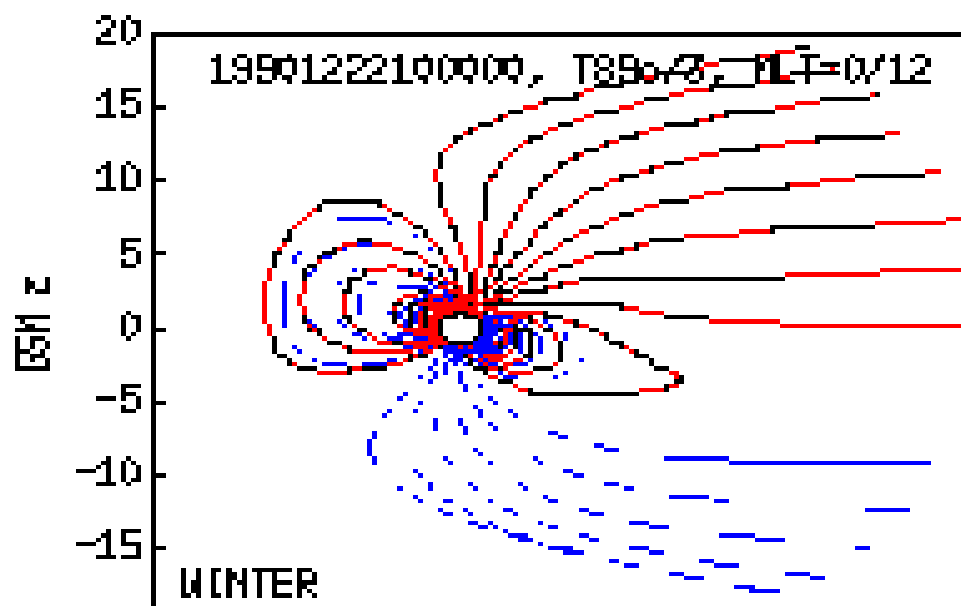
# Магнитосфера Земли.



- **Геомагнитное поле** — магнитное поле Земли, генерируется внутри земными источниками
- На небольшом удалении от поверхности Земли, магнитные силовые линии имеют диполеподобное расположение. Эта область называется *плазмосферой* Земли.
- По мере удаления от поверхности Земли усиливается воздействие солнечного ветра: со стороны Солнца геомагнитное поле сжимается, а с противоположной, - оно вытягивается в длинный хвост.

# Напряженность магнитного поля на больших расстояниях от Земли.



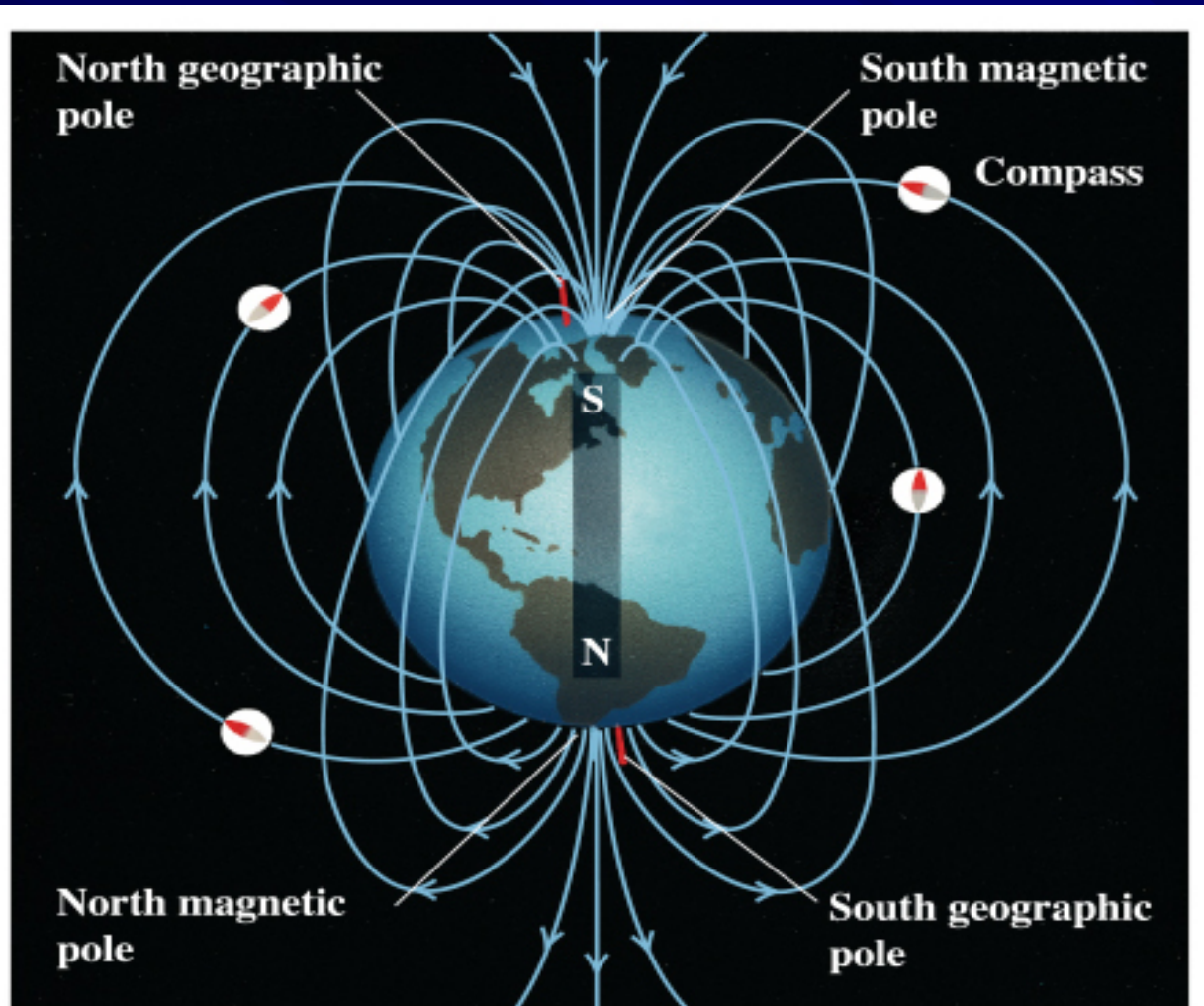


10 0 -10 -20 GSM x

10 0 -10 -20 GSM x



# Главное магнитное поле представляет собой магнитный диполь



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

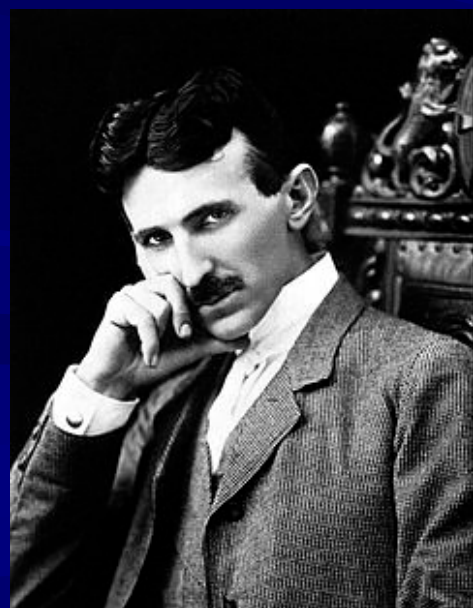
- Северный магнитный полюс находится в южном полушарии
- Возникновение магнитного поля Земли связано с турбулентным движением токов в жидком ядре.
- Механизм «магнитное динамо», действует на расстоянии 2-3 радиуса Земли.

# Характеристики магнитного диполя.



- Прямая, проходящая через магнитные полюсы, называется магнитной осью Земли. Она наклонена под углом  $11,5^\circ$  относительно географической оси Земли.
- Окружность большого круга в плоскости, которая перпендикулярна к магнитной оси, называется магнитным экватором.
- Центр магнитного диполя смещен относительно центра Земли, поэтому он называется – эксцентрическим диполем.
- Магнитный полюс прецессирует относительно географического с периодом  $\sim 1200$  лет

# Элементы геомагнитного поля.



Силовые:

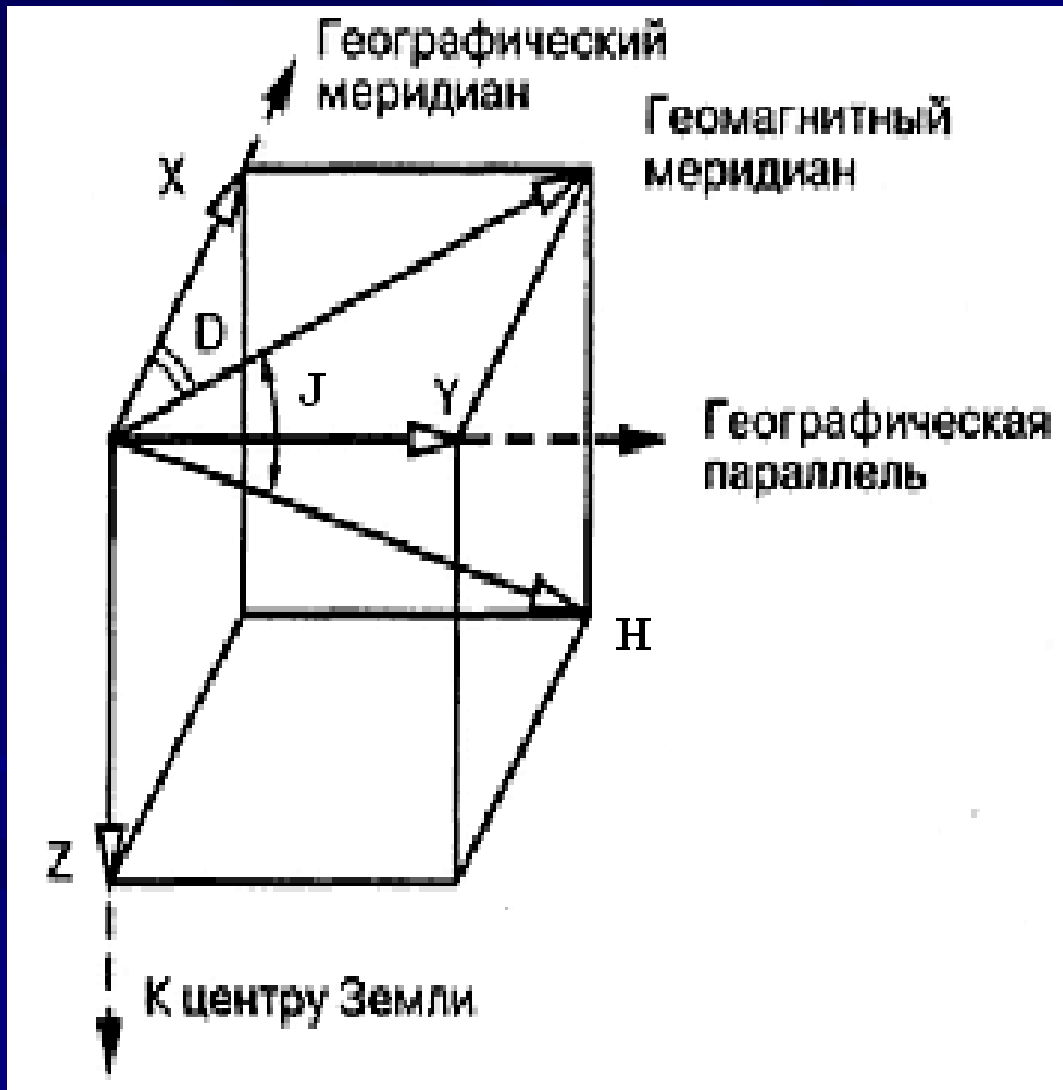
Изолинии - изодины

1. Напряженность –  $H$  (А/м),
2. Магнитная индукция –  $B$  (тесла),
3. Намагниченность –  $I$  (А/м),
4. Магнитный момент –  $M$  (А\*м<sup>2</sup>) и др.

$$1 \text{ эрстед} = 79,6 \text{ А/м};$$

$$1 \text{ тесла} = 1 \text{ кг/А*с}^2$$

# Элементы магнитного поля



## Угловые:

1. Магнитное **склонение** –  $D$  – угол между географическим и магнитным меридианами.

Изолинии равных склонений – **изогоны**.

2. Магнитное **наклонение** –  $J$  – угол между горизонтальной составляющей и направлением силового вектора.

Изолинии равных наклонений – **изоклины**

# Соотношения между элементами геомагнитного поля

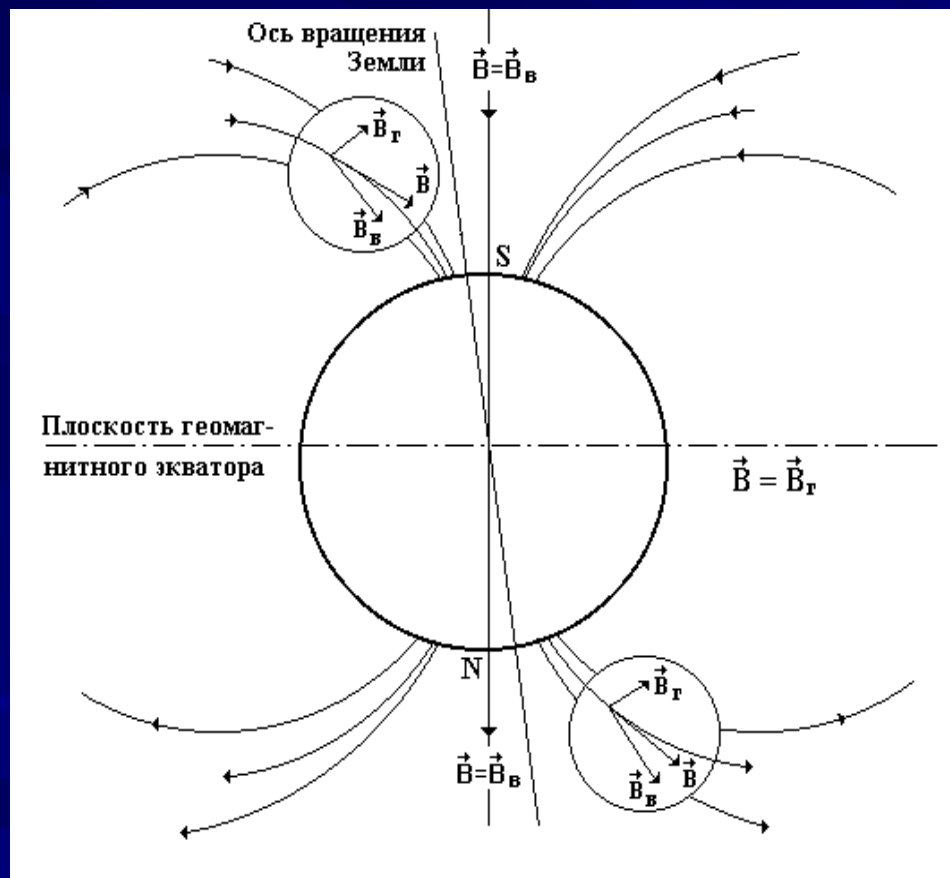
$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} = \frac{H_x}{\cos D \cos J};$$

$$\operatorname{tg} D = \frac{H_y}{H_x};$$

$$\operatorname{tg} J = \frac{H_z}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}$$

Вертикальная составляющая силовой компоненты поля считается положительной, если ее вектор в северном полушарии направлен вниз.

# Экстремальные значения силовых компонент.



**Напряжённость** магнитного поля (сила, действующая на помещенный в поле пробный магнит) на магнитном экваторе около 0,34 э (эрстед), у магнитных полюсов около 0,66 э.

Максимальное значение **вектора магнитной индукции** (импульс напряжения в катушке при включении поля) на полюсе ~65 нТл, при этом  $J=90^\circ$ ; минимальное – на экваторе ~35 нТл при  $J=0$ .

# Скалярный потенциал магнитного поля Земли.

$$U(r, \theta, \lambda, t) = \sum_{n=1}^N \left( \frac{R}{r} \right)^{n+1} \times \sum_{m=0}^n \left[ g_n^m(t) \cos m \lambda + h_n^m(t) \sin m \lambda \right] P_n^m(\cos \theta)$$

Где:  $R = 6371 \text{ км}$  - радиус Земли  
 $r, \theta, \lambda, t$  - сферические координаты и время  
 $g_n^m(t), h_n^m(t)$  - коэффициенты Гаусса  
 $P_n^m(\cos \theta)$  - присоединенные функции Лежандра

Выражение компонент вектора магнитной индукции через значения геопотенциала.

$$B_{\theta} = -\frac{\partial U}{r \partial \theta}$$

$$B_{\lambda} = -\frac{\partial U}{r \sin \theta \partial \lambda}$$

$$B_z = -\frac{\partial U}{\partial r}$$

В декартовой системе координат:

$$B_x = -B_{\theta}$$

$$B_y = B_{\lambda}$$

$$B_z = -B_r$$



# Коэффициенты Гаусса

$$g_1^0 = \frac{M_z}{R^3} \cos \theta_0;$$

$$g_1^1 = \frac{M_x}{R^3} \sin \theta_0 \cos \lambda_0;$$

$$h_1^1 = \frac{M_y}{R^3} \sin \theta_0 \sin \lambda_0$$



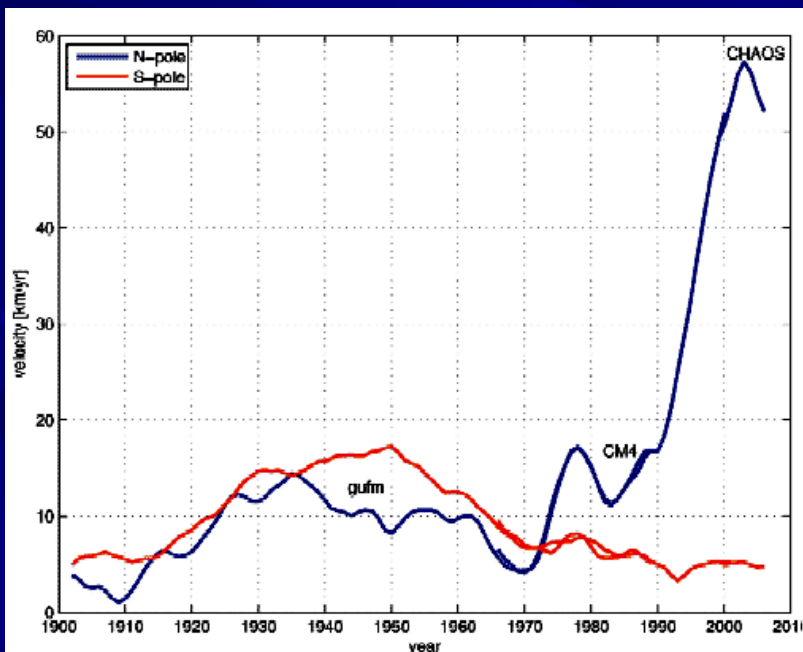
$\theta_0, \lambda_0$  –  
координаты  
магнитного  
полюса

# Смещение магнитных полюсов Земли



За последние 100 лет магнитный полюс в южном полушарии переместился почти на 900 км и вышел в Индийский океан

Новейшие данные по состоянию арктического магнитного полюса (движущегося по направлению к Восточно-Сибирской мировой магнитной аномалии через Ледовитый океан) показали, что скорость дрейфа северного магнитного полюса увеличилась с 10 км/год в 70-х годах, до 60 км/год в 2004-м году.



# Координаты дипольного магнитного полюса

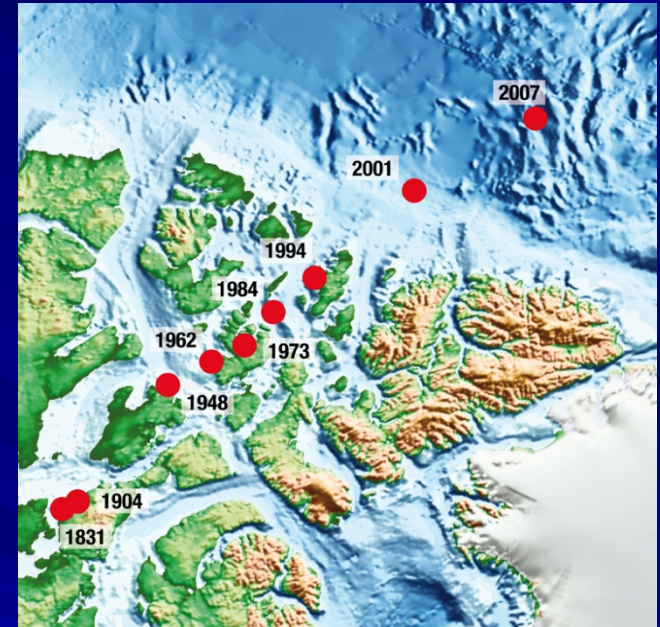
$$\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}{(g_1^0)} ;$$

$$\operatorname{tg} \lambda_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1} ;$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \theta_0$$

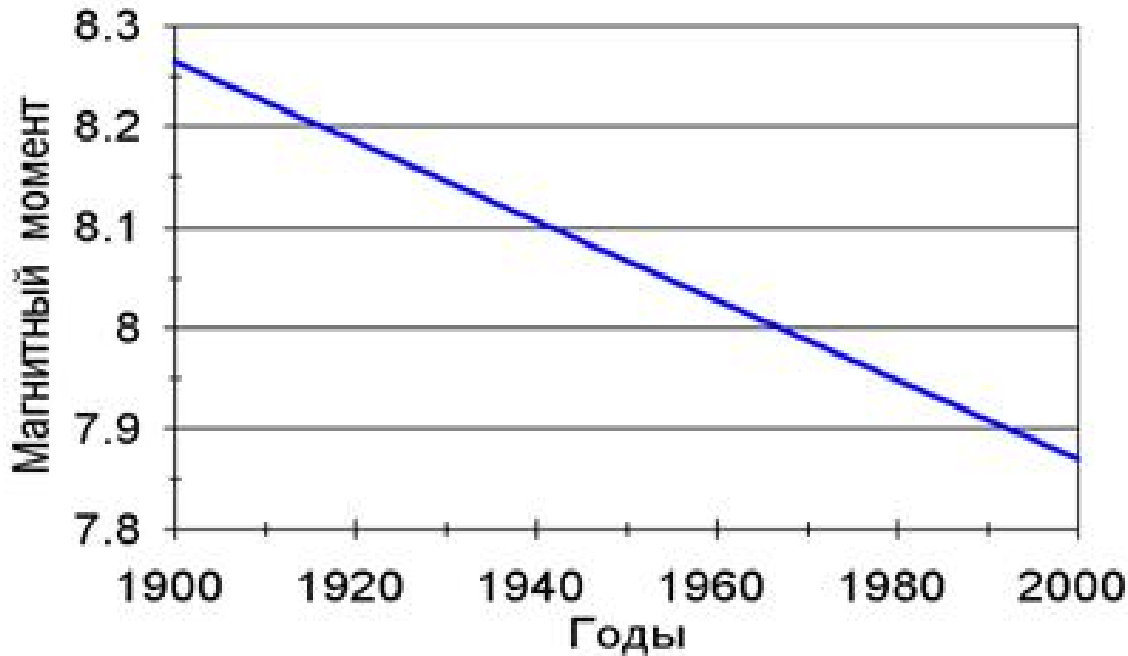
$$\varphi_0 = 78,5^\circ \text{с.ш.}$$

$$\lambda_0 = 70^\circ \text{з.д.}$$



# Магнитный момент

$$M = R^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}$$



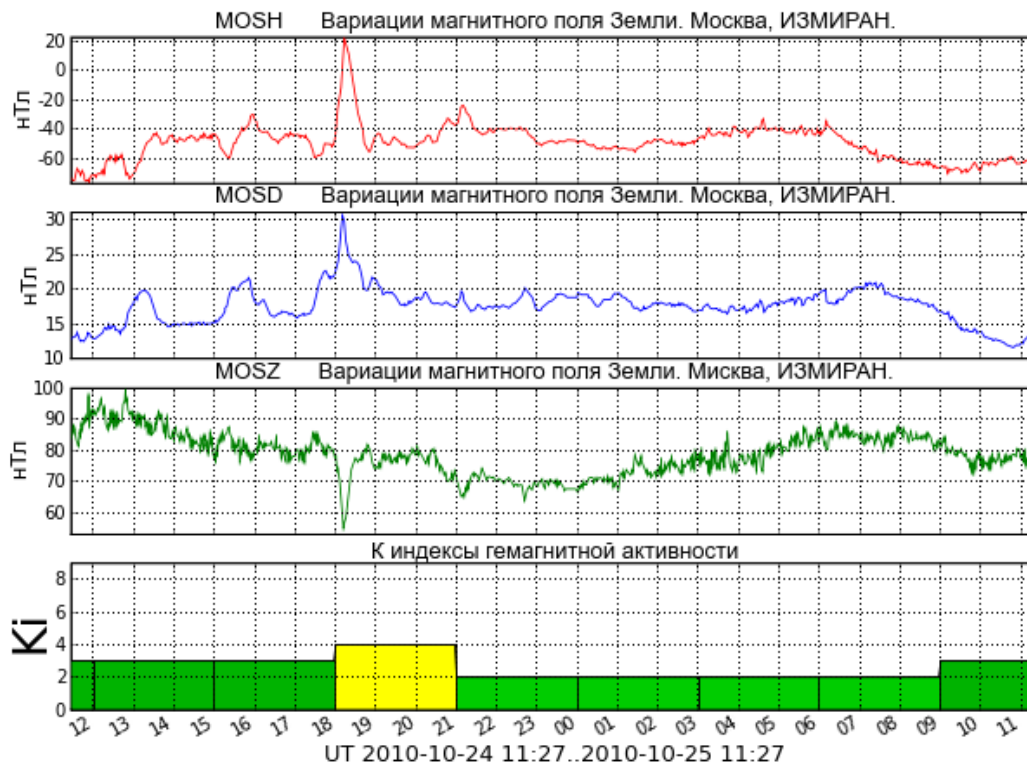
$$g_1^0 = -3034 \text{ нТл}$$

$$g_1^1 = -2123 \text{ нТл}$$

$$h_1^1 = 5758 \text{ нТл}$$

$$M = 7,79 \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$$

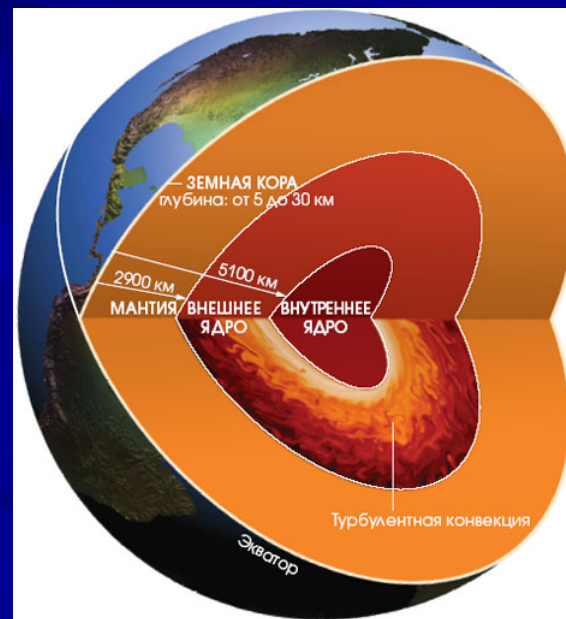
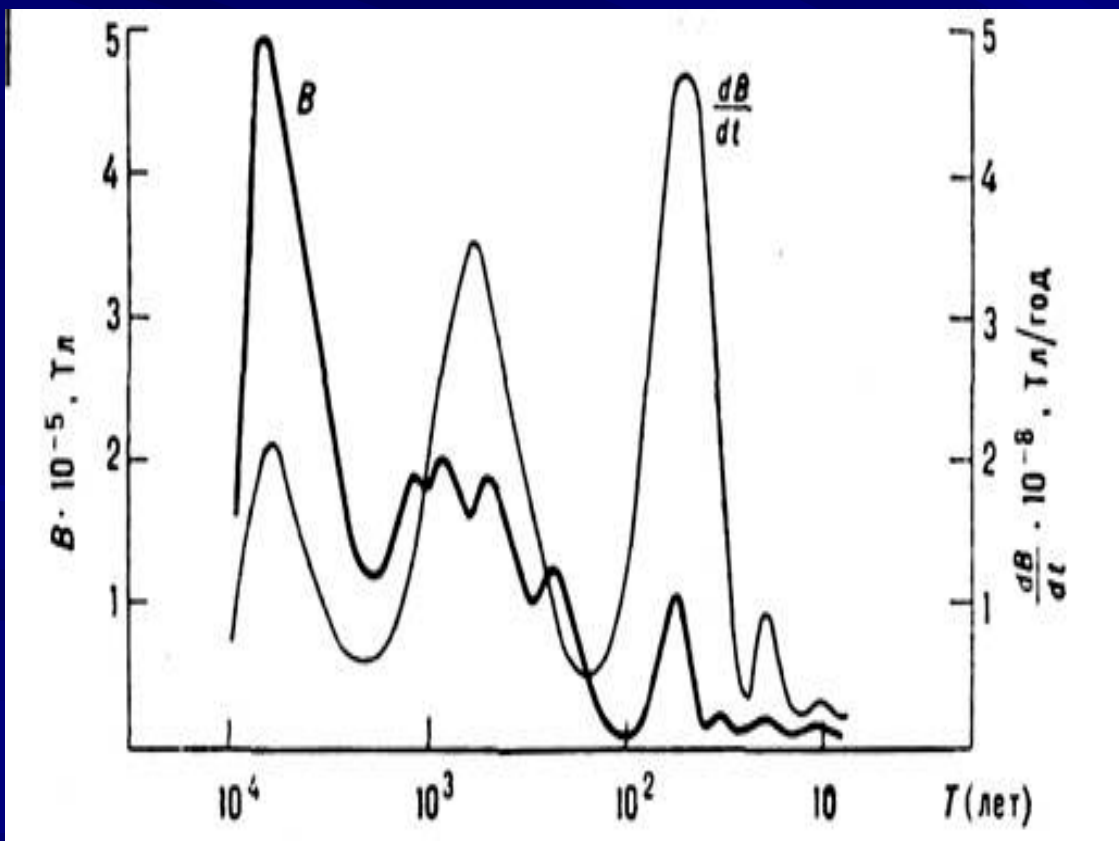
# Регистрация вариаций геомагнитного поля



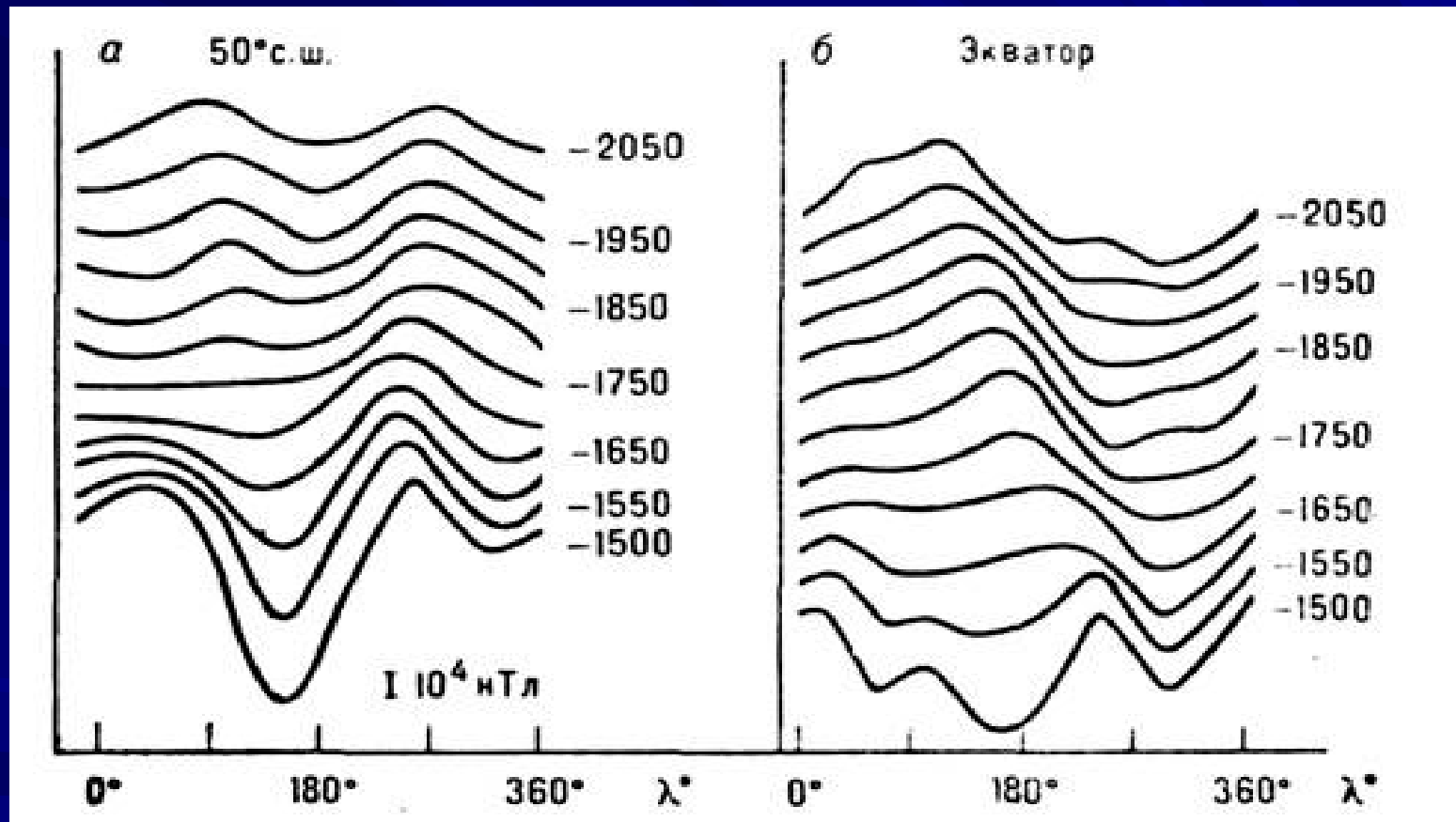
# Вековые вариации связаны с процессами во внешнем ядре Земли.

Периоды от 10 до 10 000 лет.  
Максимумы: 7000 лет, 600 лет, 60 лет

Расплавленное внешнее ядро, где сложная турбулентная конвекция генерирует геомагнитное поле.

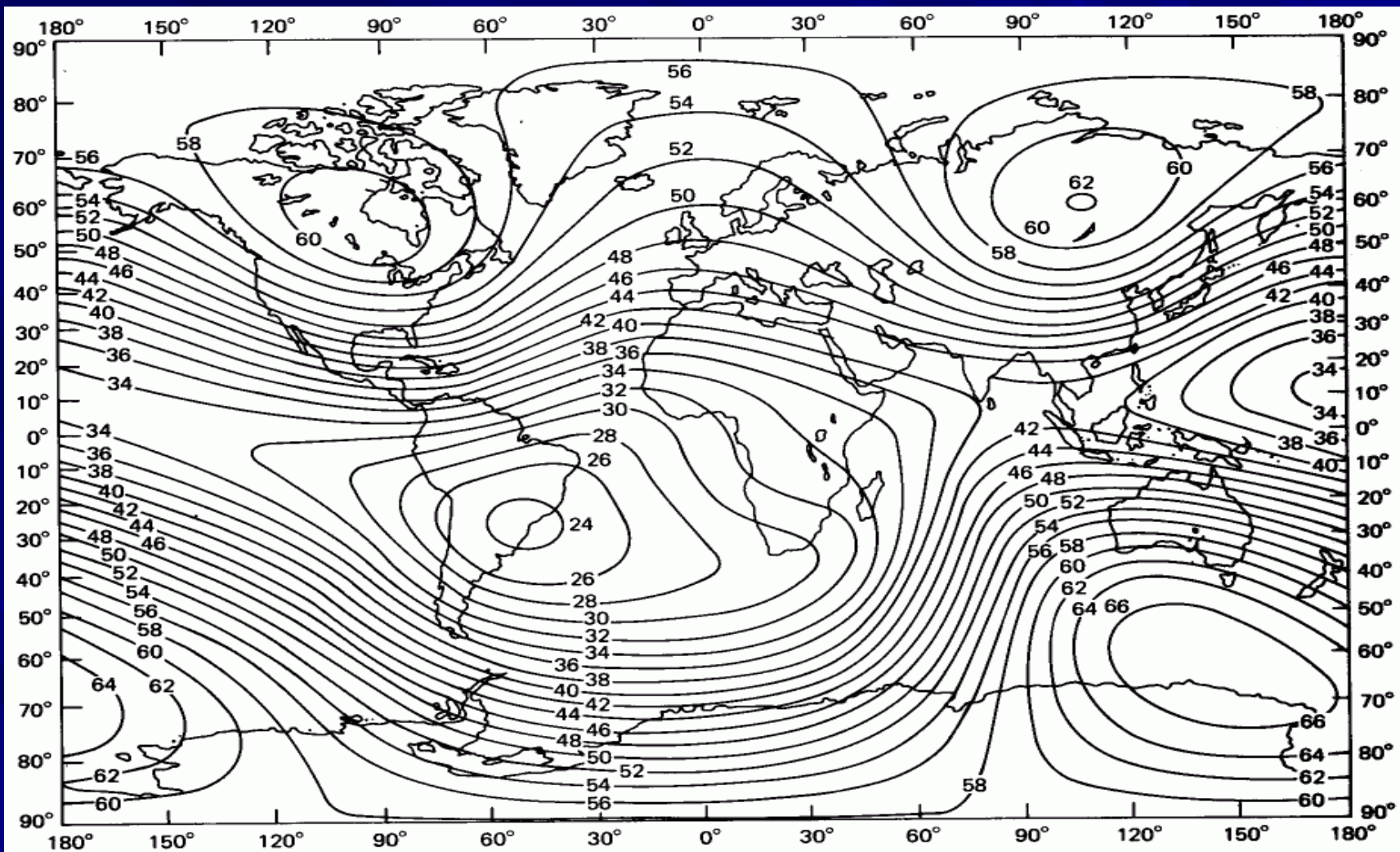


# Западный дрейф вертикальной составляющей в экваториальных широтах.



Недипольная составляющая поля дрейфует к западу со скоростью 22 км/год (с периодом 1800 лет).

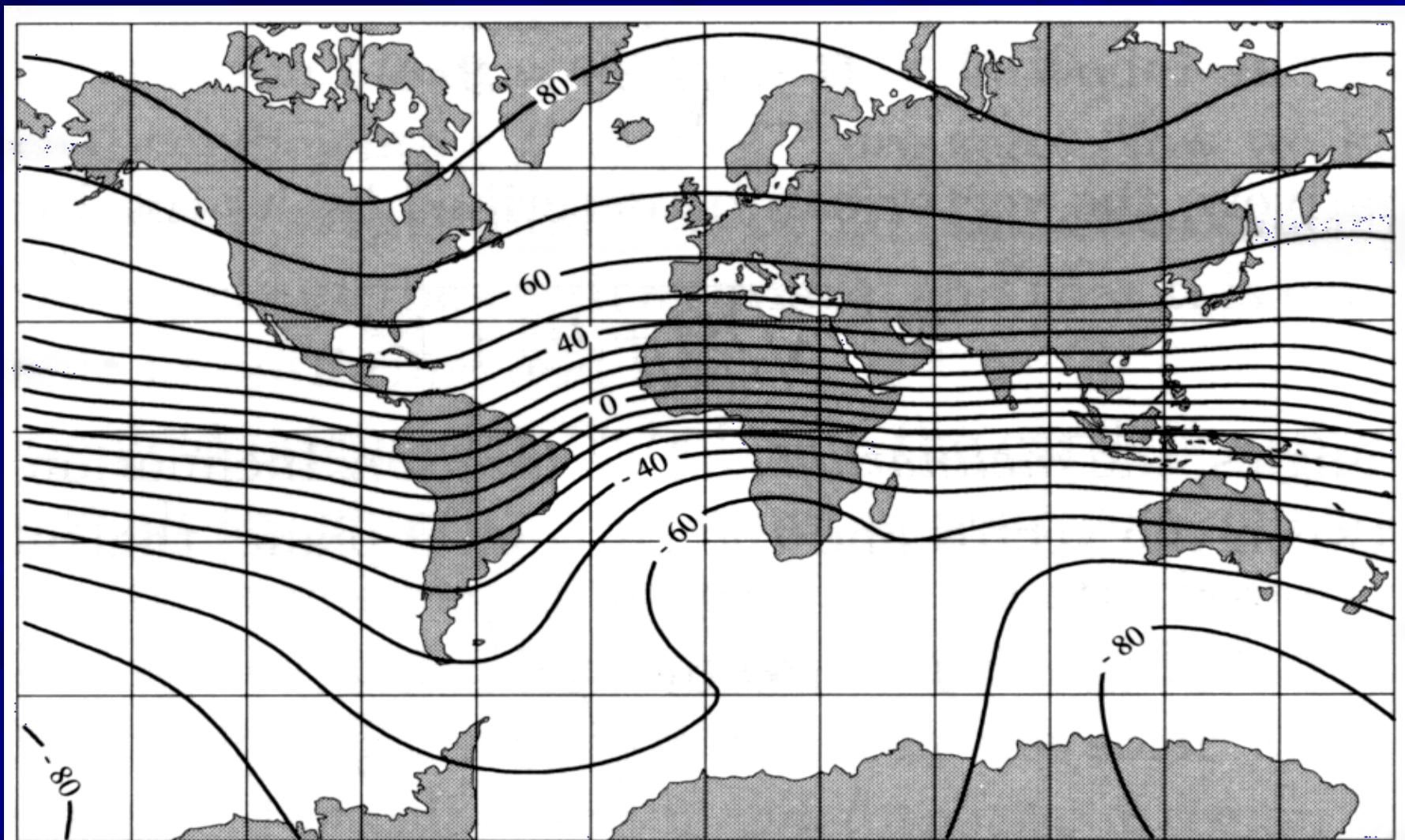
# Современное поле вектора магнитной индукции.



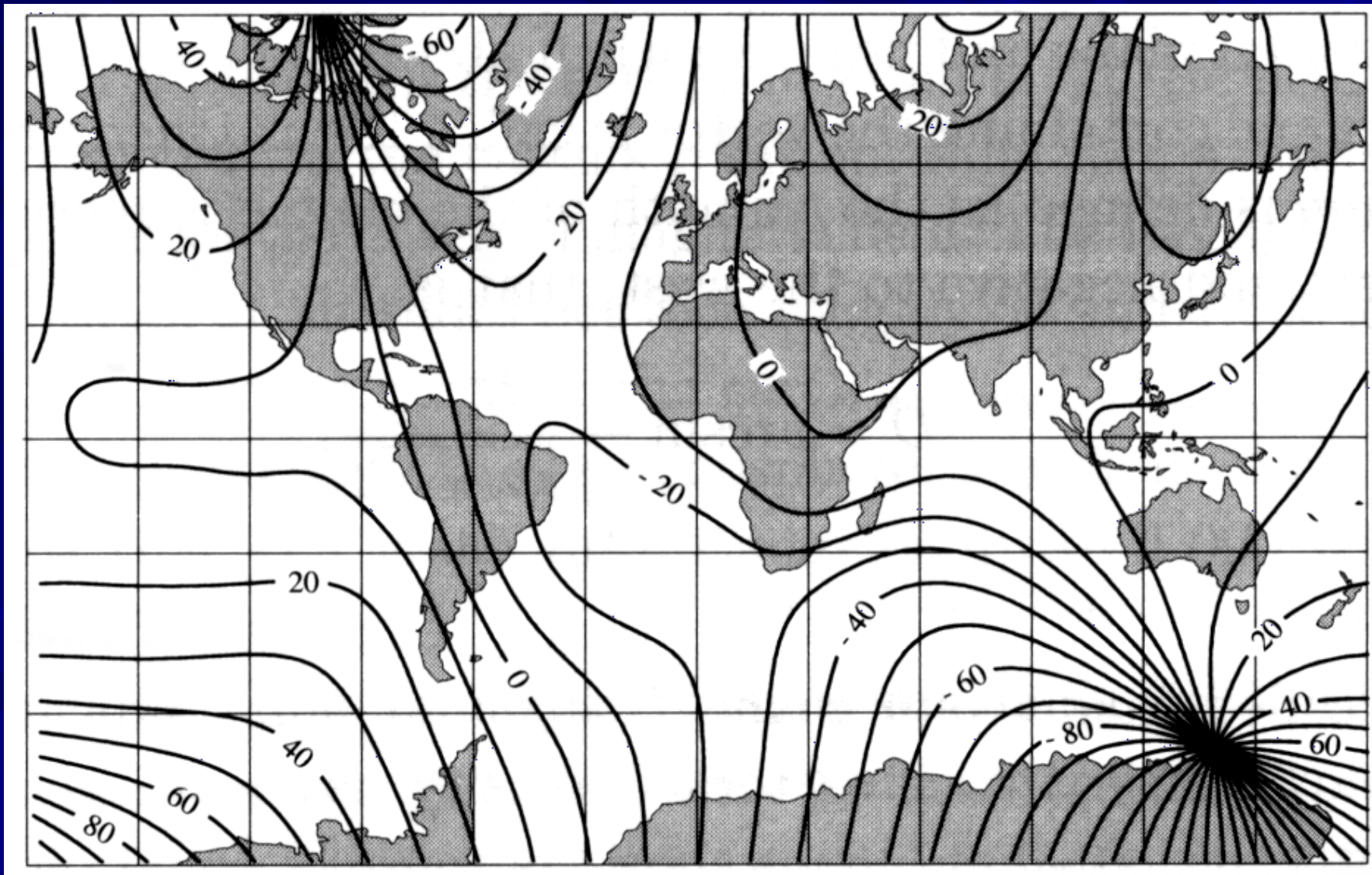
**Figure 1-18** Present-day magnetic field of the earth. (a) Magnitude,  $\mu\text{T}$ .



# Изоклины (наклонение) магнитного поля.

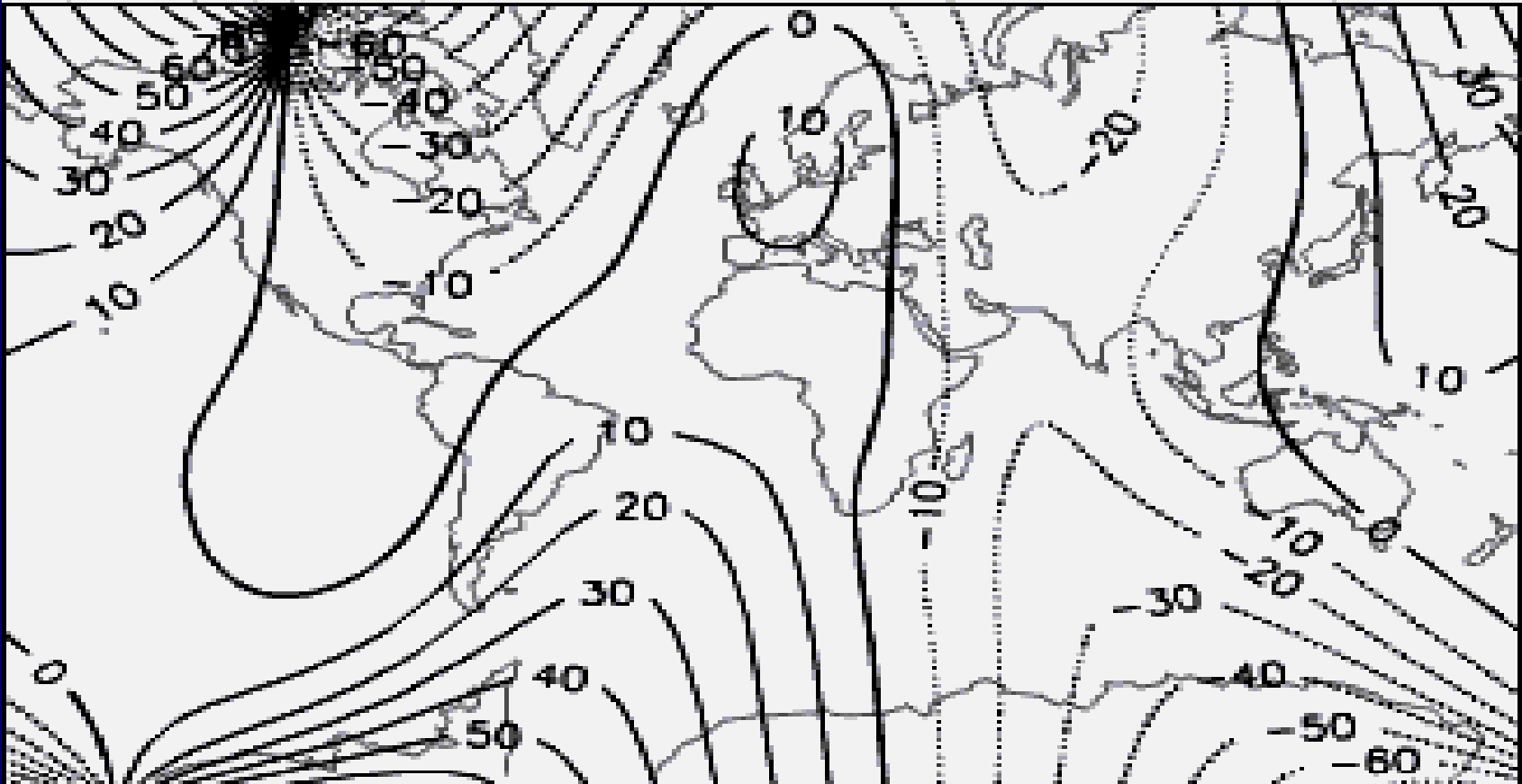


# Изогоны (склонение) магнитного поля.



1590

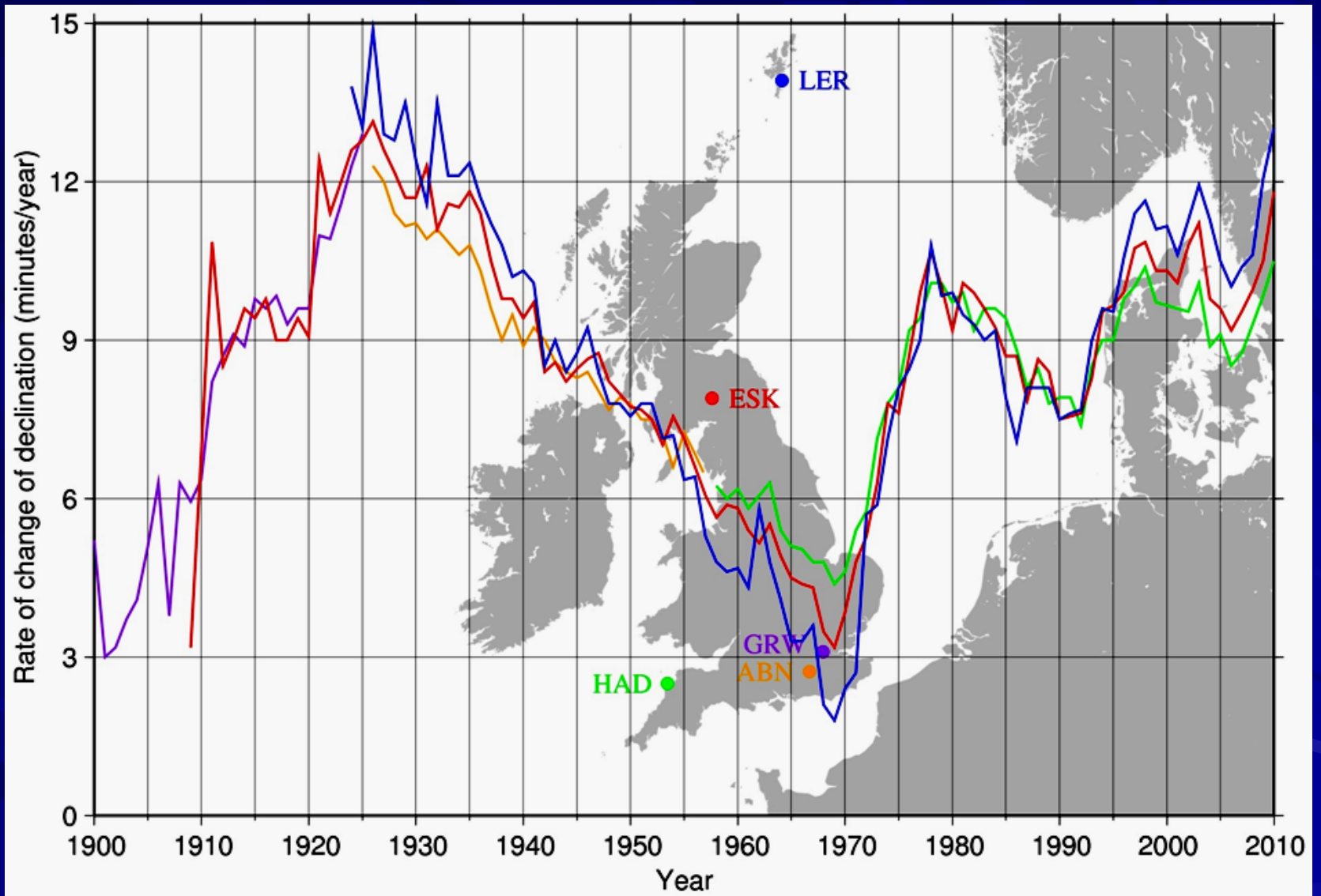
Declination (degrees east)



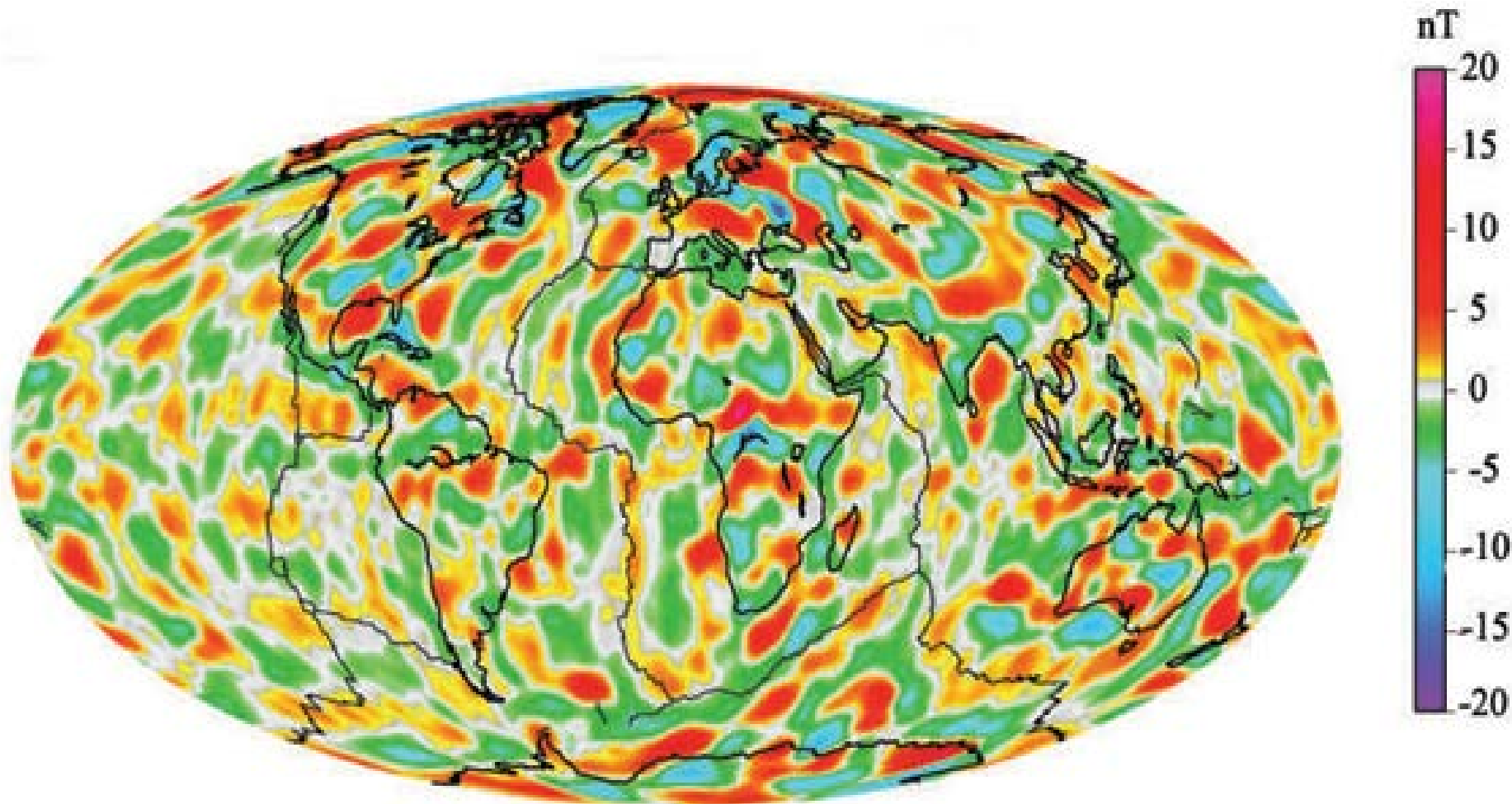
<http://geomag.usgs.gov>

Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,  
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957-990.

# Скорость изменения магнитного склонения



# Литосферные магнитные аномалии

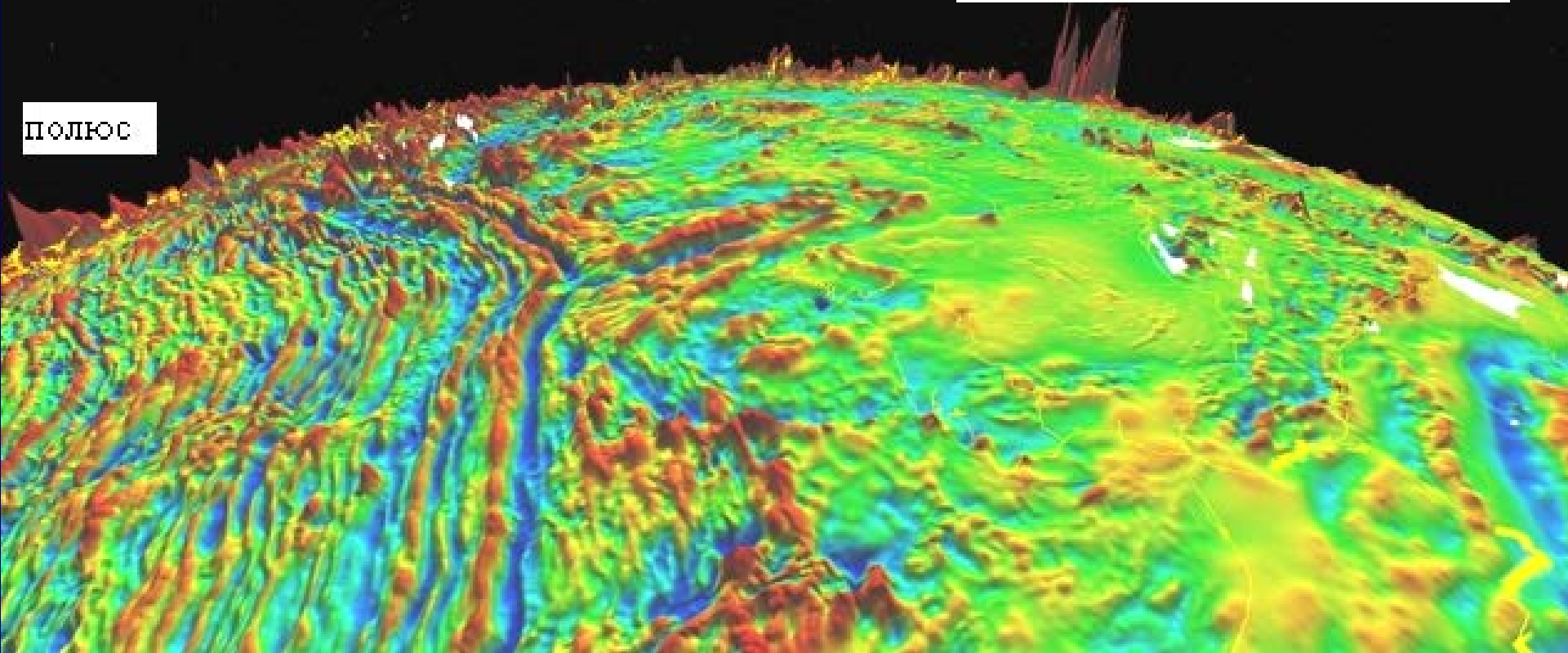


Аномальная составляющая магнитного поля Земли несет информацию о строении верхних оболочек Земли.

# Аномалии магнитного поля северной Атлантики и Европы (вид со стороны Испании).

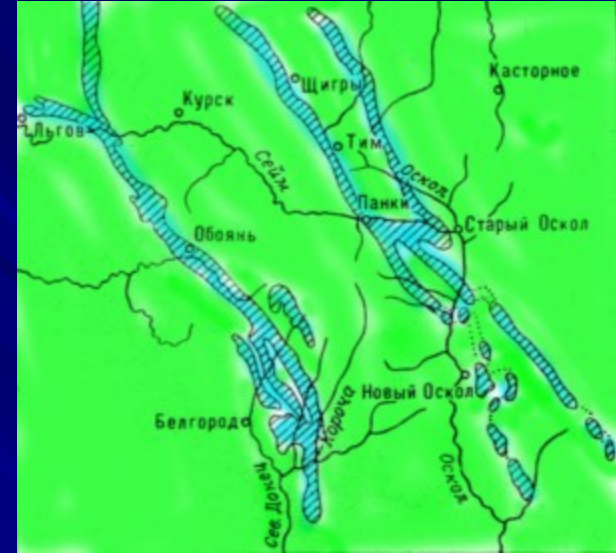
Курская магнитная аномалия

ПОЛЮС



# Курская магнитная аномалия.

Напряженность аномального магнитного поля Курской магнитной аномалии в два-три раза превышает напряженность магнитного поля Земли.



2010

**Михайловский рудник**

г. Железногорск, Курская область

RU  
TOWNS  
.RU

# Палеомагнетизм.

**Палеомагнетизм**, свойство горных пород намагничиваться в период своего формирования под действием магнитного поля Земли и сохранять приобретённую остаточную намагниченность в последующие эпохи.

$$I = \chi \mu_0 H + I_n;$$

$$\mu_0 = 1,25 \times 10^{-6} \frac{В \cdot с}{А \cdot м}$$

Магнитная постоянная

$\chi \mu_0 H$  -индуктивная намагниченность,  
всегда направлена по современному полю

$I_n$  -естественная остаточная намагниченность,  
возникла в момент образования пород и  
отражает направление древнего поля

$$I_n \geq \chi \mu_0 H$$

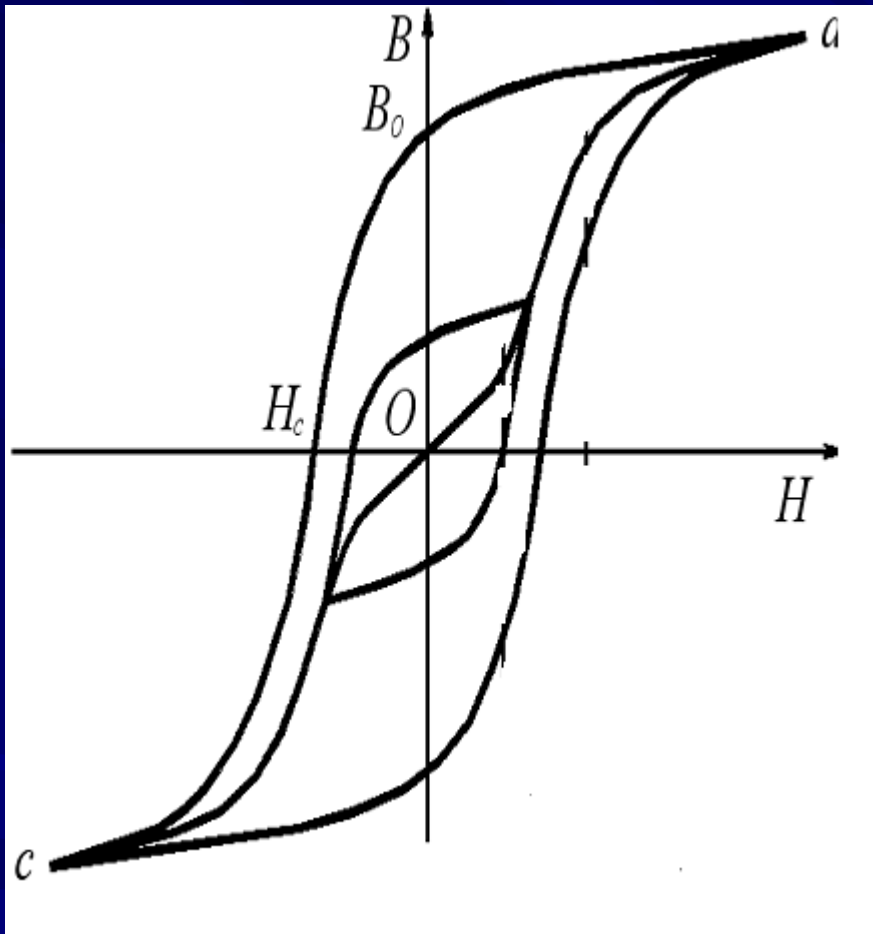
$\chi$  - магнитная восприимчивость ферромагнетика



# Типы намагничивания горных пород.

- **Термоостаточная** намагниченность образуется при охлаждении ферромагнитных минералов до температур ниже точки Кюри. Основная составляющая.  
Точка Кюри: железа – 770 С; никеля – 358 С; магнетита – 572 С.
- **Химическая** намагниченность образуется в процессе метаморфизма при образовании новых минералов (окисление магнетита в гематит)
- Детритная или **ориентационная** – в осадочных породах зерна минералов ориентированы по направлению отложения осадков
- **Вязкая** – в слабом магнитном поле при низких температурах, нестабильная составляющая

# Намагничивание ферромагнетиков



$$B = \mu_0 \mu H$$

$\mu$  - магнитная проницаемость

$\mu < 1$  - диамагнетики

$\mu > 1$  - парамагнетики

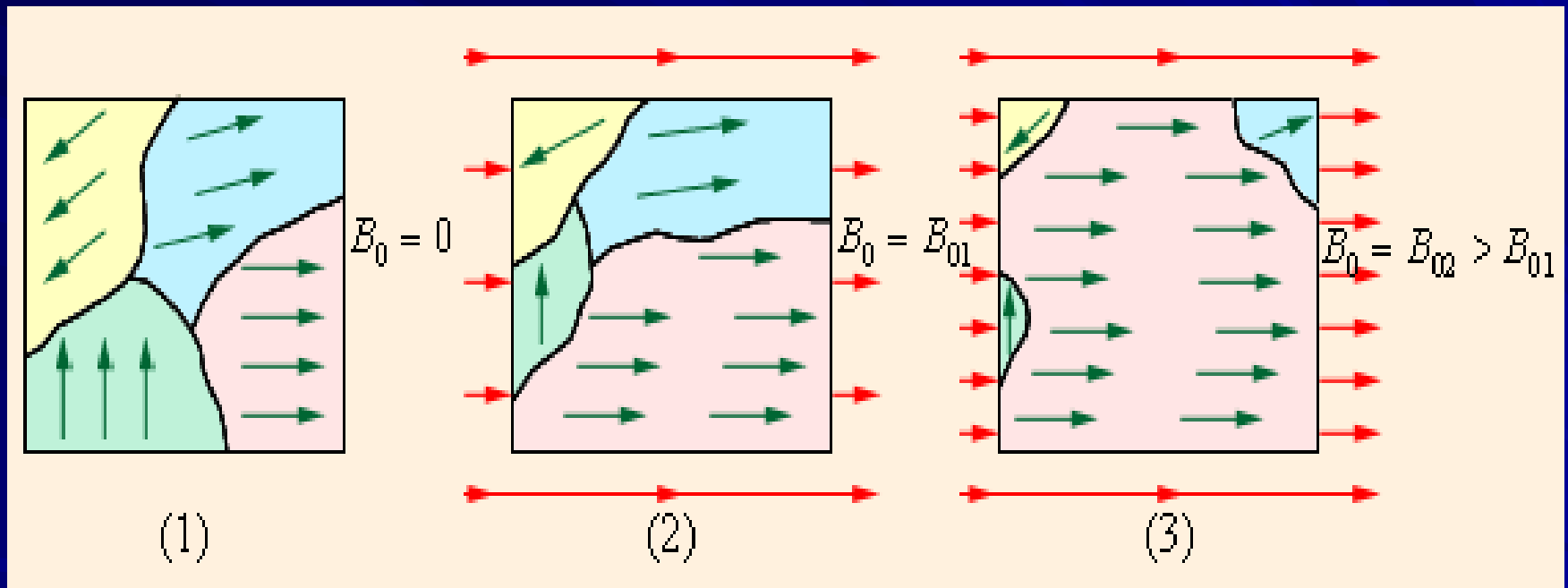
$\mu \gg 1$  - ферромагнетики

$B_0$  - остаточная намагниченность

$H_c$  - коэрцитивная сила

# Стадии намагничивания

**Домены** – макроскопические области ферромагнетика с различно ориентированной намагниченностью ( П.Вейс, 1907г.)

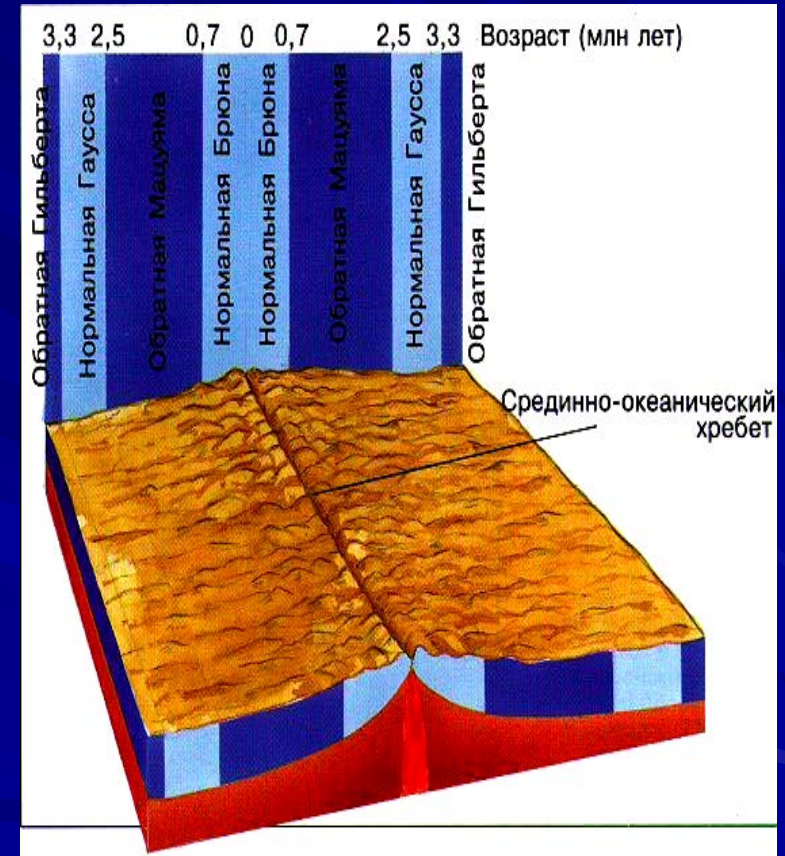
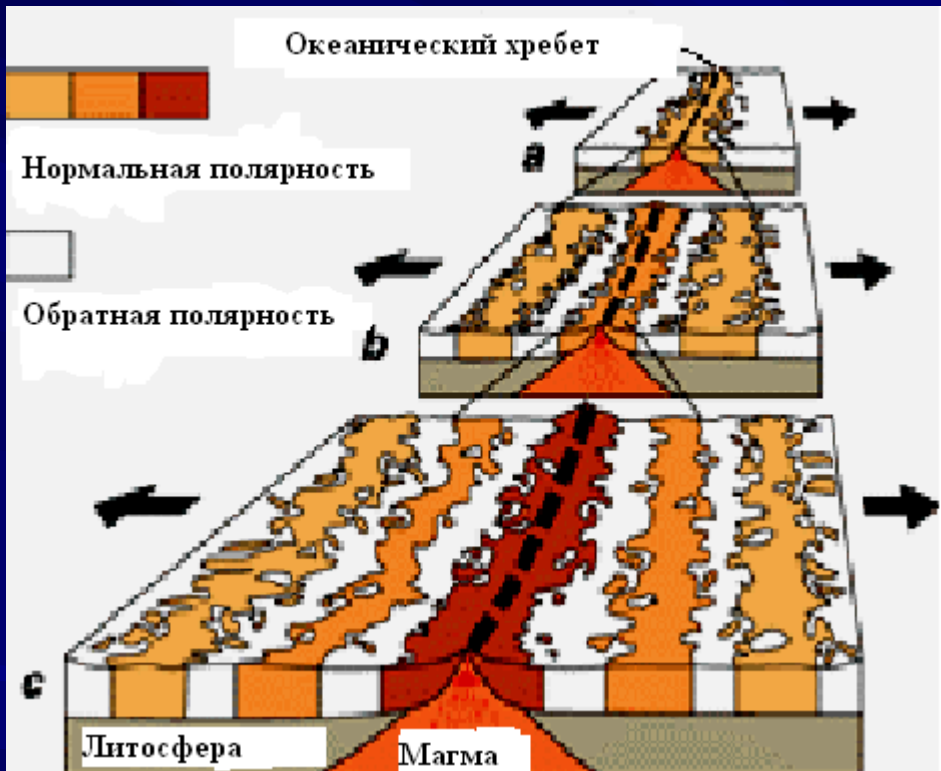


хаотическая  
ориентация  
без поля

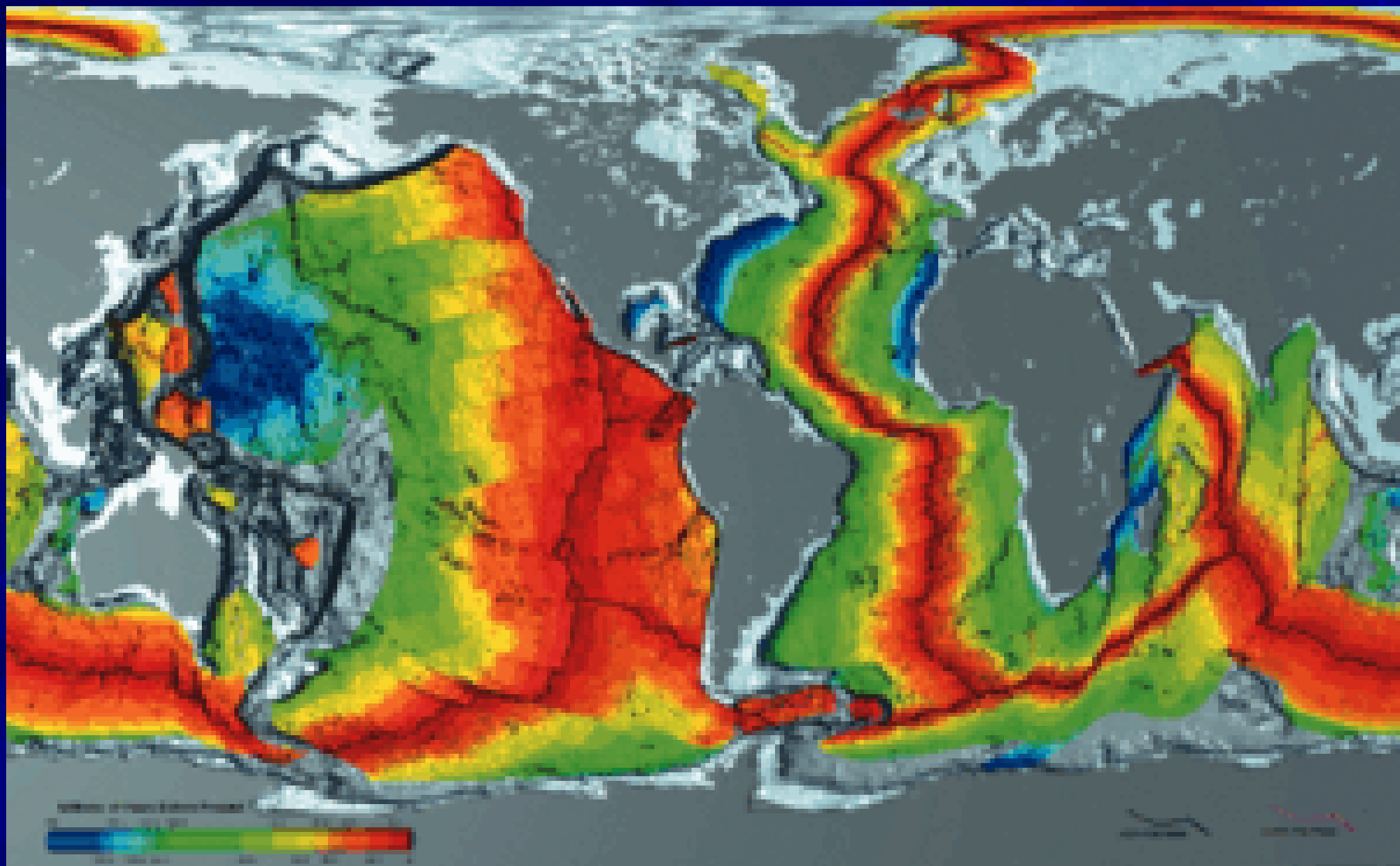
частично  
ориентированные  
домены в слабом  
поле

домены в  
сильном поле

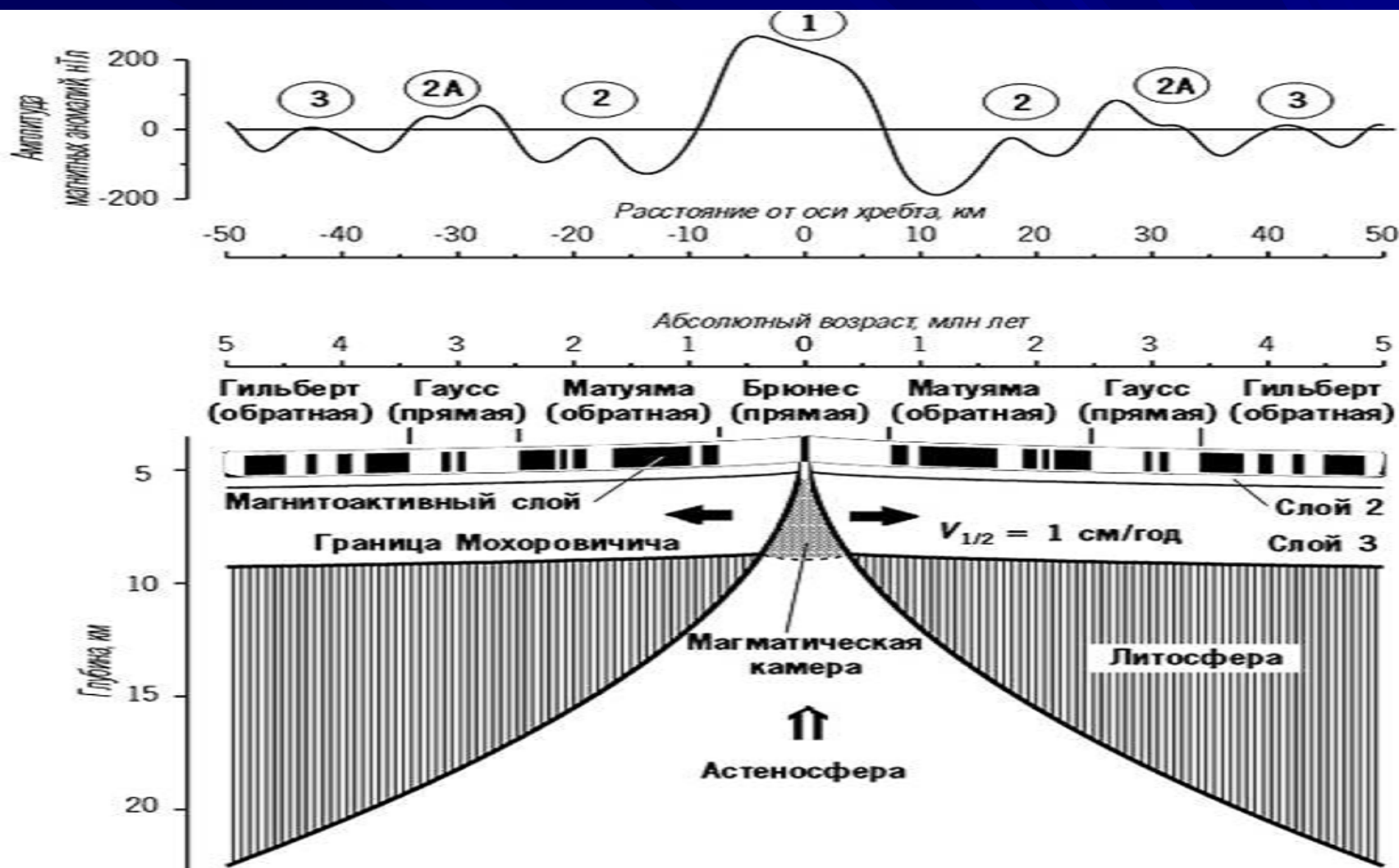
# Линейчатые магнитные аномалии срединно-океанических хребтов.



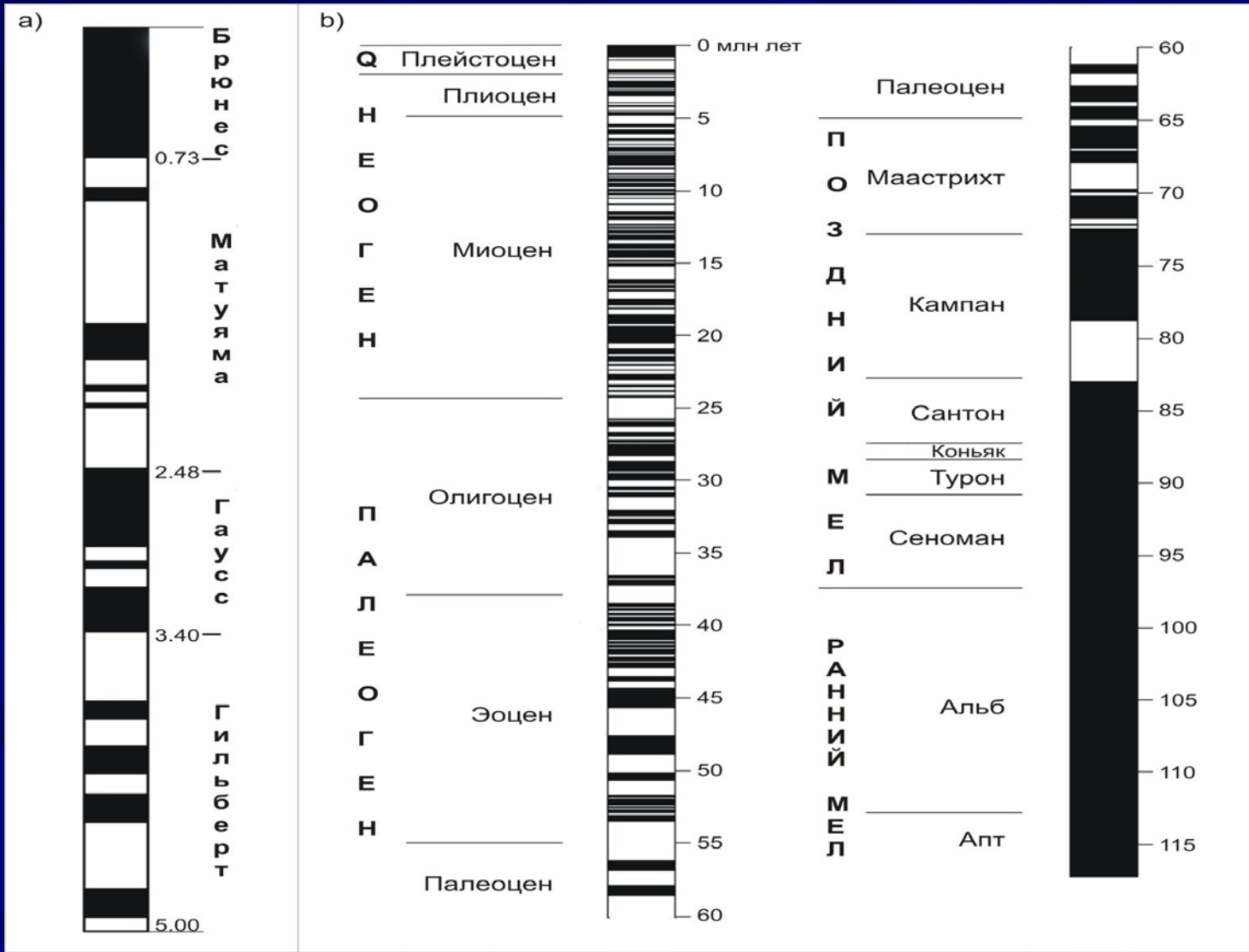
# Возраст океанической коры (красным показаны молодые участки земной коры).



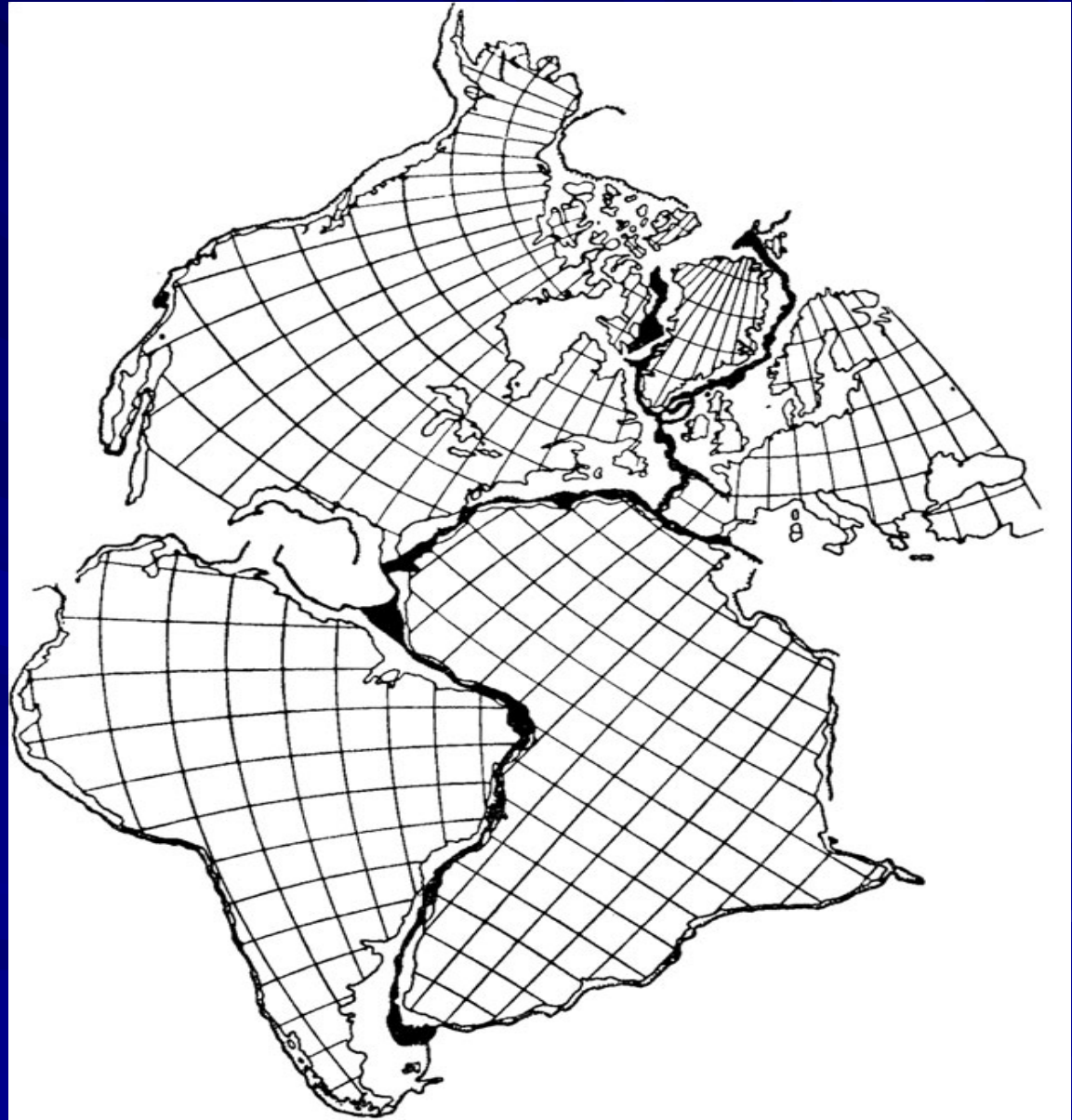
# Симметрия магнитных аномалий относительно оси срединно-океанического хребта.



# Магнитохронологическая шкала на период 115 млн.лет

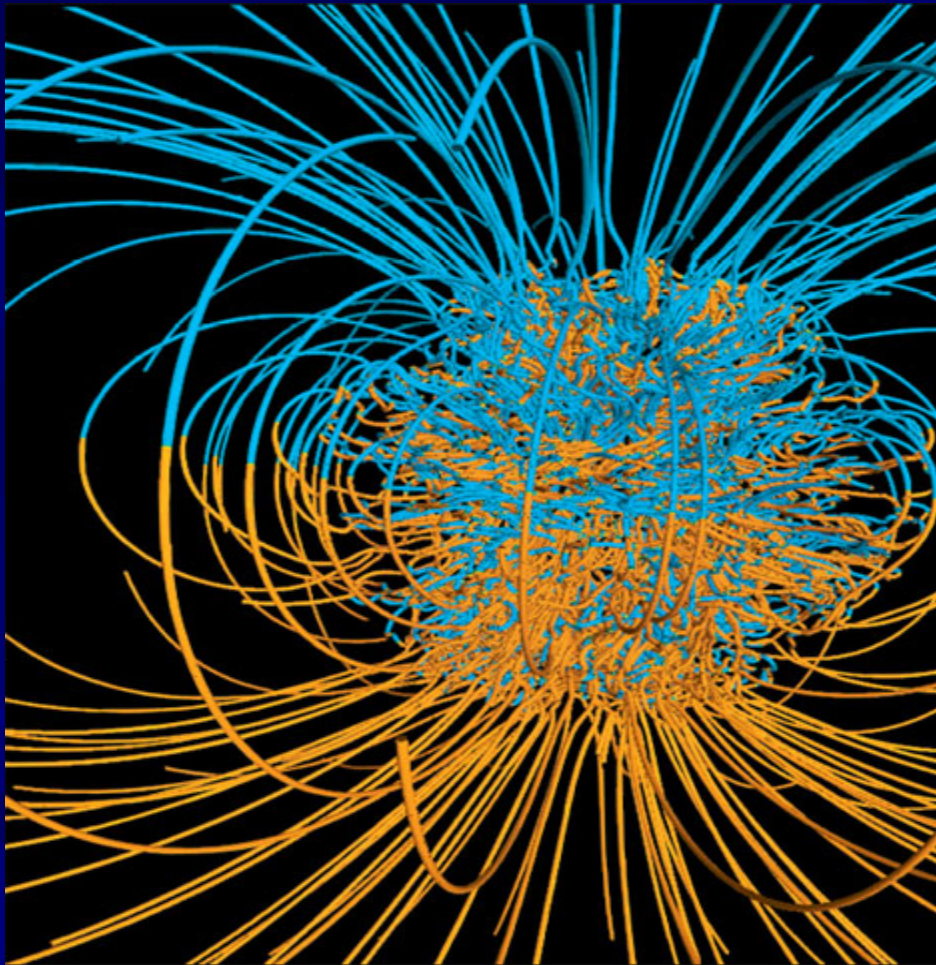


Глобальная  
палеомагнитная  
реконструкция  
движения  
континентов  
(600 млн. лет  
тому назад)



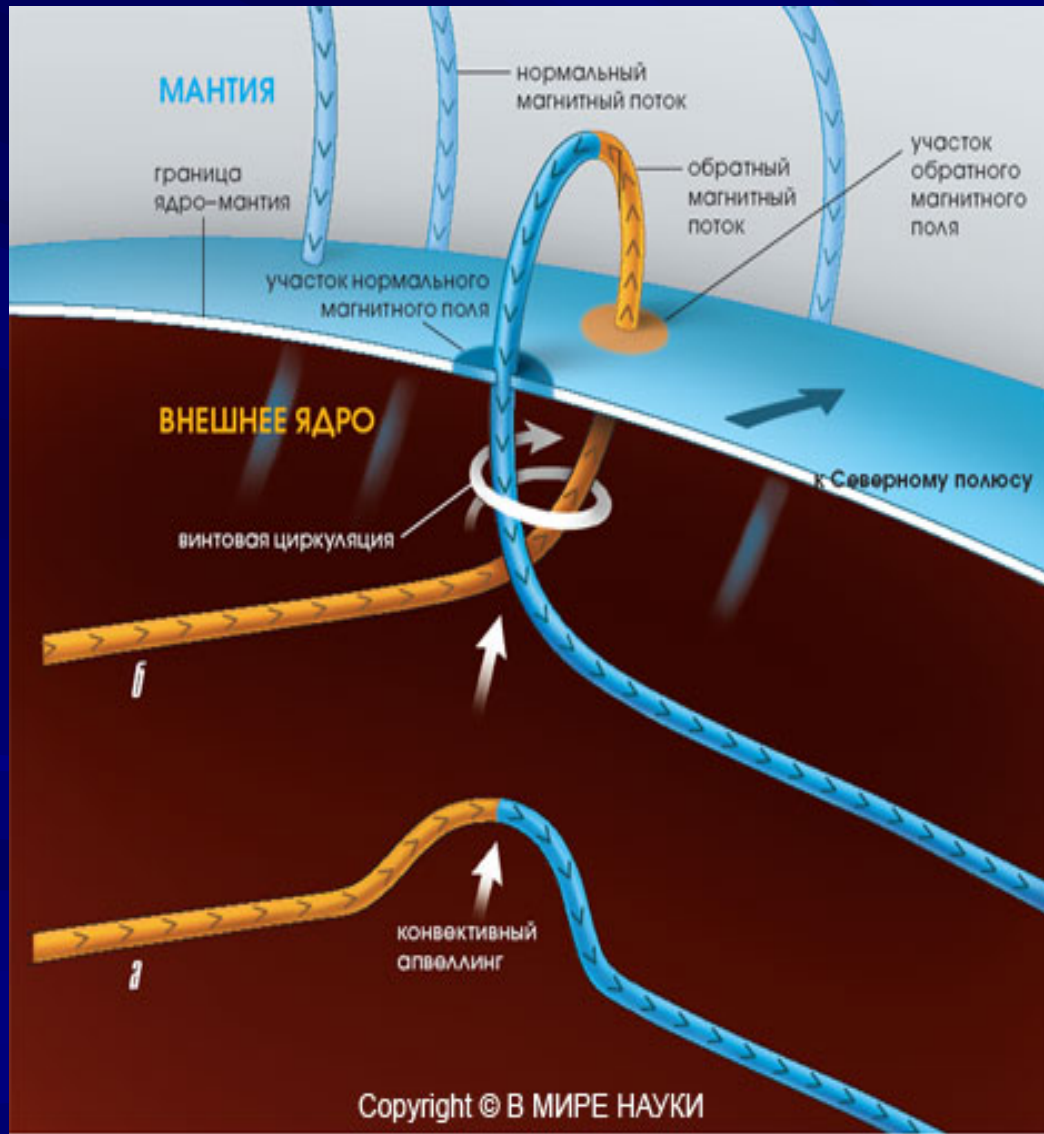


# Магнитные силовые линии внешнего магнитного поля Земли.



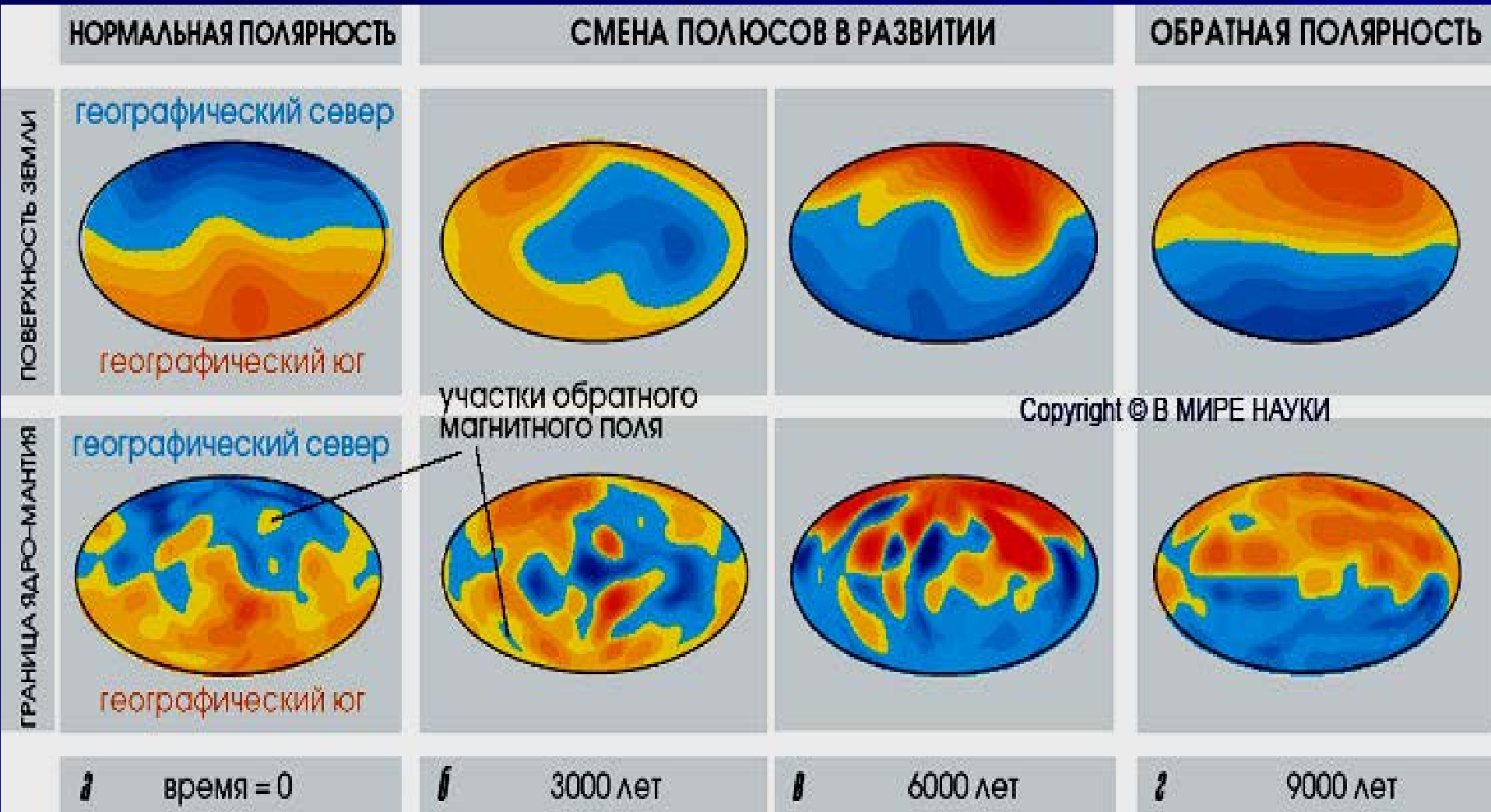
**Начало инверсий отмечается появлением нескольких ареалов обратного магнитного поля (голубой цвет в Южном полушарии и желтый в Северном), напоминающих об образовании его участков на границе ядро-мантия.**

# Обращение магнитных силовых линий внутреннего поля.

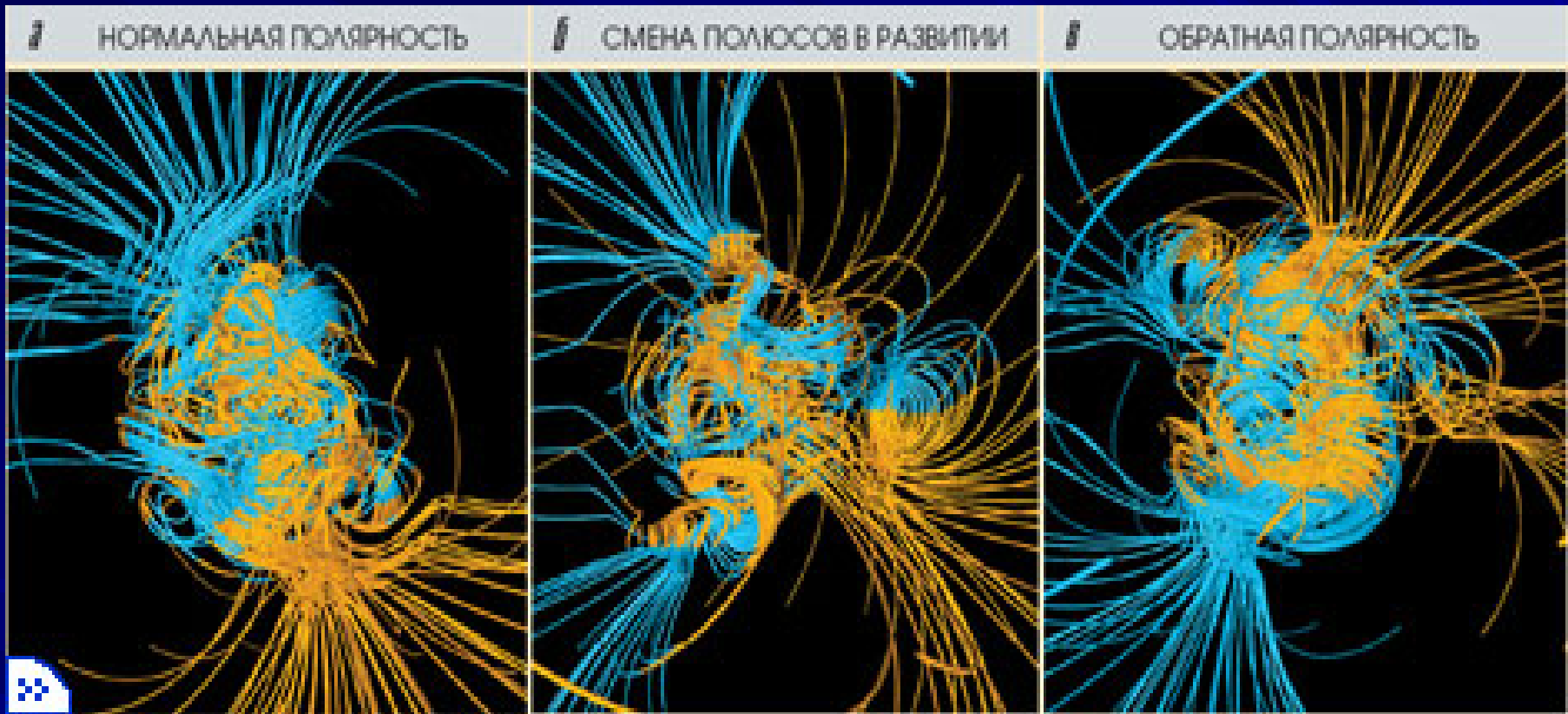


Турбулентные перемещения могут закручивать линии тороидальных полей в петли, называемые полоидальными полями. Иногда закручивание происходит при поднятии текучей массы. Если такое излияние достаточно мощно, то вершина полоидальной петли выталкивается из ядра. В результате образуются два участка, на которых петля пересекает границу ядро-мантия.

# Инверсии магнитного поля



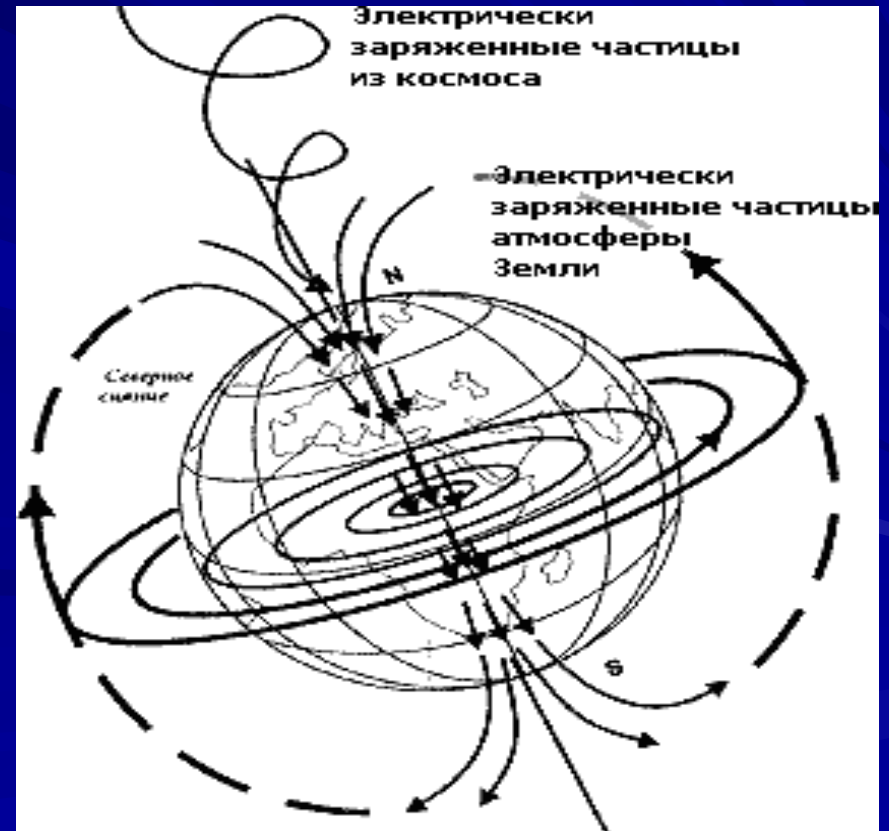
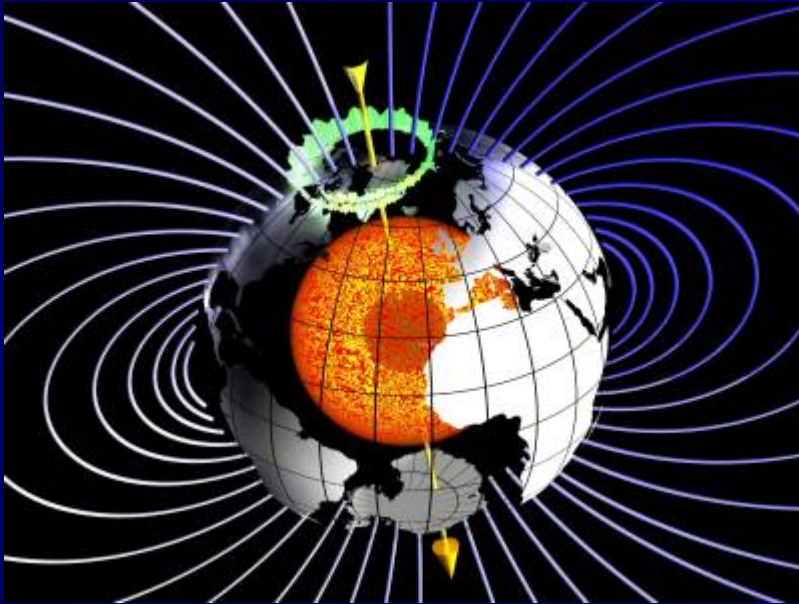
# Ориентация магнитных силовых линий за 500 лет до смены полярности, в процессе инверсии и через 500 лет после неё.



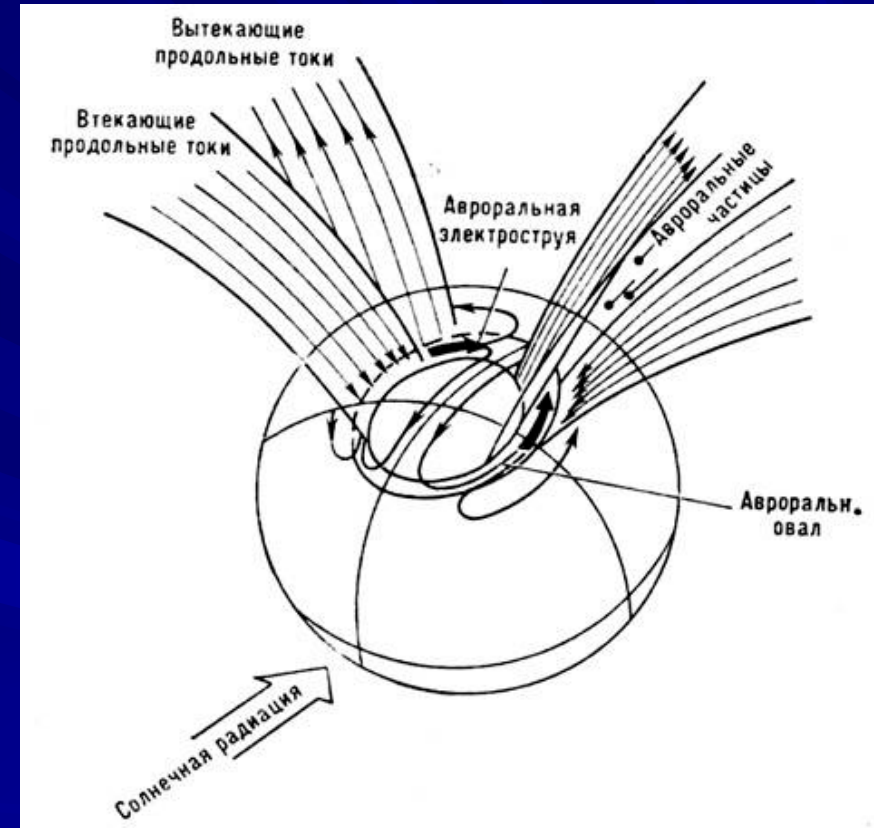
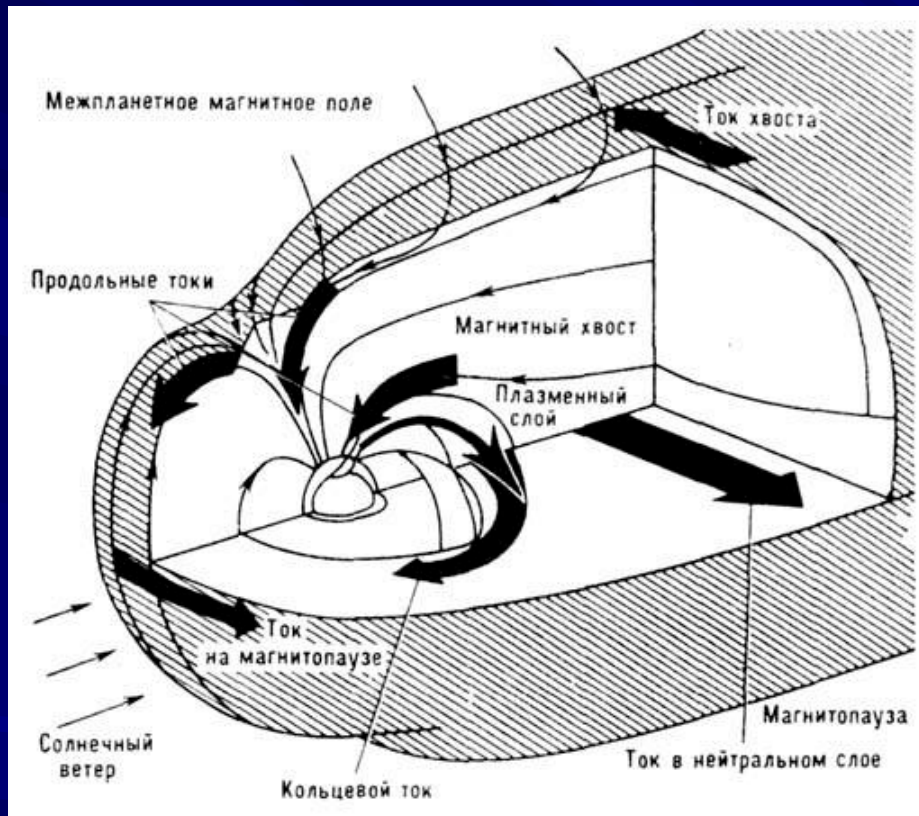
Инверсии магнитного поля сопровождаются изменением масс в северном и южном полушарии, ускоренным движением литосферных плит.

# Полярные сияния.

**Полярное сияние** (лат. *Aurora Australis*)  
— свечение (люминесценции) верхних слоёв атмосфер планет, обладающих магнитосферой, вследствие их взаимодействия с заряженными частицами солнечного ветра.



Полярные сияния возникают вследствие бомбардировки верхних слоёв атмосферы заряженными частицами, движущимися к Земле вдоль силовых линий геомагнитного поля из области околоземного космического пространства, называемой *плазменным слоем*.



Проекция плазменного слоя вдоль геомагнитных силовых линий на земную атмосферу имеет форму колец, окружающих северный и южный магнитные полюса (*авроральные овалы*).

# Полярные сияния (вид из космоса).



# Полярное сияние.









# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

2015 Лекция №12

---

Воронина Елена Викторовна

*кафедра физики Земли*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

# Сейсмология



# Предмет сейсмологии

Сейсмология изучает землетрясения, их механизмы и последствия, распространение сейсмических волн, а также все виды движений земной коры, которые регистрируются сейсмографами на суше и на дне океанов и морей

# Первый сейсмоскоп, 132 г. н.э.



В эпоху поздней Хань императорский астроном Чжан Хэн (78-139) изобрел первый в мире сейсмоскоп, который отмечал слабые землетрясения на больших расстояниях.

# Рассматриваемые вопросы:

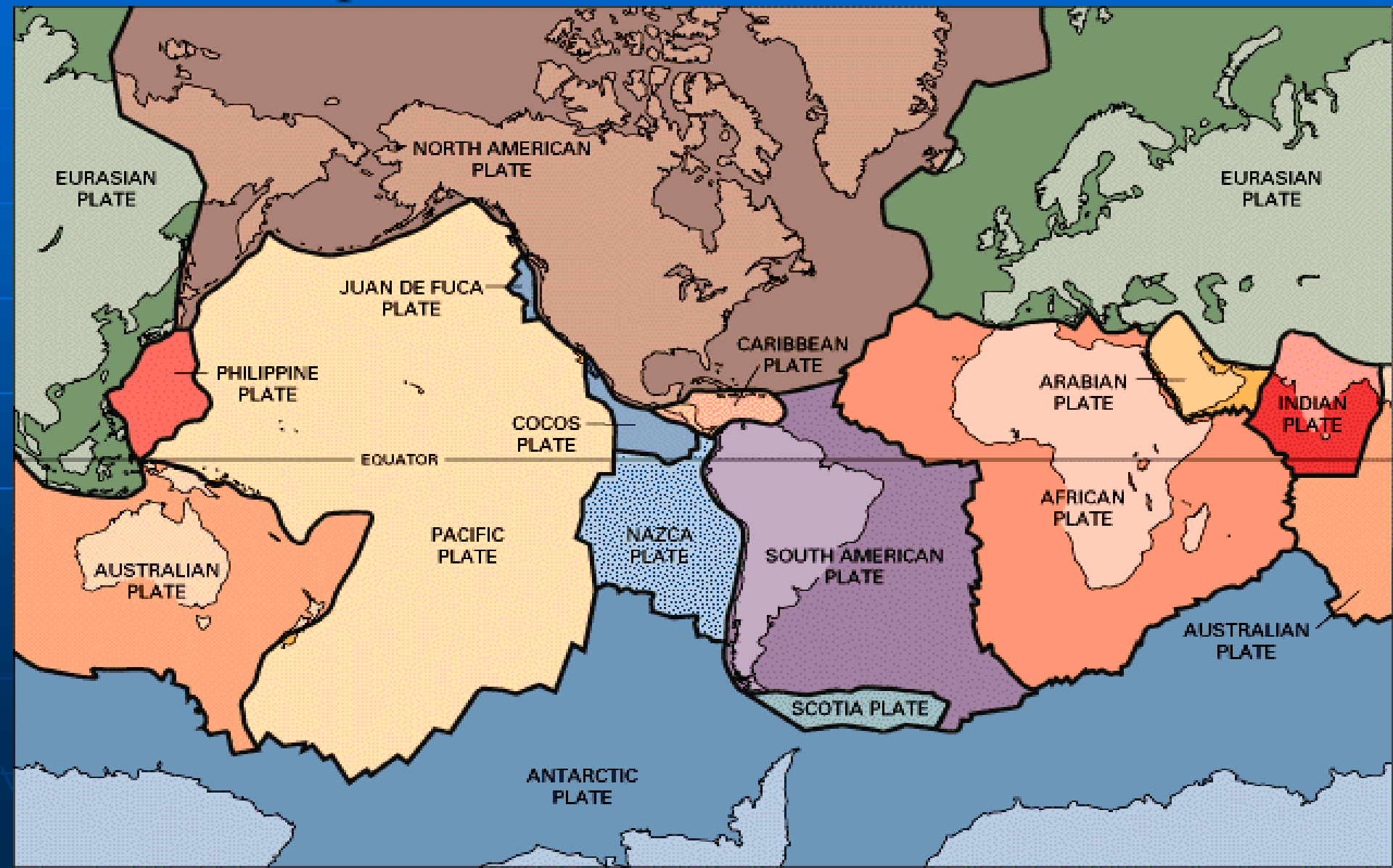
- **Сейсмический режим Земли** и отдельных регионов, параметры сейсмичности
- Основные **типы сейсмических волн**, их характеристики и свойства, используемые для изучения внутреннего строения Земли
- **Модели строения Земли** по сейсмическим данным
- **Механизмы очагов землетрясений** и их использование для оценки напряжений и динамики литосферы

# Сейсмичность

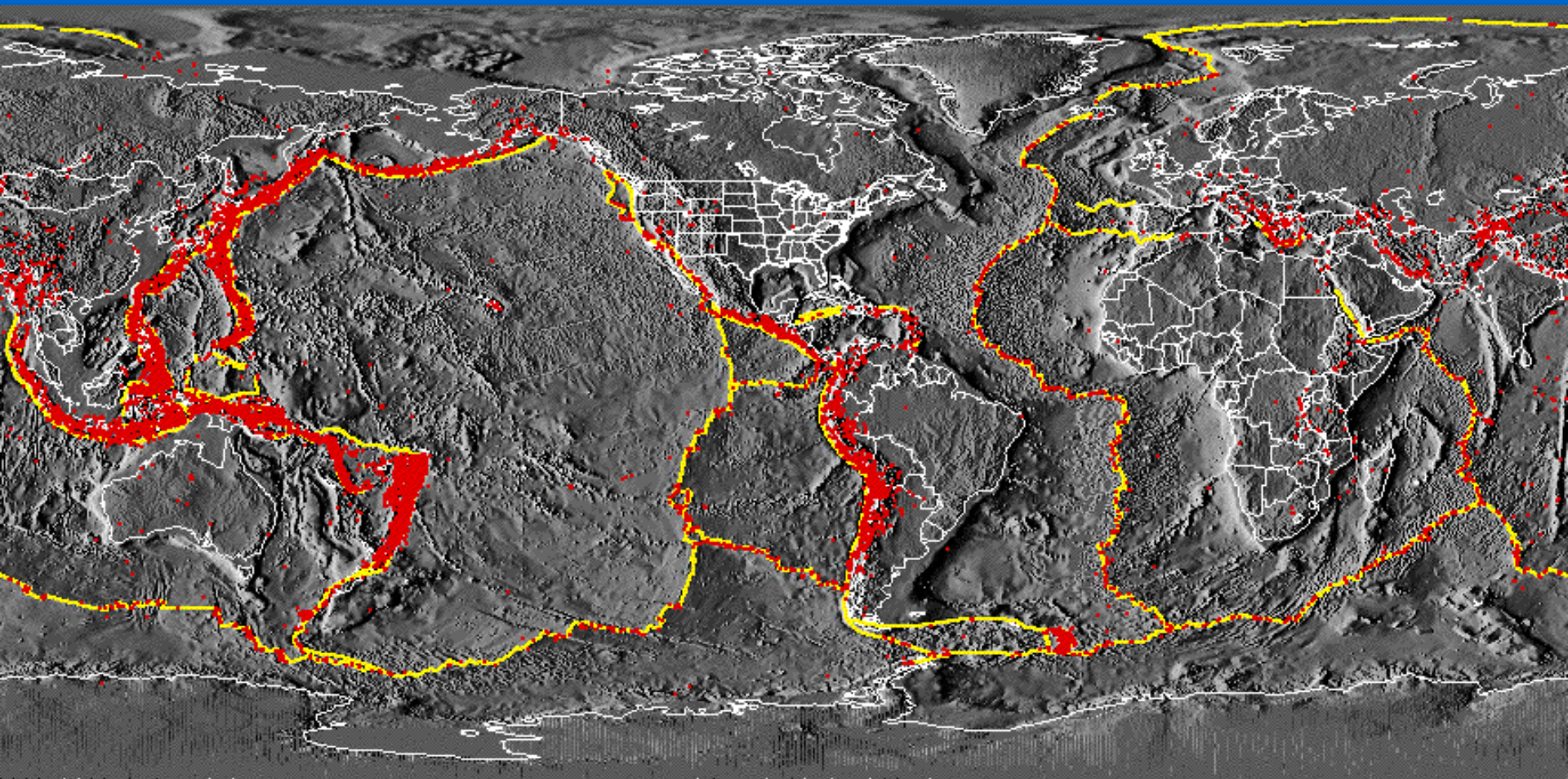
- **СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ** - способность недр Земли породить очаги землетрясений.
- Характеризуется территориальным распределением эпицентров, интенсивностью землетрясений и др.
- Наиболее сейсмически активны Тихоокеанский, Средиземноморский, Срединно-Атлантический, Восточно-Африканский пояса.
- **Очаг землетрясения** - область в литосфере, где происходит быстрое перемещение масс вдоль образующегося или развивающегося тектонического разрыва, возникают упругие колебания и высвобождение накопленной энергии.



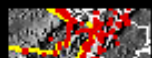
# Границы тектонических плит.



# Эпицентры очагов землетрясений



Crustal Plate Boundaries



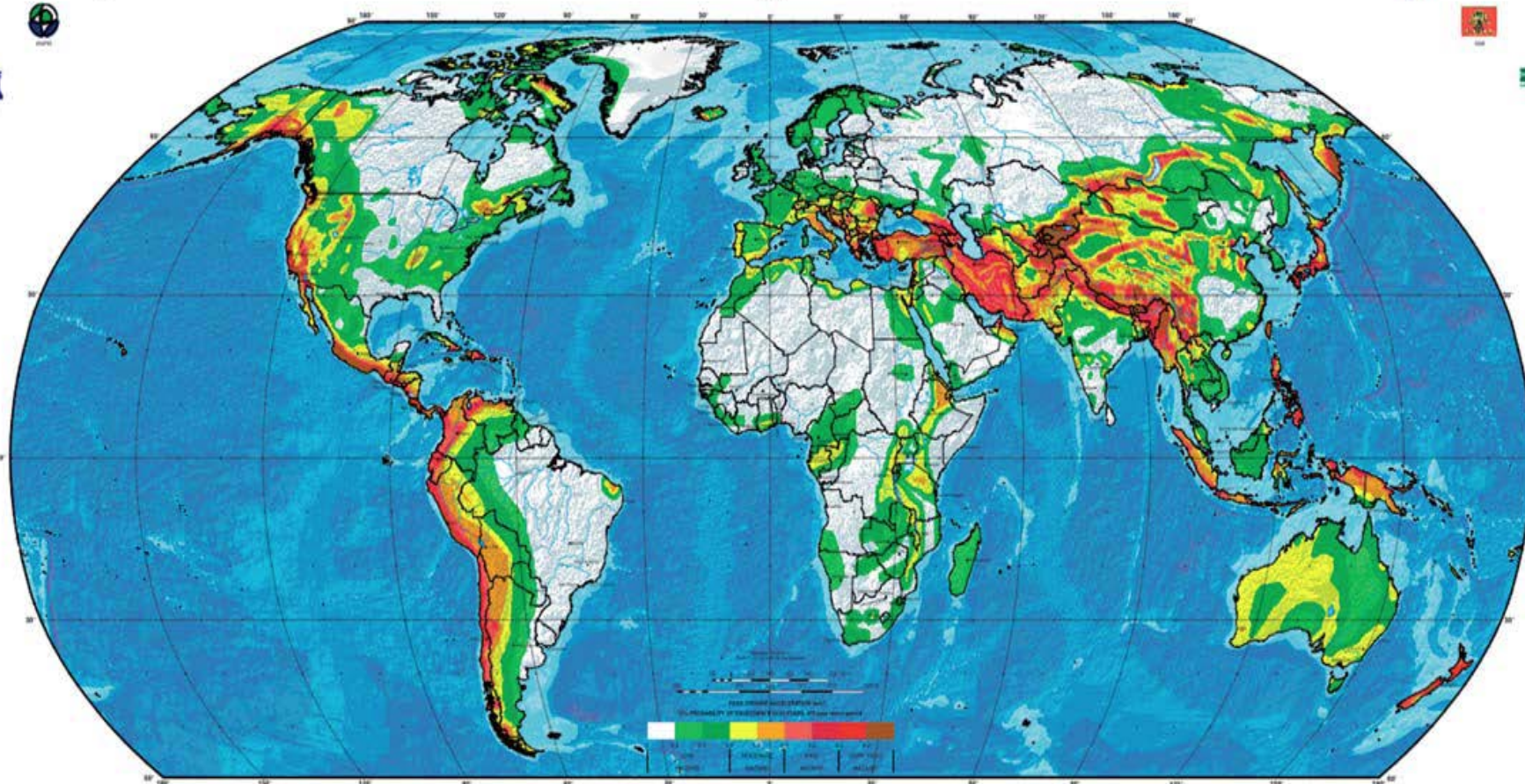
Earthquake Epicenters,  $M > 5$ , 1980-1990  
Coastlines, Political Boundaries

**Эпицентр** – проекция очага землетрясения на поверхность Земли

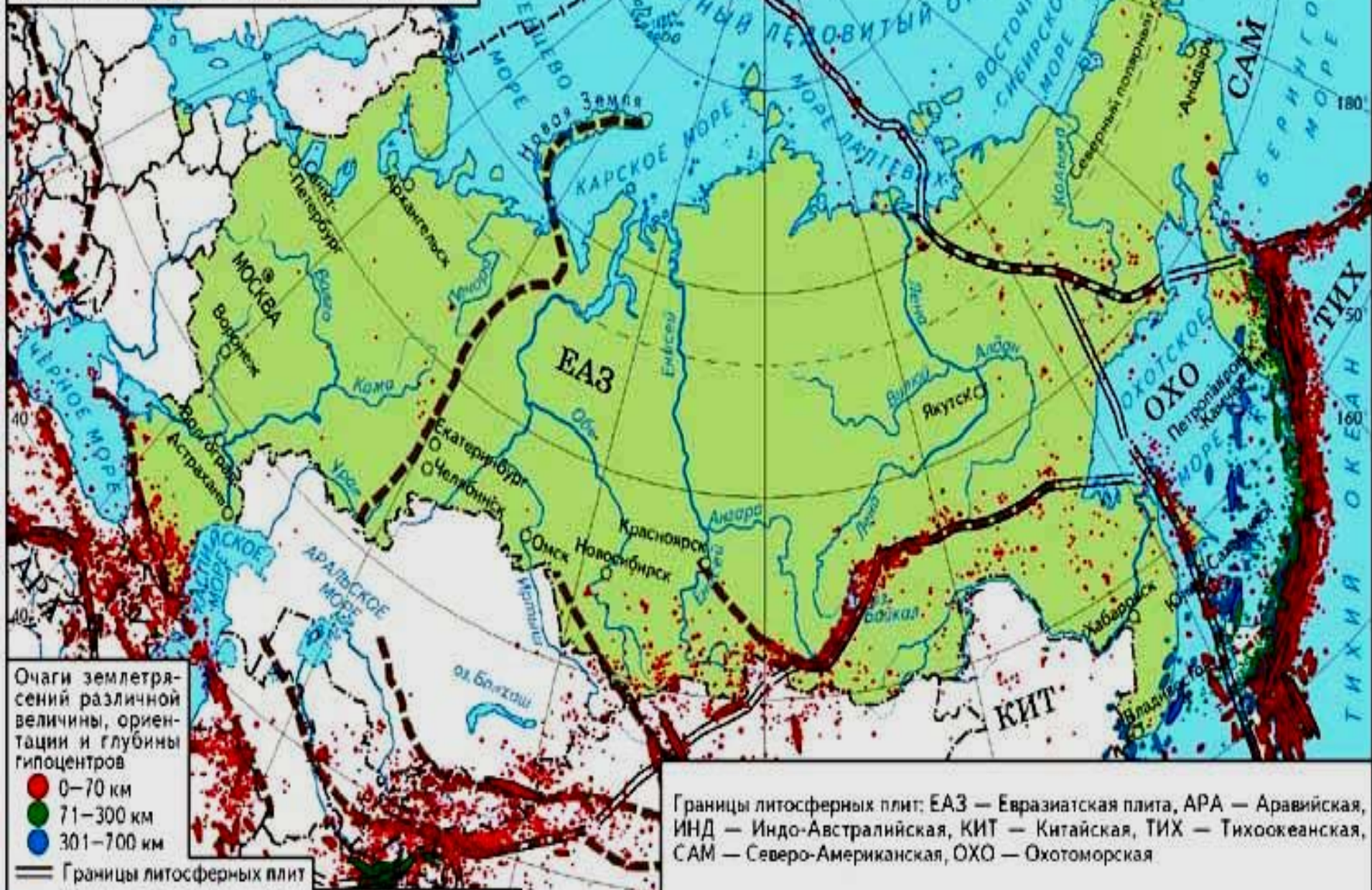
# Глобальная карта сейсмической опасности

## GLOBAL SEISMIC HAZARD MAP

Produced by the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP),  
a demonstration project of the UN International Decade of Natural Disaster Reduction, conducted by the International Lithosphere Program.  
Global map assembled by D. Giardini, G. Grünthal, K. Shedlock, and P. Zhang  
1999



# СЕЙСМИЧНОСТЬ РОССИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ



Очаги землетрясений различной величины, ориентации и глубины гипоцентров

- 0–70 км
- 71–300 км
- 301–700 км

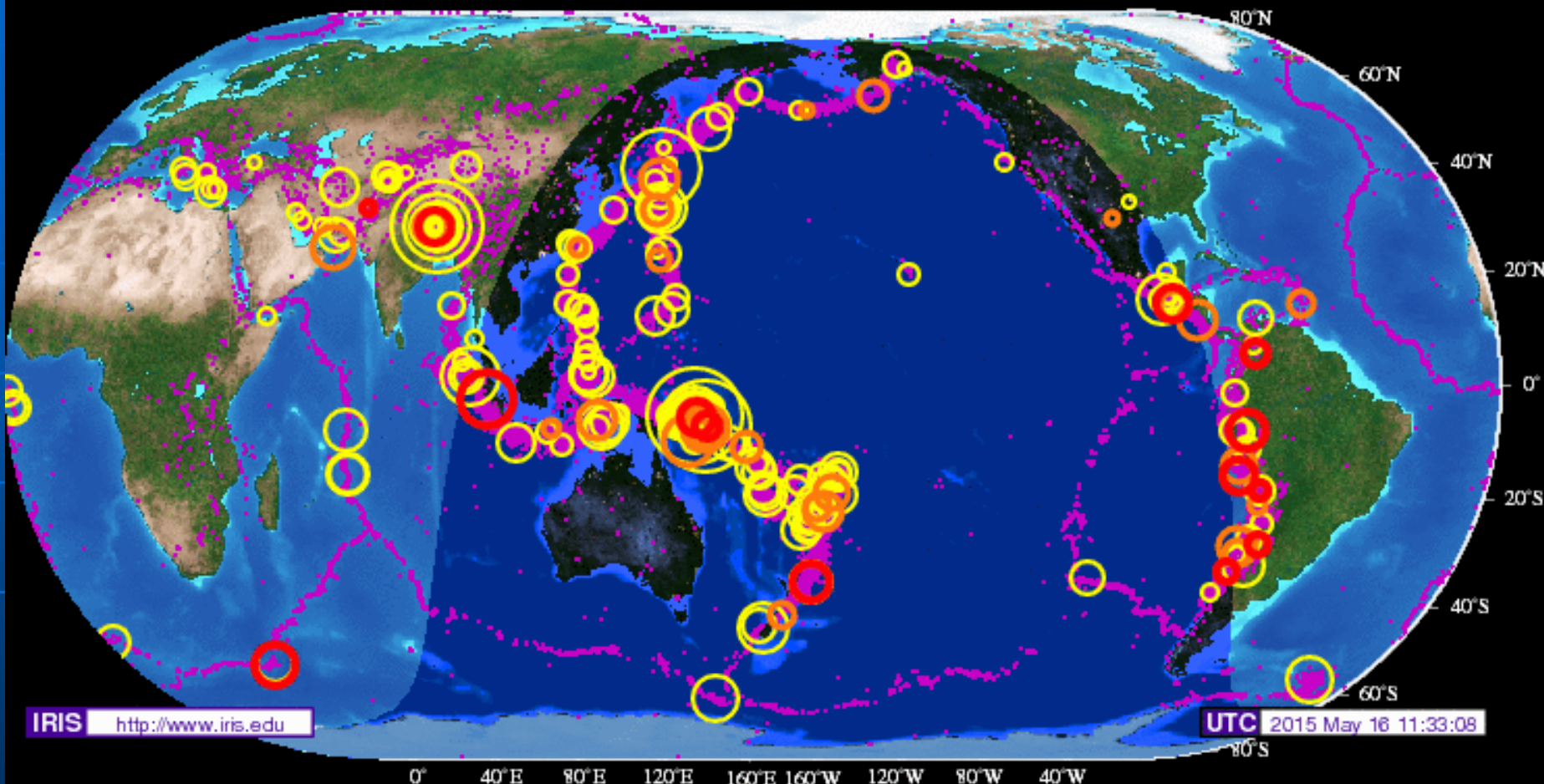
— Границы литосферных плит

— Оси конвергентных сейсмоактивных структур — зоны субдукции и их реликты на континенте

Границы литосферных плит: ЕАЗ — Евразийская плита, АРА — Аравийская, ИНД — Индо-Австралийская, КИТ — Китайская, ТИХ — Тихоокеанская, САМ — Северо-Американская, ОХО — Охотоморская

Специальное содержание разработал В.И. Уломов

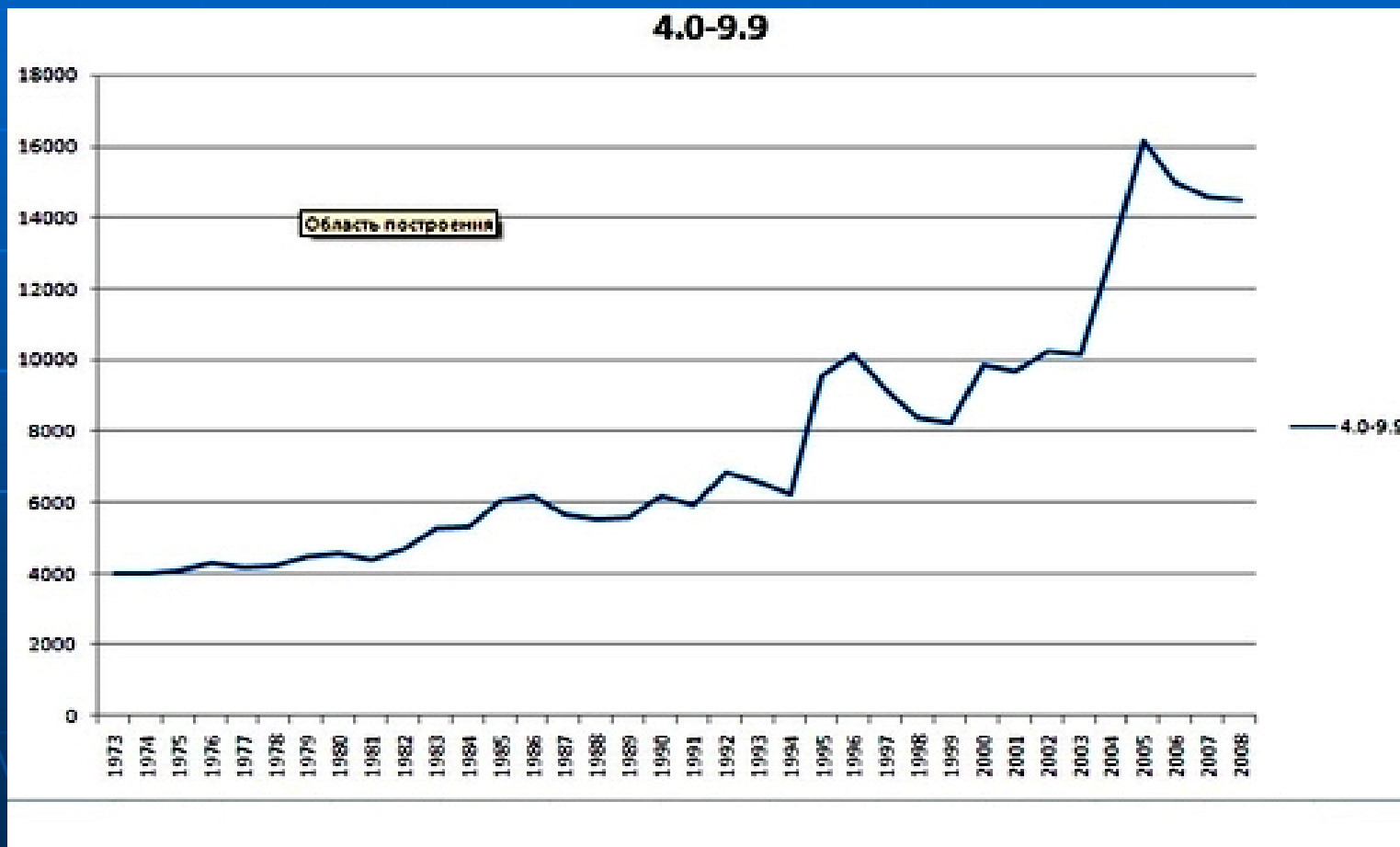
# Seismic Monitor



**Гипоцентр** – точка начала вспарывания на разрыве;

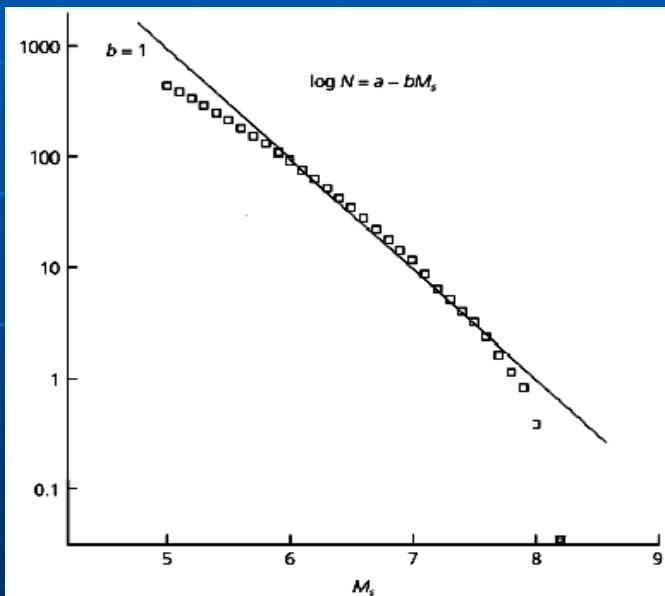
**Эпицентр** – проекция гипоцентра на поверхность Земли

# Увеличение числа сильных землетрясений за период с 1973 года



# Закон повторяемости землетрясений Гуттенберга-Рихтера

один из фундаментальных законов сейсмического режима, отражающий зависимость частоты возникновения землетрясений от их энергии  $E$  (магнитуды  $M$ ) в области сейсмически активных зон.



$N$  - число землетрясений;  
 $A, a$  - сейсмическая активность;

$\gamma$   $b$  - параметры свойств  
среды и процесса разрушения

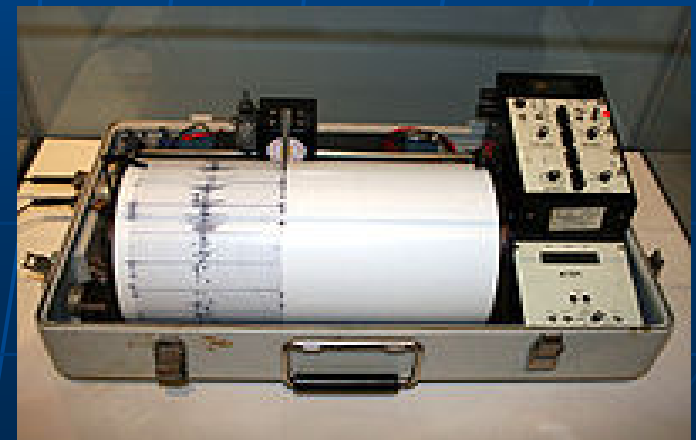
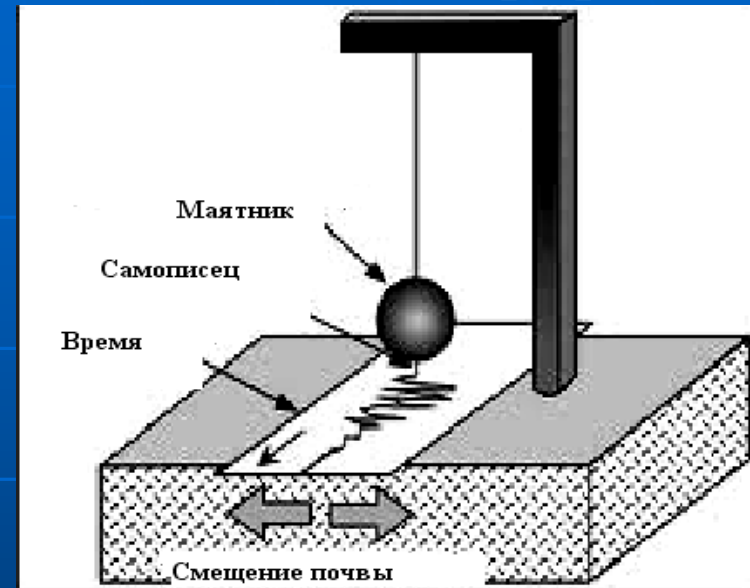
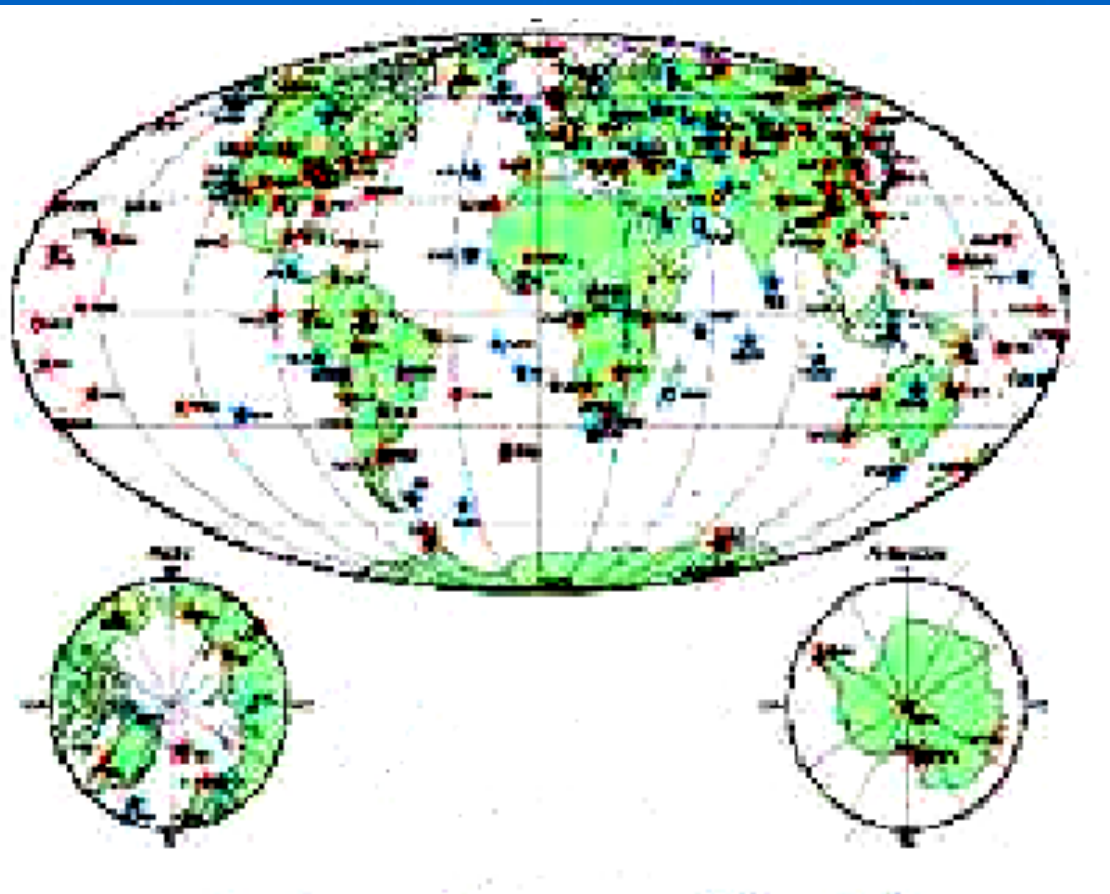
$$\lg N = A - \gamma \lg E$$

$$\lg N = a - bM$$

$$\lg E = 11,8 + 1,5M$$

# Регистрация землетрясений

## Схема сейсмографа



Мировая сейсмическая сеть насчитывает около 2000 станций





# Магнитуды землетрясения

**Магнитуда** — величина, характеризующая энергию, выделившуюся при землетрясении в виде сейсмических волн. Первоначальная шкала магнитуды была предложена американским сейсмологом Чарльзом Рихтером в 1935 году

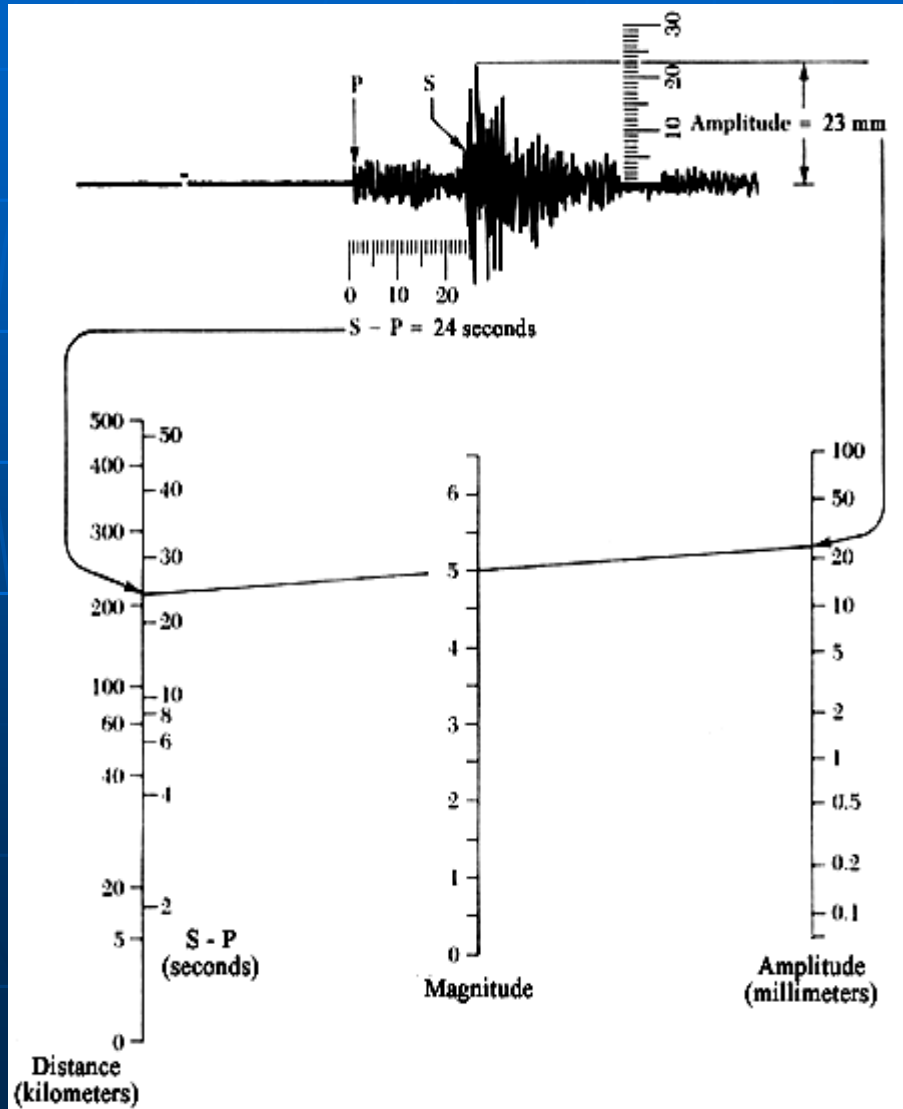
$$m_b = \lg \left( \frac{A}{T} \right)_{T=1c} + Q(\Delta, h) \quad \text{- Магнитуда по объемным волнам}$$

$$M_s = \lg \left( \frac{A}{T} \right)_{T=20c} + 1,66 \lg \Delta + 3,3 \quad \text{- Магнитуда по поверхностным волнам}$$

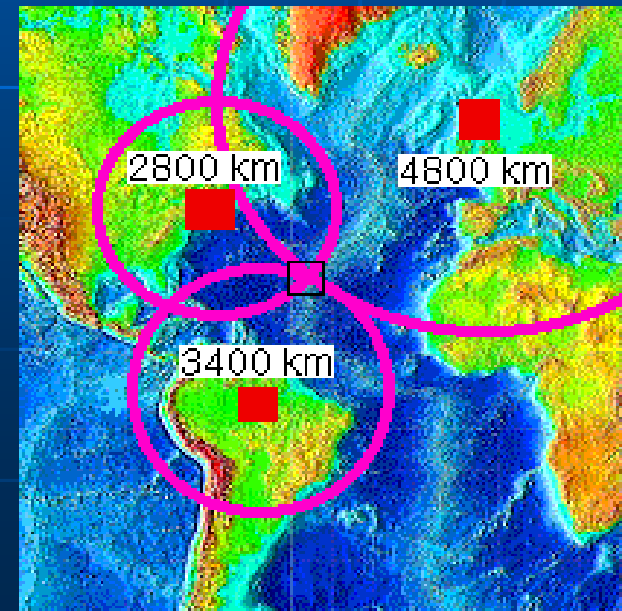
A – амплитуда в микрометрах;  
T – период волн в секундах;  
 $\Delta$ - эпицентральный расстояние;  
h – глубина землетрясения;  
Q – калибровочная функция

За год на Земле происходит примерно:  
1 землетрясение с магнитудой 8,0 и выше;  
10 — с магнитудой 7,0—7,9;  
100 — с магнитудой 6,0—6,9;  
1000 — с магнитудой 5,0—5,9.

# Определение магнитуды землетрясения и эпицентрального расстояния.

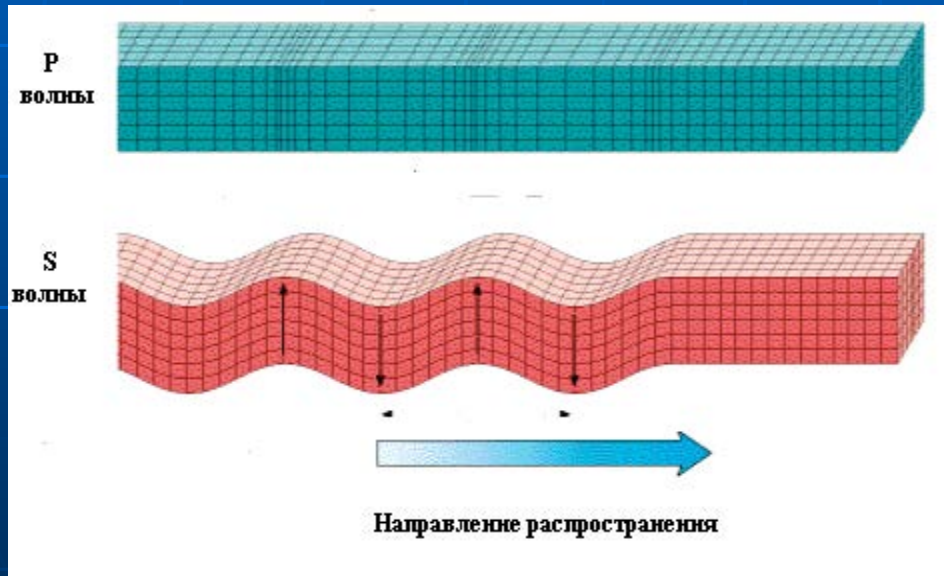


- **Эпицентральное расстояние** – расстояние от эпицентра до регистрирующей станции
- Разность моментов вступления P и S волн определяет эпицентральное расстояние
- Максимальная амплитуда волн определяет магнитуду землетрясения



# Основные типы сейсмических волн: объемные P и S волны

**Продольные** сейсмические волны P- волны сжатия, вызывают колебания частиц пород вдоль направления распространения волны, обуславливая чередование участков сжатия и разрежения в породах.



**Поперечные** сейсмические волны S-волны сдвига, заставляют частицы пород колебаться перпендикулярно направлению распространения волны. SV-вертикально поляризованная компонента, SH- горизонтально поляризованная компонента.

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}};$$

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}};$$

$$V_P = 1,73V_S$$

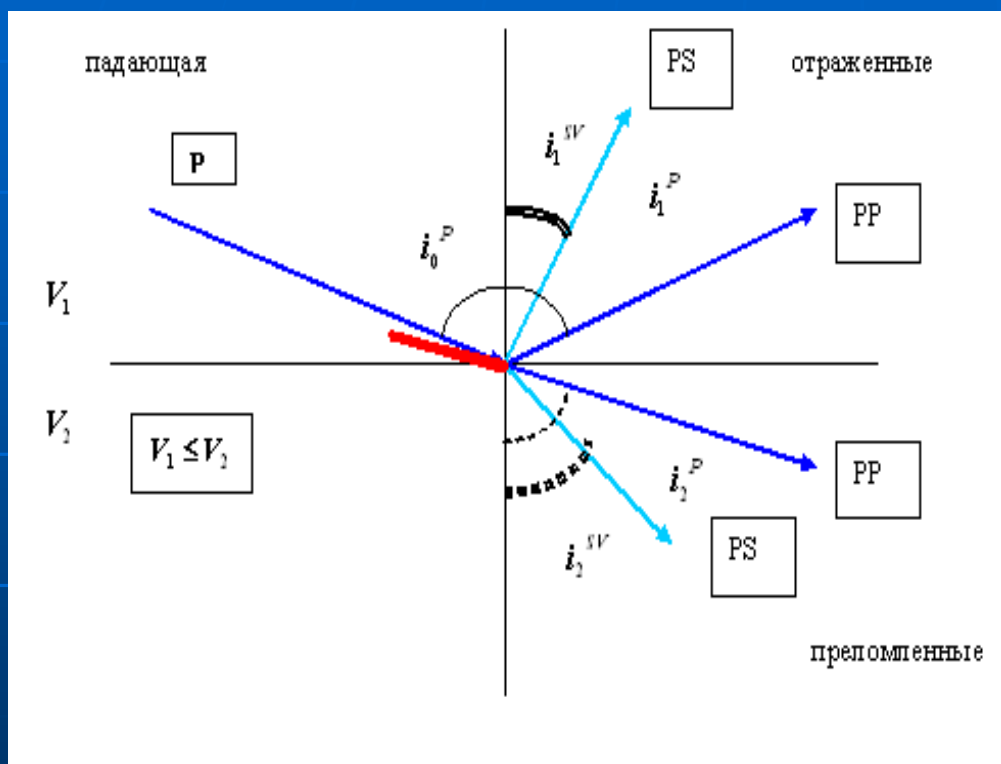
$K, \mu$  - Упругие модули сжатия и сдвига

$\rho$  - плотность

# Параметры упругих модулей для верхних слоев Земли

Порода	Глубина (км)	$K$ (ГПа)	$\mu$ (ГПа)	$\rho$ (г/см <sup>3</sup> )	$V_P$ (км/с)	$V_S$ (км/с)
Вода	0	2,1	0	1,02	1,45	0
Осадки	3	2-52	0-26	2,6	1,45-5,8	3,2
Граниты	15	52-75	26-44	2,6-2,9	5,8-6,8	3,2-3,9
Базальты	25	75-131	44-68	2,9-3,4	6,8-8,1	3,9-4,5

# Отражение и преломление Р волны при падении на границу раздела двух сред



Закон Снеллиуса:

$$\frac{\sin i}{V} = \text{const}$$

Угол падения равен углу отражения

$$i_0^P = i_1^P$$

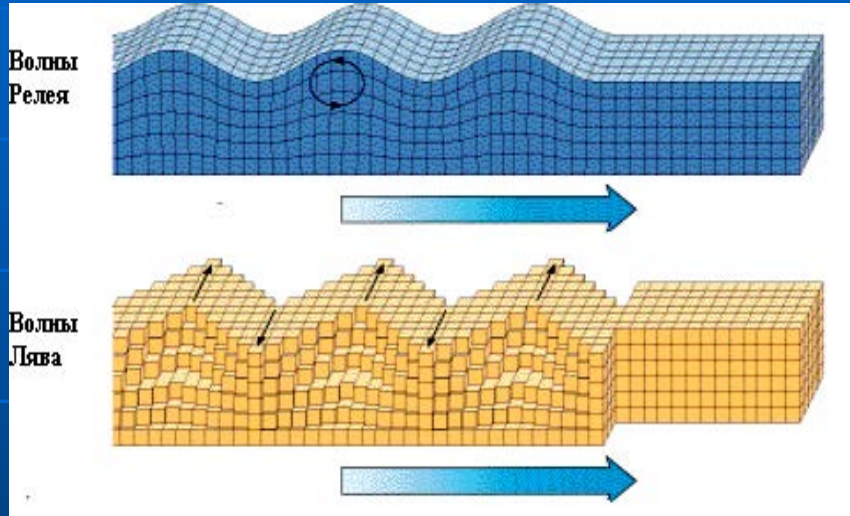
Критический угол

$$i_{\text{крит}} = \arcsin \frac{V_1}{V_2}$$

$$\frac{\sin i_0^P}{V_1} = \frac{\sin i_1^P}{V_1} = \frac{\sin i_2^P}{V_2};$$



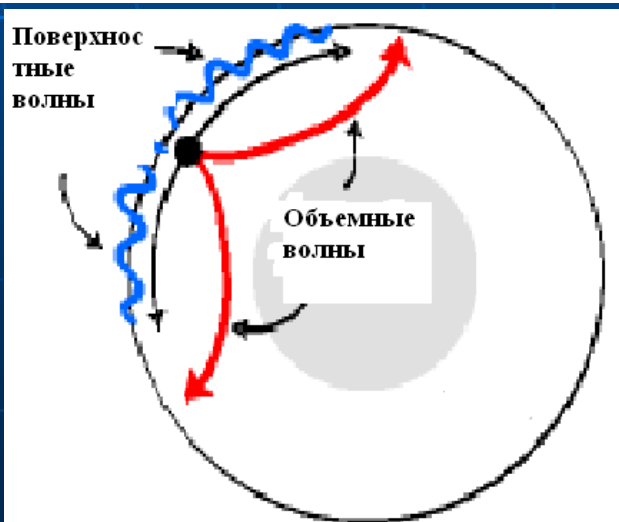
# Поверхностные сейсмические волны Лява (1911г.) и Релея (1855г.)



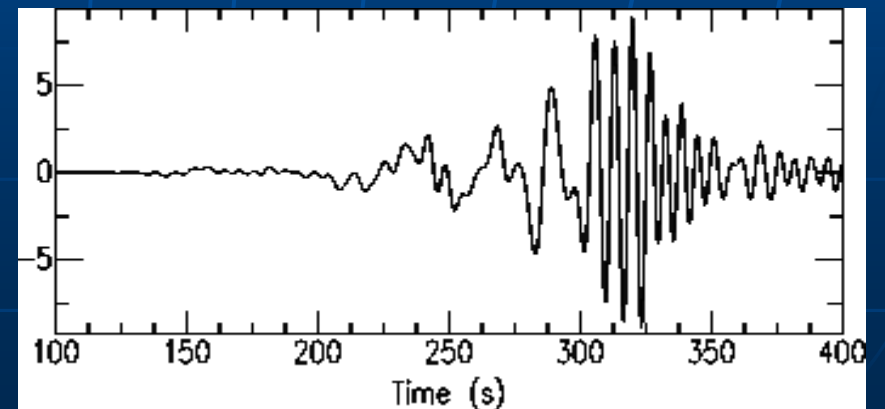
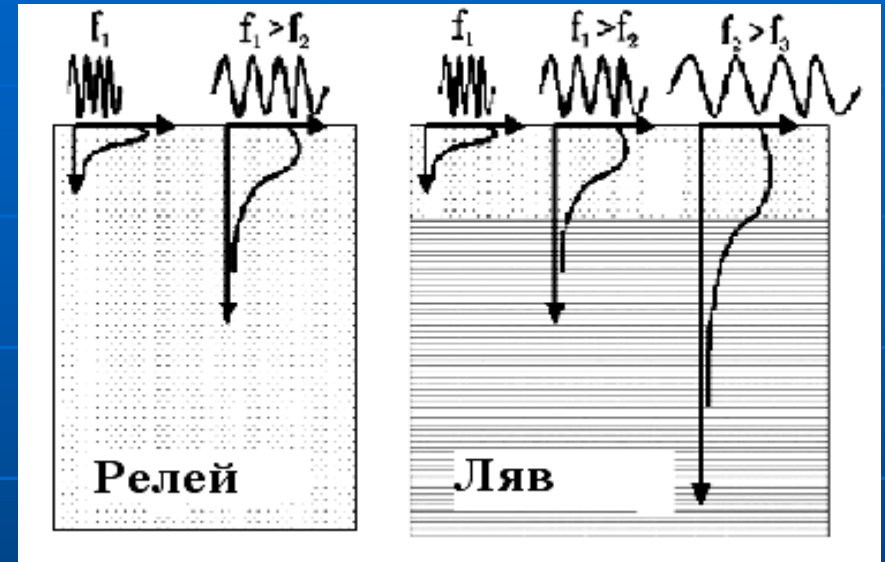
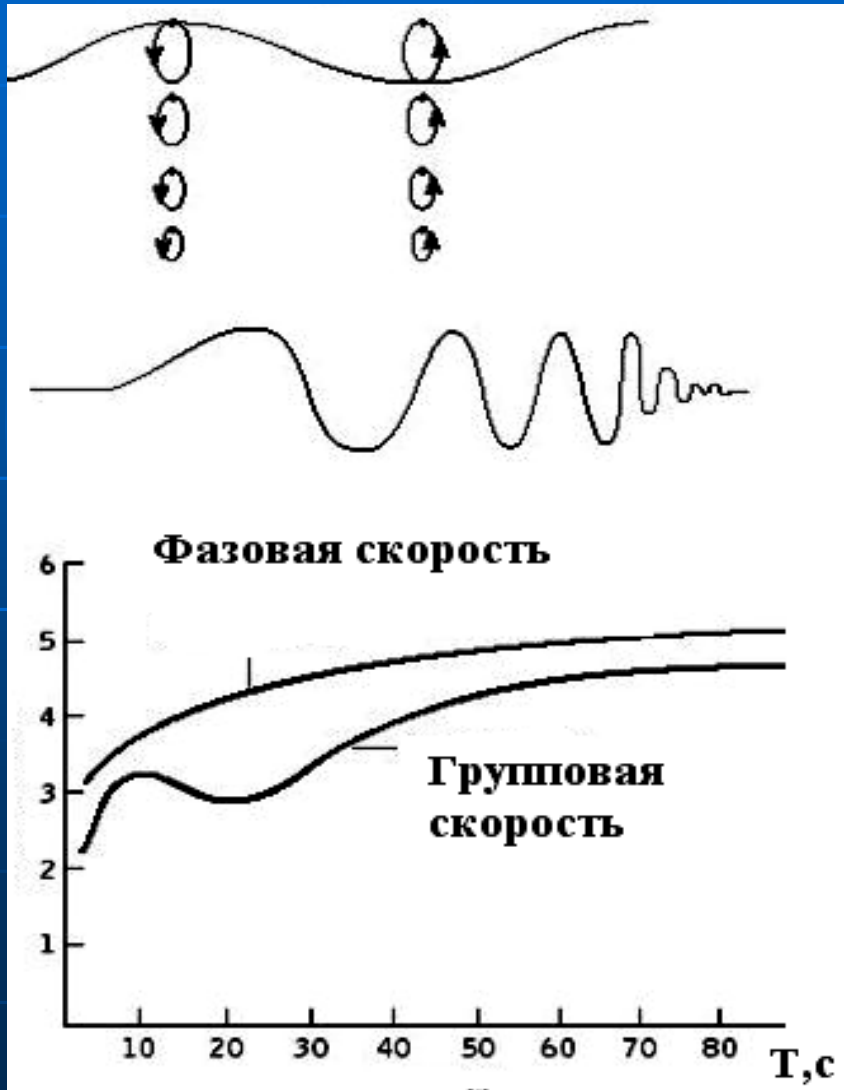
$$0,91V_S \leq V_R \leq 0,93V_S;$$
$$V_L \leq 0,98V_S$$

В **Рэлеевской** (интерференционной P+SV) волне частицы грунта смещаются в вертикальной плоскости, ориентированной вдоль направления распространения волн, а траектории их движения представляют собой ЭЛЛИПСЫ

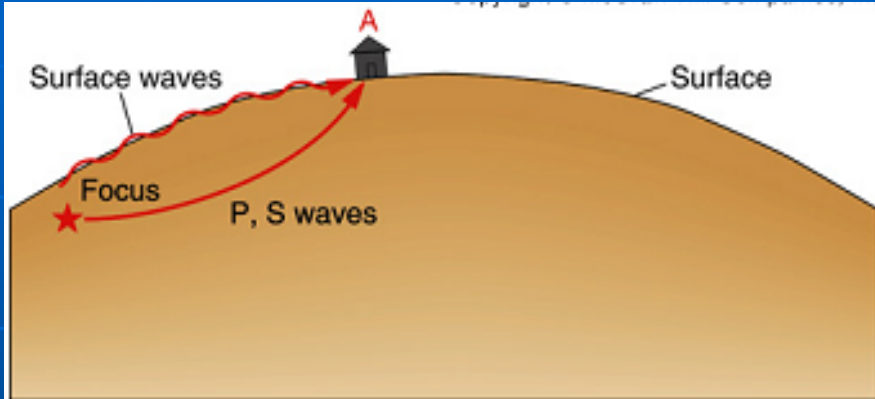
В волне **Лява** (интерференция SH волн) частицы движутся в горизонтальной плоскости поперек направления распространения волны.



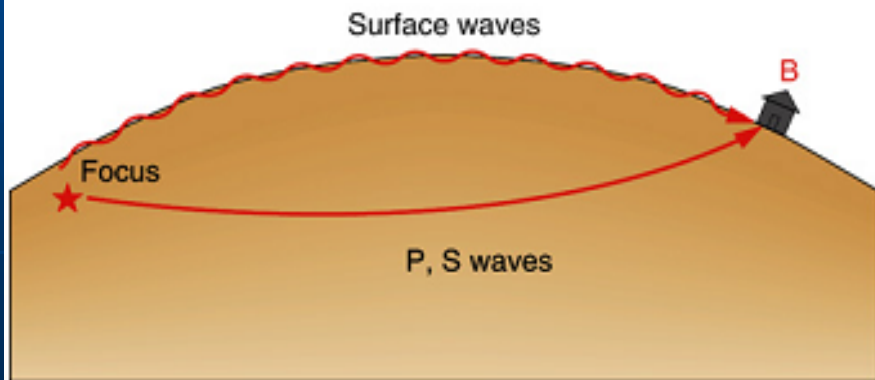
# Свойства поверхностных волн.



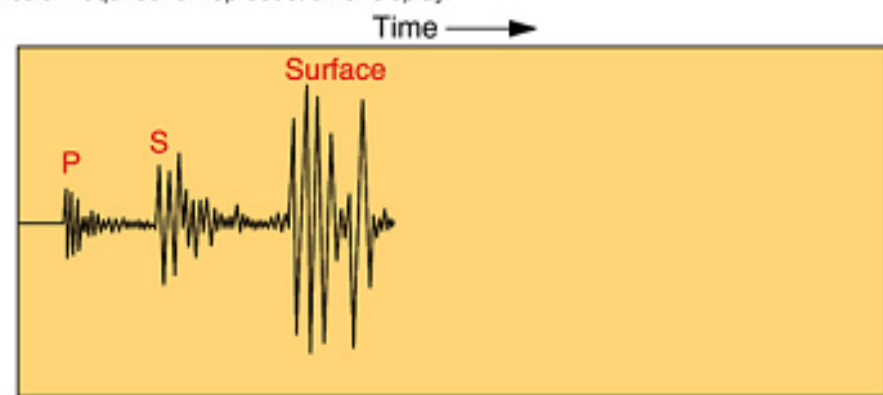
# Регистрация сейсмических волн на разных эпицентральных расстояниях



**A** Station near focus

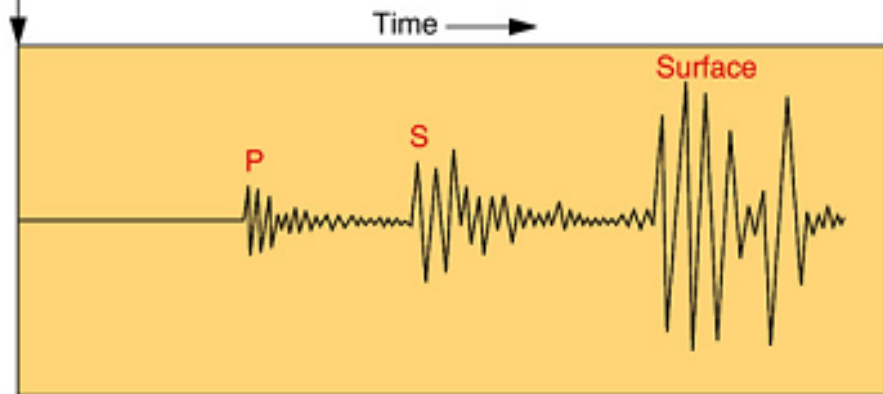


**B** Station far from focus



Seismogram from station A

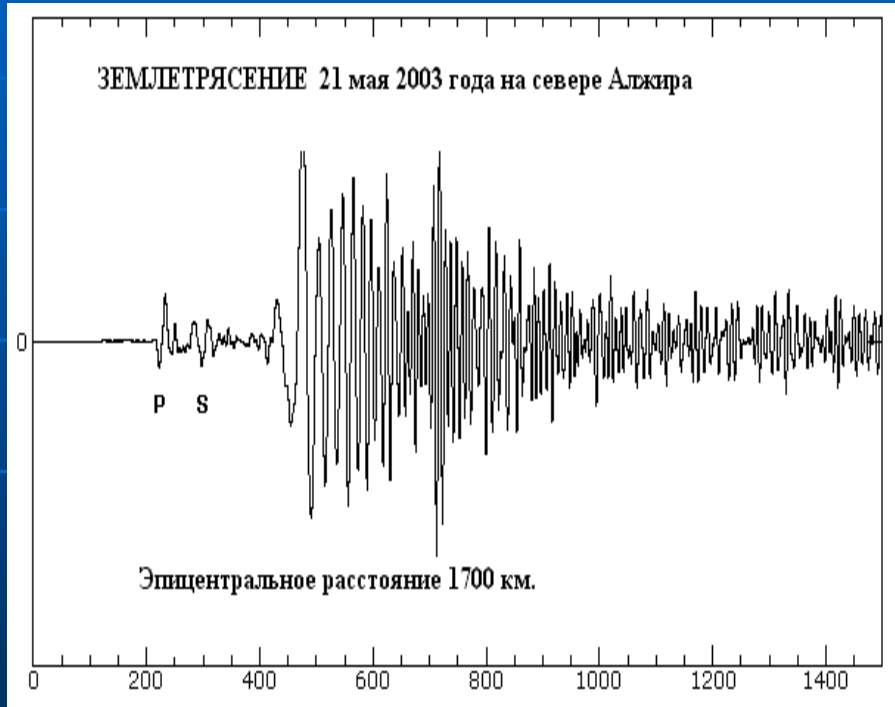
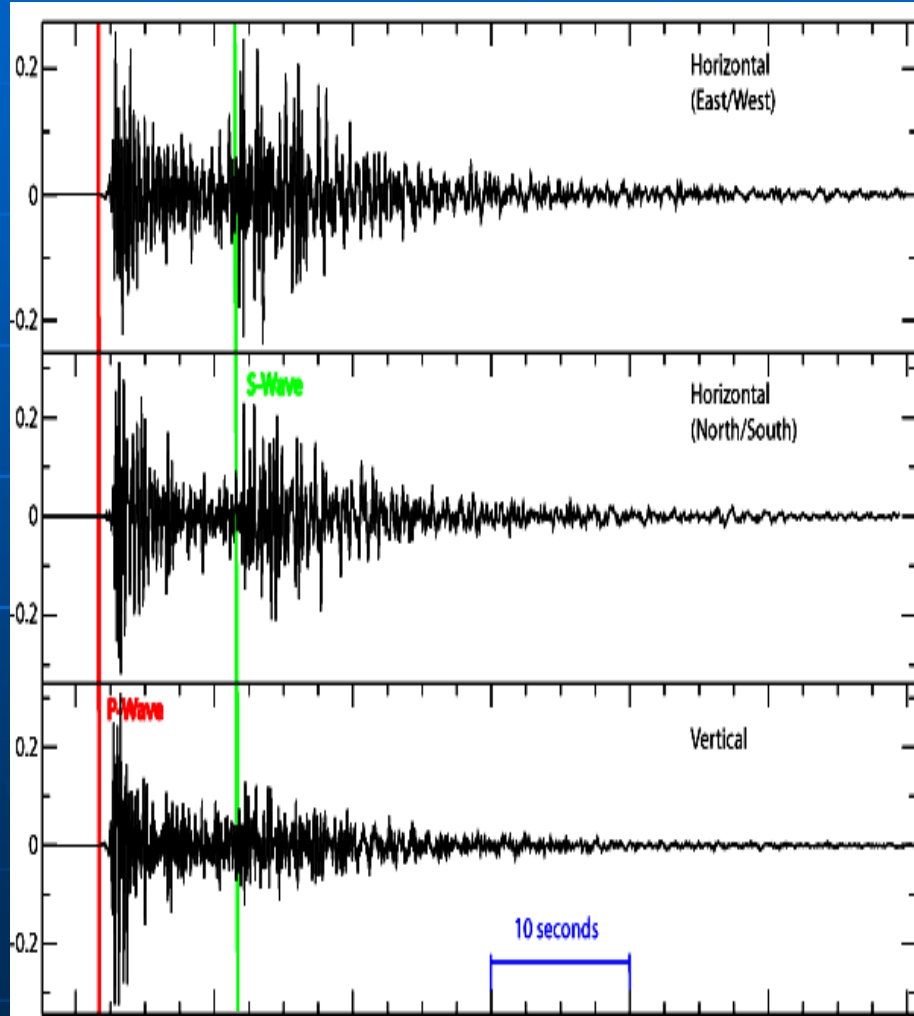
Time of earthquake



Seismogram from station B



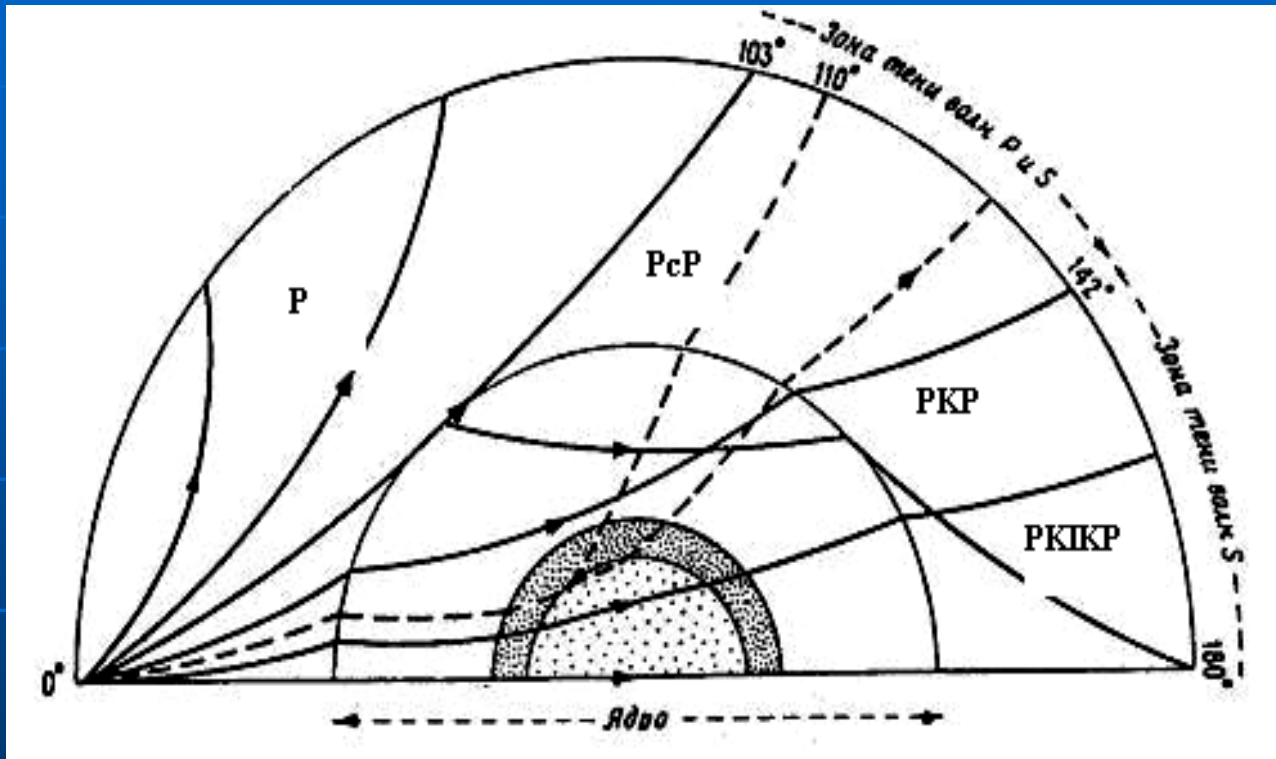
# Пример записи объемных и поверхностных волн на сейсмограммах.



Глубокофокусный очаг

Очаг вблизи поверхности Земли

# Прохождение продольных объемных волн через недра Земли



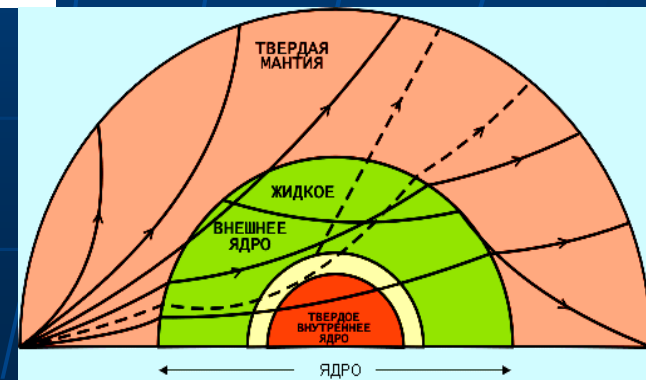
Зона тени P волн:  
 $103^\circ < \Delta < 142^\circ$

Зона тени S волн:  
 $103^\circ < \Delta < 154^\circ$

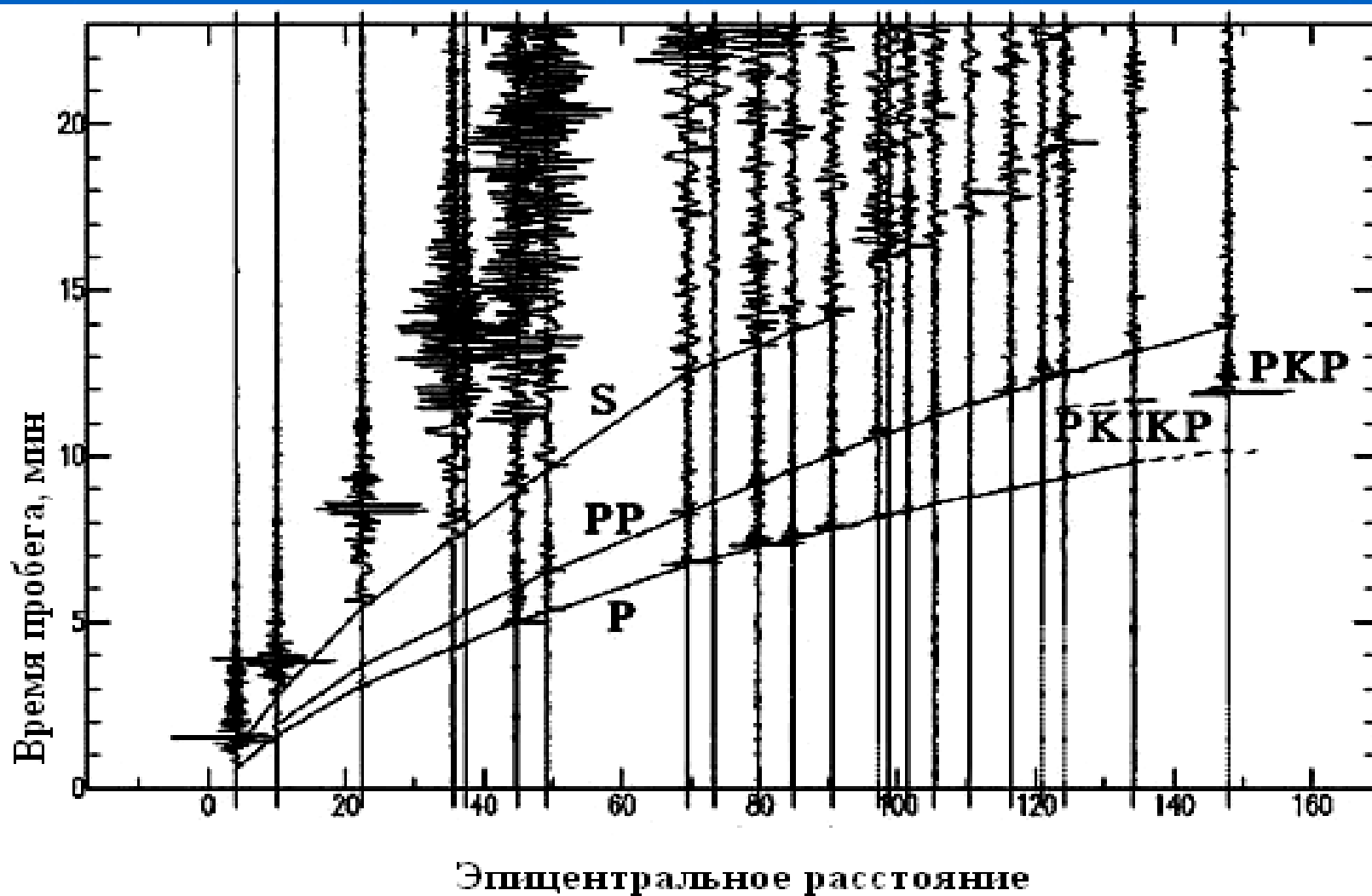
PcP – волна, отразившаяся от границы жидкого ядра

PKP – волна, прошедшая через жидкое ядро

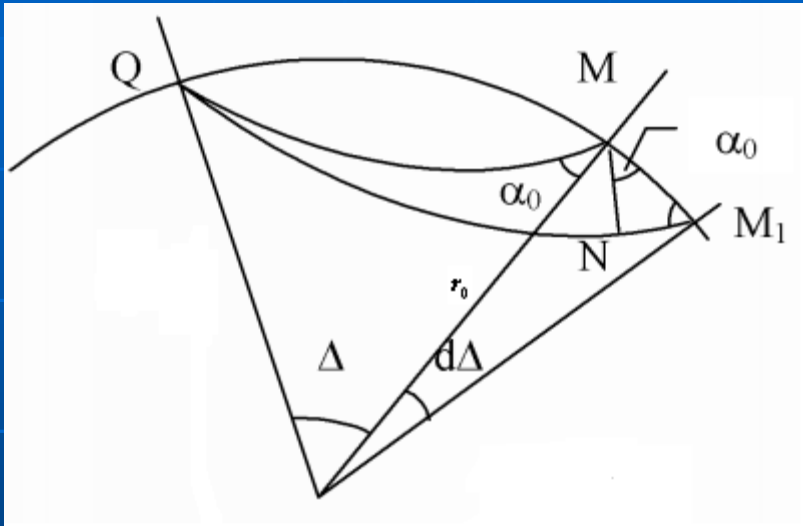
PKIKP – волна, прошедшая через твердое ядро



# Сейсмограммы объемных волн на разных эпицентральных расстояниях



# Годограф и параметр луча



Годографом сейсмической волны называется график зависимости времени пробега волны от эпицентрального расстояния:  $T(\Delta)$

Q – источник (очаг землетрясения)

M, M<sub>1</sub> – сейсмические станции

$\Delta$  - эпицентральное расстояние  
(угол с вершиной в центре Земли)

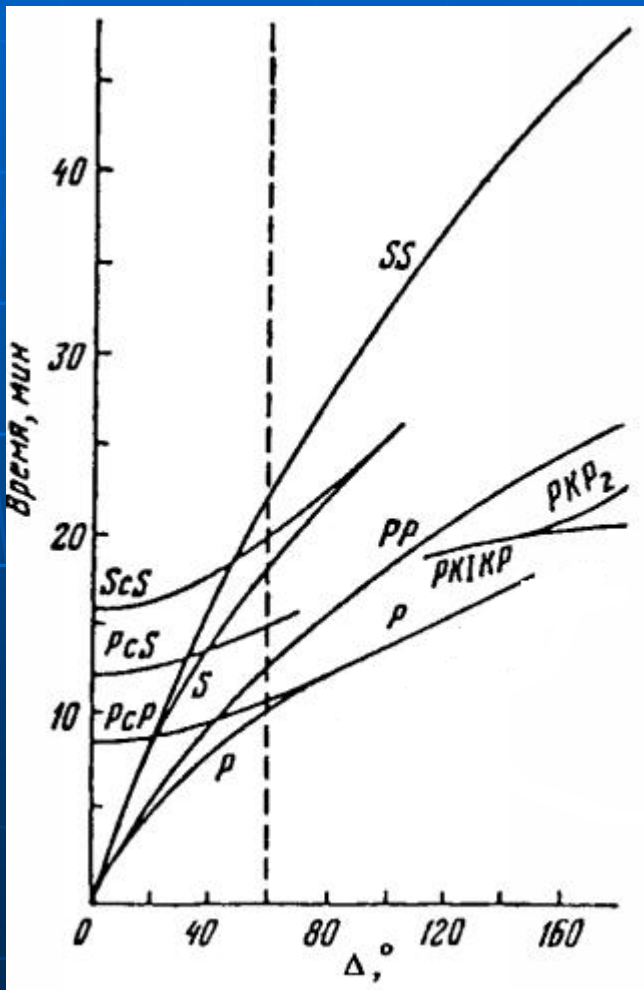
$$1^\circ = 111,1 \text{ км}$$

Из треугольника MNM<sub>1</sub>:  $NM_1 = MM_1 \sin \alpha_0$

$$\frac{dT(\Delta)}{d\Delta} = \frac{r_0 \sin \alpha_0}{V_0} = \dots = p = \text{const}$$

Производная годографа является параметром луча

# Построение годографов сейсмических волн



$$\eta = \frac{r}{V(r)} = t_{cm} - t_{оч};$$

$$\Delta = 2 \int_{r_m}^{r_0} \frac{p dr}{r \sqrt{\eta^2 - p^2}}$$

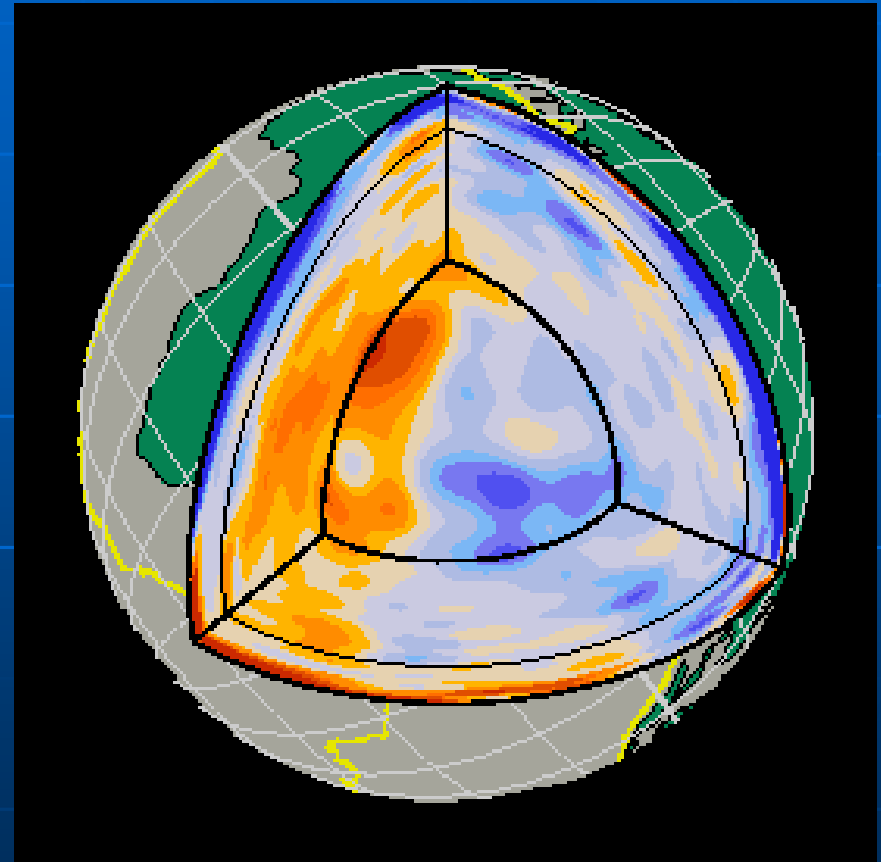
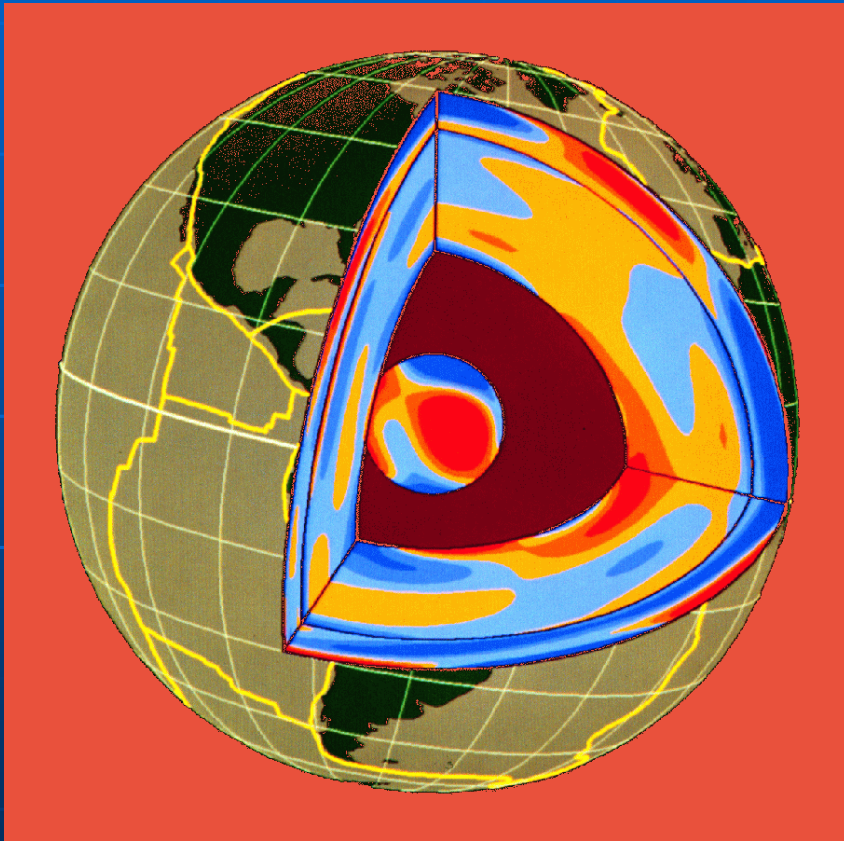
$$r_0 = R_{\text{Земли}}$$

$r_m$  — Глубина проникновения луча

Построение скоростного разреза Земли по заданному годографу называется задачей **обращения голографа**

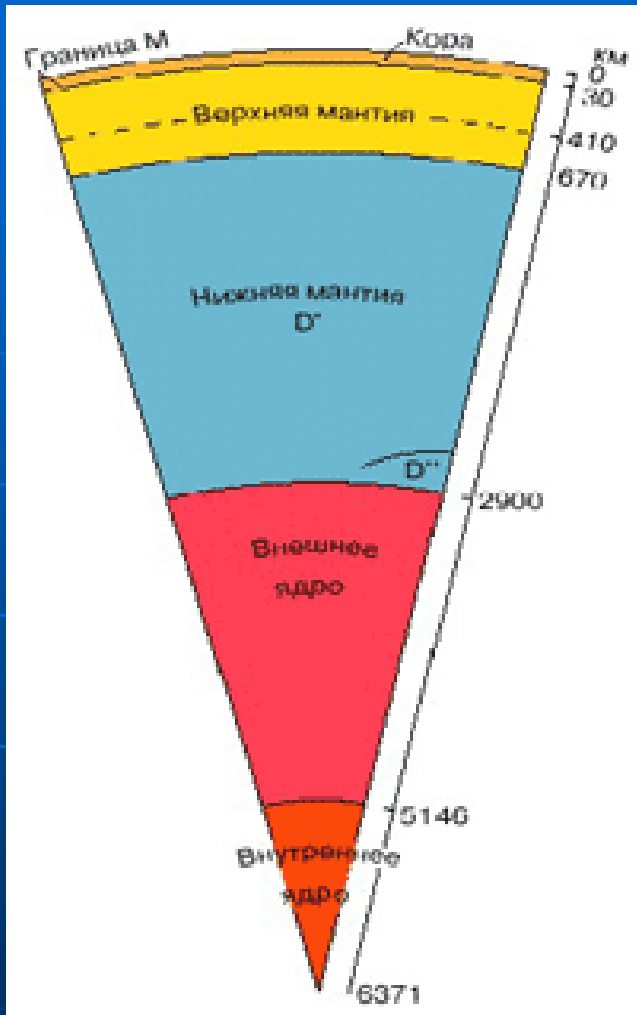


# Модели внутреннего строения Земли



# Под моделью внутреннего строения Земли

понимают разрез планеты, на котором показано изменение с глубиной таких важных параметров, как плотность, давление, ускорение силы тяжести, скорости сейсмических волн, температуры, электропроводности и др.



**Реальные модели** внутреннего строения Земли используют всю имеющуюся на момент составления геолого-геофизическую информацию.





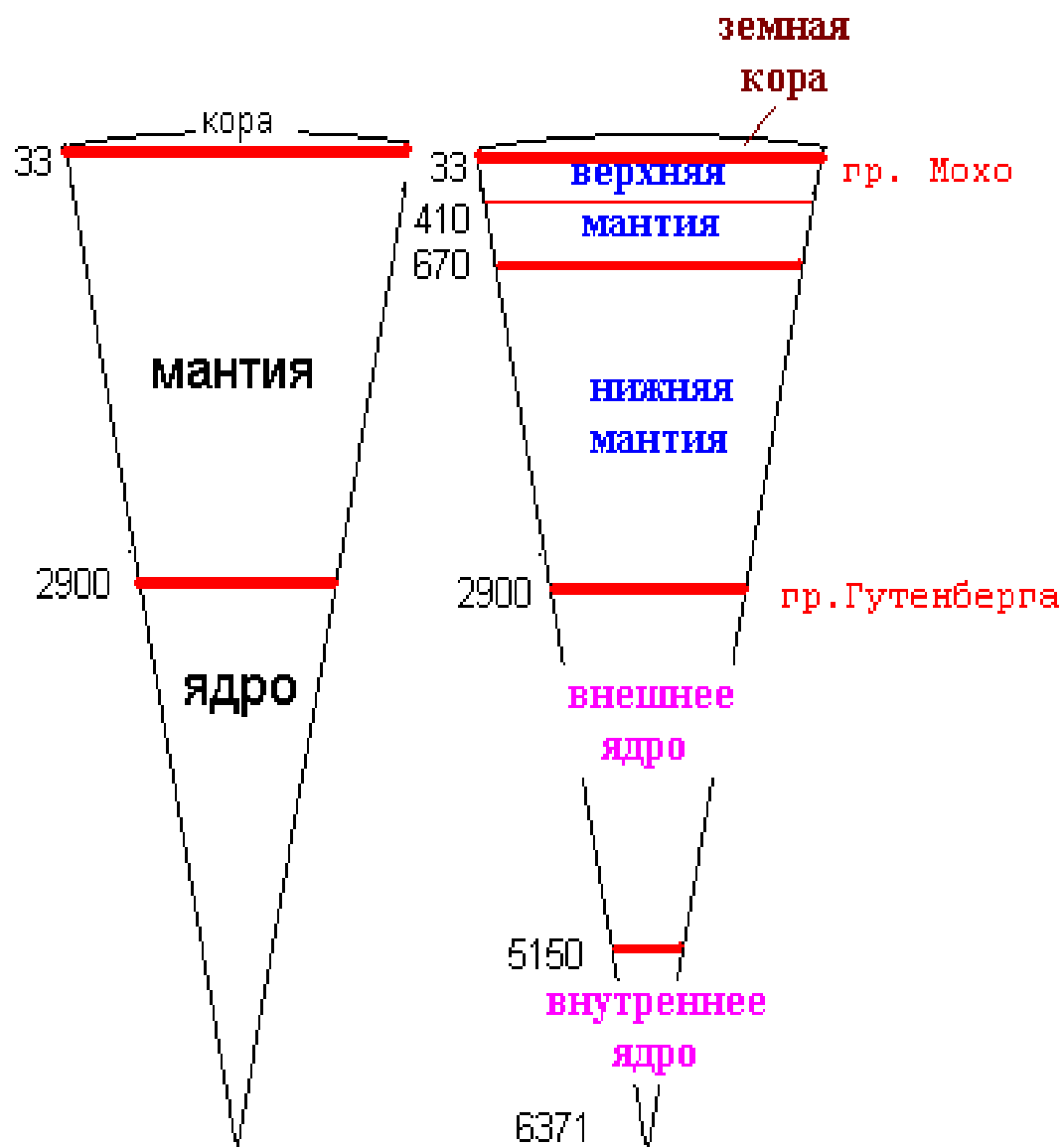
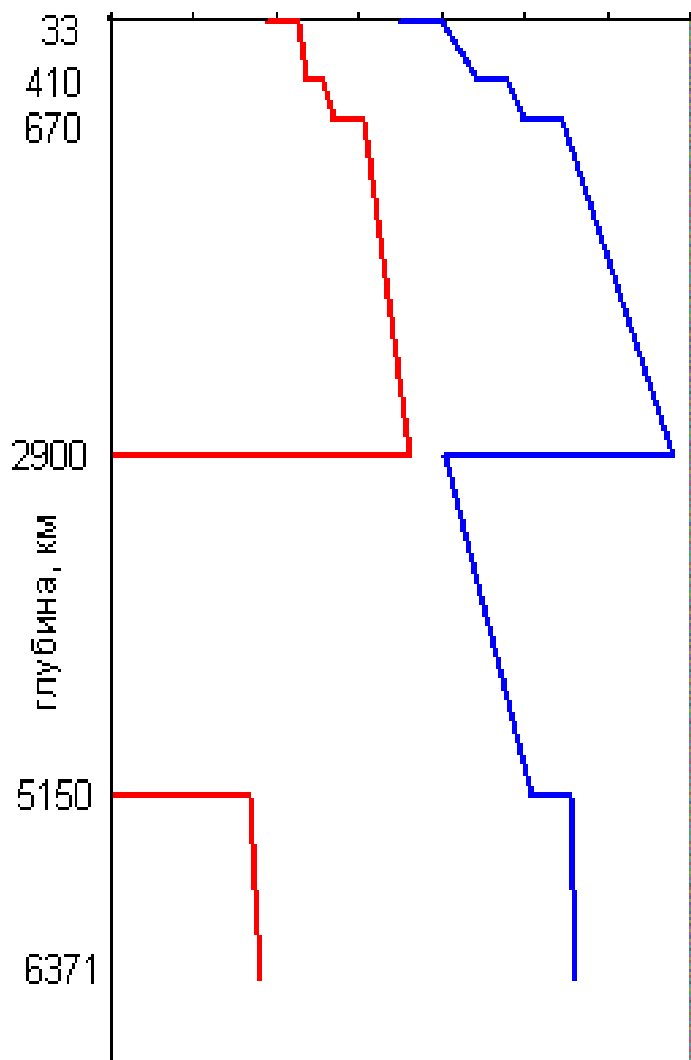
# Модель строения Земли Буллена, 1935г.

Зона	Наименование		Глубина	Плотность
A	Земная кора	Земная кора	~0-33 км	3,2 г/см <sup>3</sup>
Граница Мохоровичича (граница Мохо, граница M)				
B	Верхняя мантия	Мантия	33-400 км	3,5 г/см <sup>3</sup>
C	Переходная зона		400-1000 км	4,0 г/см <sup>3</sup>
D	Нижняя мантия		1000-2900 км	5,0 г/см <sup>3</sup>
Граница Вискерта-Гутенберга				
E	Внешнее ядро	Ядро	2900-4980 км	10-11 г/см <sup>3</sup>
F	Переходная зона		4980-5120 км	
G	Внутреннее ядро		5120-6370 км	12 г/см <sup>3</sup>

# Сейсмическая модель Земли

скорость сейсмических волн, км/с

0 2 4 6 8 10 12 14



# Модели строения земной коры

№	Слой	Глубина, км	$V_P$ км/с	$V_S$ км/с	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Давление, Кбар
<i>Континентальная модель</i>						
1.	Граниты	20	5,8	3,45	2,72	5,3
2.	Базальты	35	6,5	3,75	2,92	9,7
<i>Океаническая модель</i>						
1.	Вода	4	1,5	0	1,03	0,4
2.	Осадки	5	2,0	1,0	1,5	0,6
3.	Базальты	11	6,4	3,7	2,85	2,2

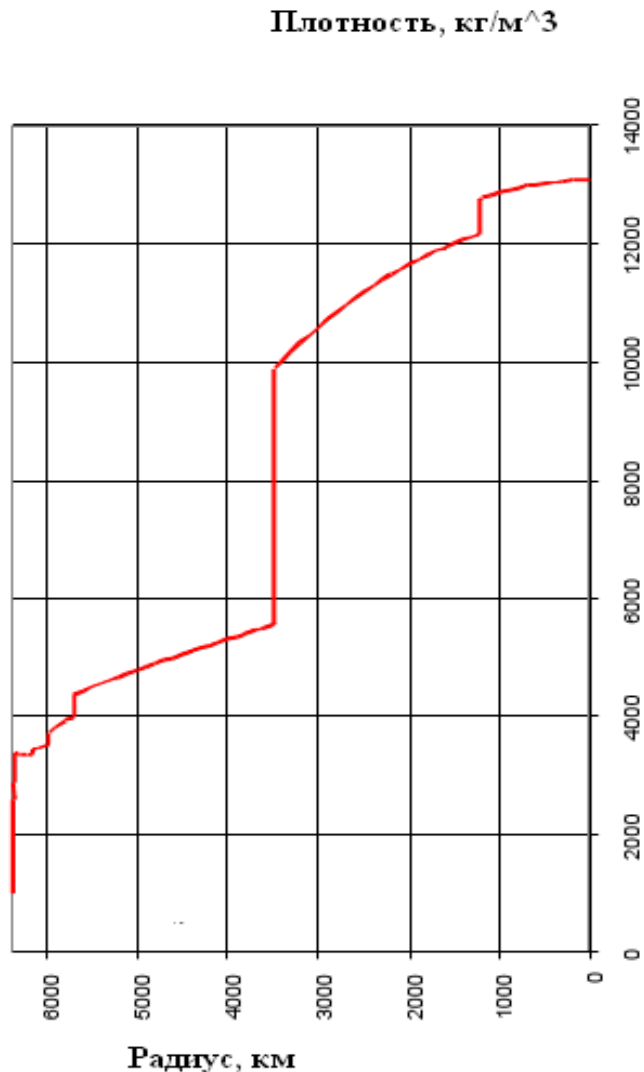
# Уравнение Вильямсона-Адамса

Сейсмический параметр:

$$\Phi = V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 = \frac{K}{\rho} = \frac{\Delta P}{\Delta \rho}$$

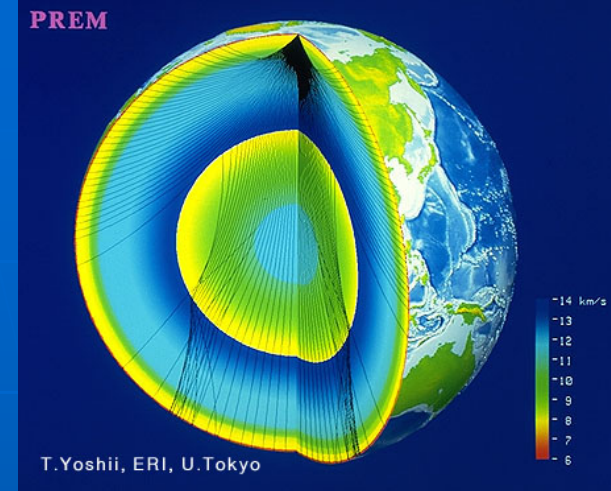
Литологическое давление:

$$\Delta P = \Delta \rho \times \Phi = \rho g \Delta h$$

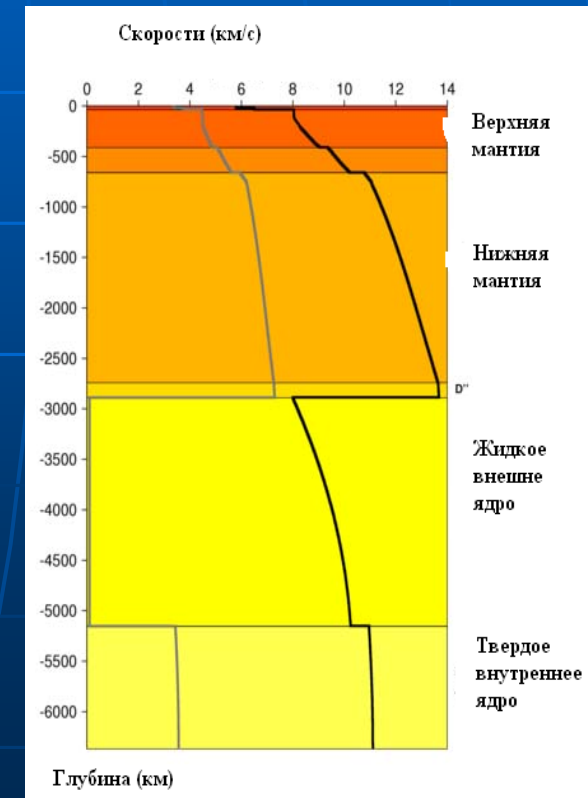


$$\frac{d\rho}{dh} = \frac{g}{\Phi} \rho$$

# Модель PREM



	Радиус,	Глубина,	Плотность,	$V_P$ , км/с	$V_S$ , км/с	$Q_\mu$
1	0	6371.0	13.08	11.26	3.66	85
2	1221.5	5149.5	12.76	11.02	3.5	85
3	1221.5	5149.5	12.16	10.35	0	0
4	3480.0	2891.0	9.90	8.06	0	0
5	3480.0	2891.0	5.56	13.71	7.26	312
6	3630.0	2741.0	5.49	13.68	7.26	312
7	5600.0	771.0	4.44	11.06	6.24	312
8	5701.0	670.0	4.38	10.75	5.94	312
9	5701.0	670.0	3.99	10.26	5.57	143
10	5771.0	600.0	3.97	10.15	5.51	143
11	5971.0	400.0	3.72	9.13	4.93	143
12	5971.0	400.0	3.54	8.90	4.76	143
13	6151.0	220.0	3.43	8.55	4.64	143



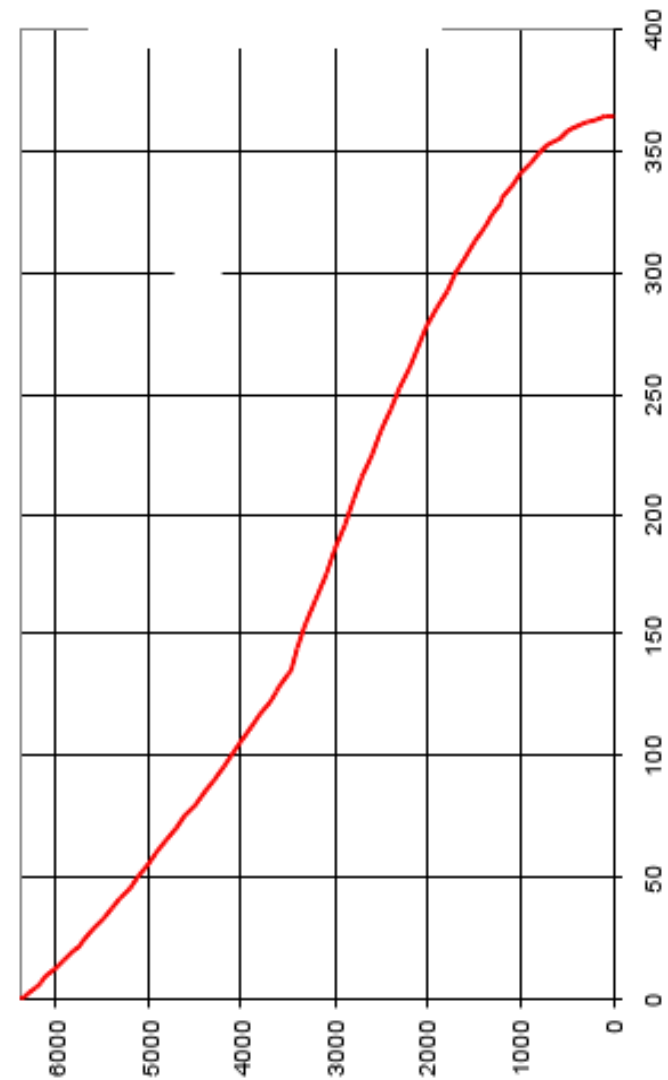
Preliminary References Earth Model

# Физические параметры в теле Земли.

Ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$

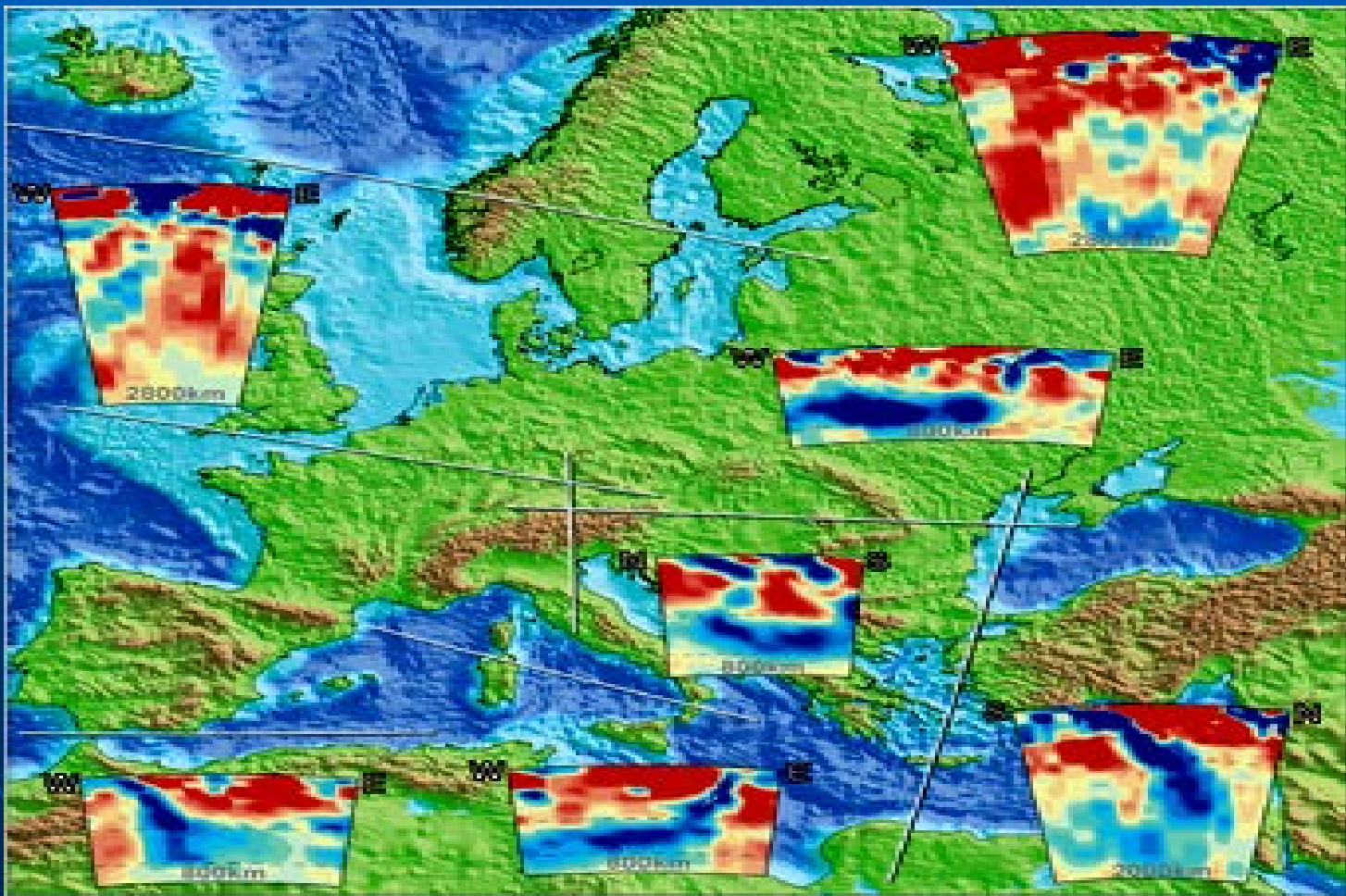


Давление, МПа

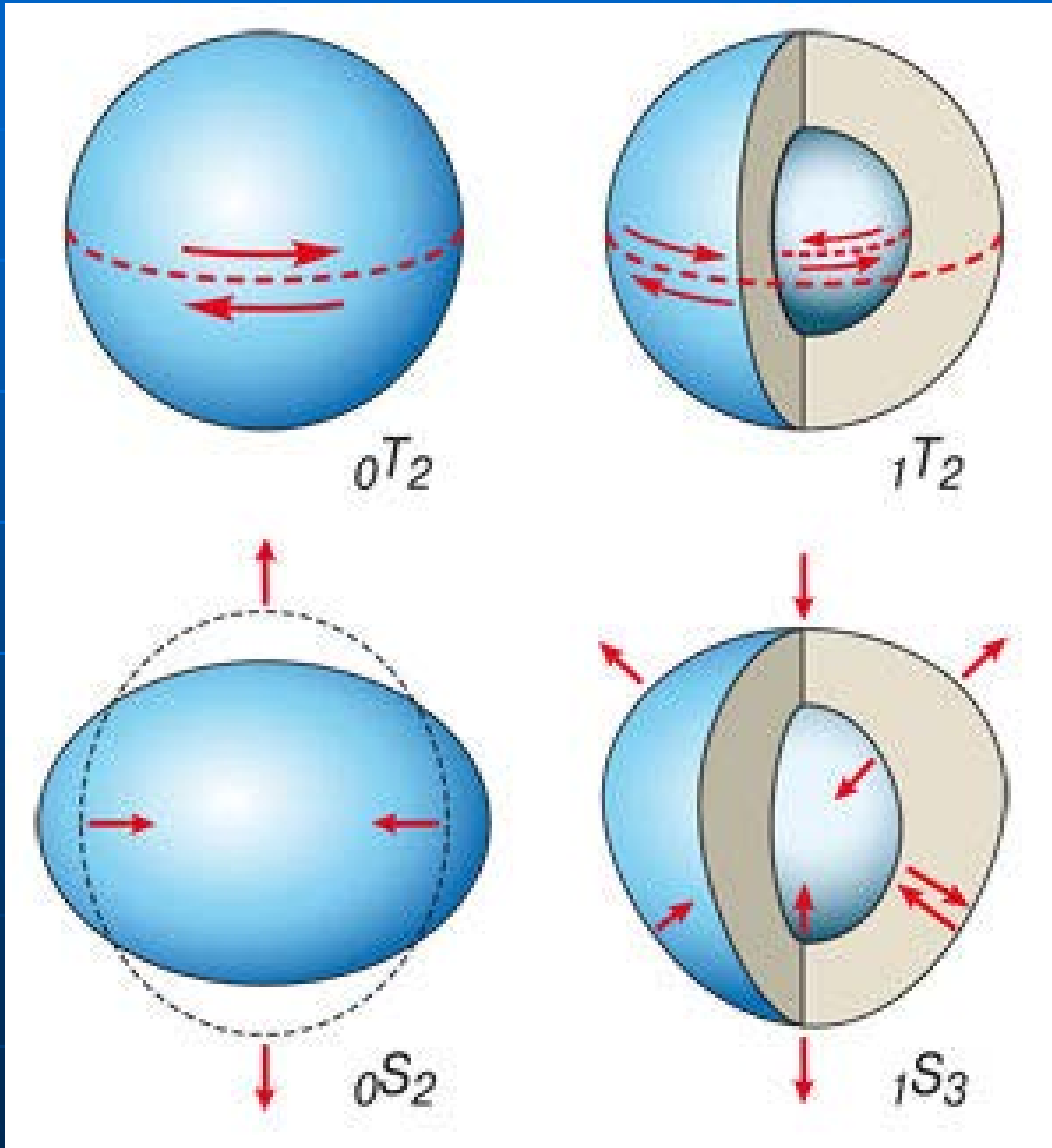


# Строение литосферы Европы методом сейсмической томографии.

Сейсмографическая томография это техника, которая используется для создания трехмерного изображения внутри Земли.



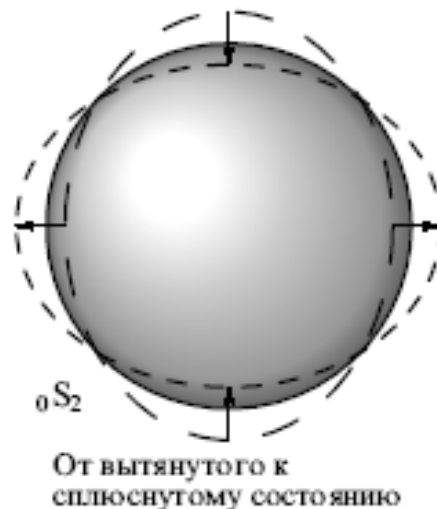
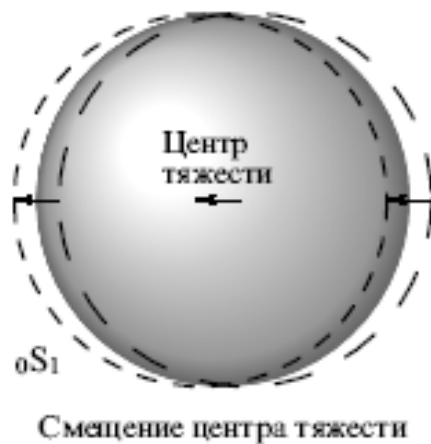
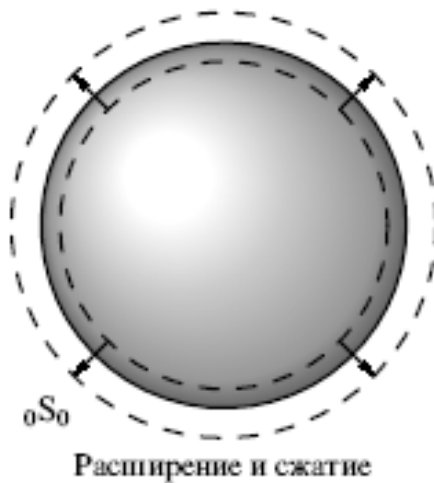
# Собственные колебания Земли



Собственные колебания Земли относятся к категории колебаний планетарного масштаба со значением периодов от десятка минут до часов и более. Они делятся на два больших класса. Впервые зарегистрированы после землетрясения 22 мая 1960 года.

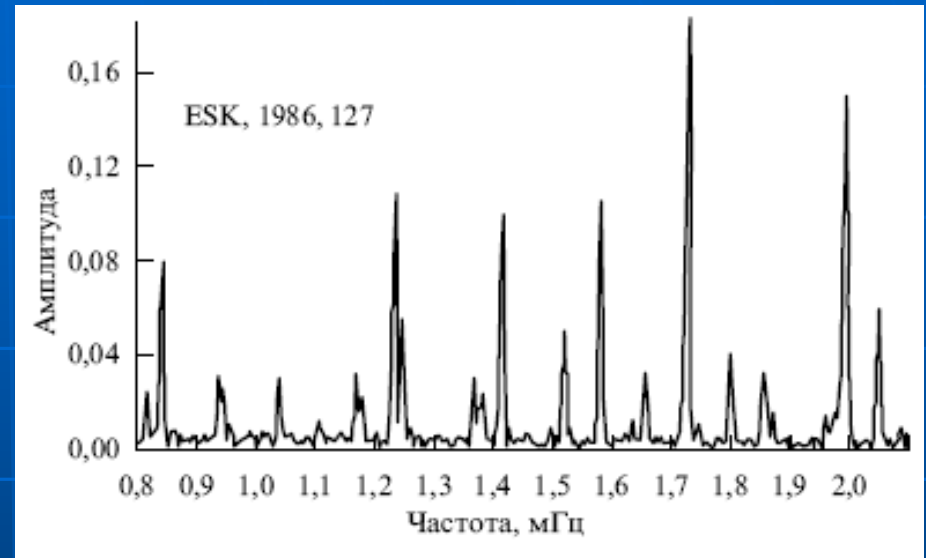
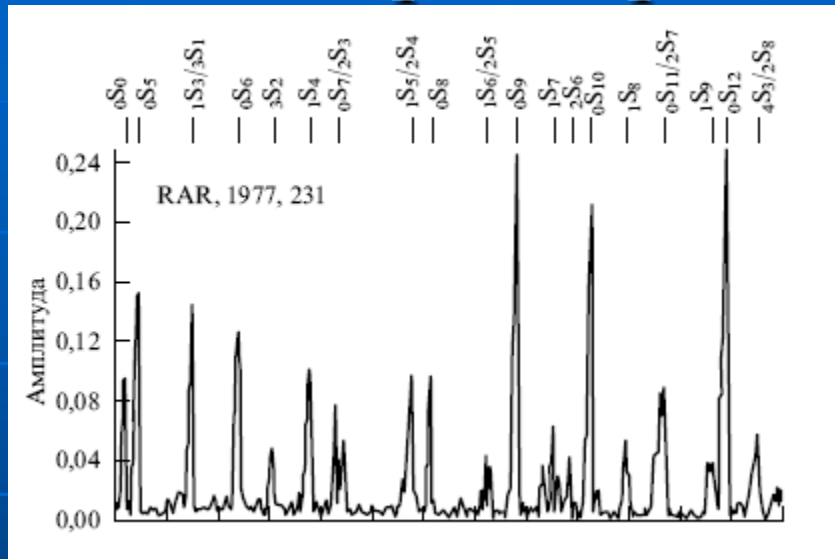


# Типы собственных колебаний Земли



- **а) сфероидальные** (вектор смещения материальных “точек” имеет составляющие как по радиусу, так и по направлению перемещения) и
- **б) крутильные, или тороидальные** (не связаны с изменением объема и формы Земли; материальные частицы перемещаются только по сферическим поверхностям).

# Спектры собственных колебаний Земли и параметры основных гармоник

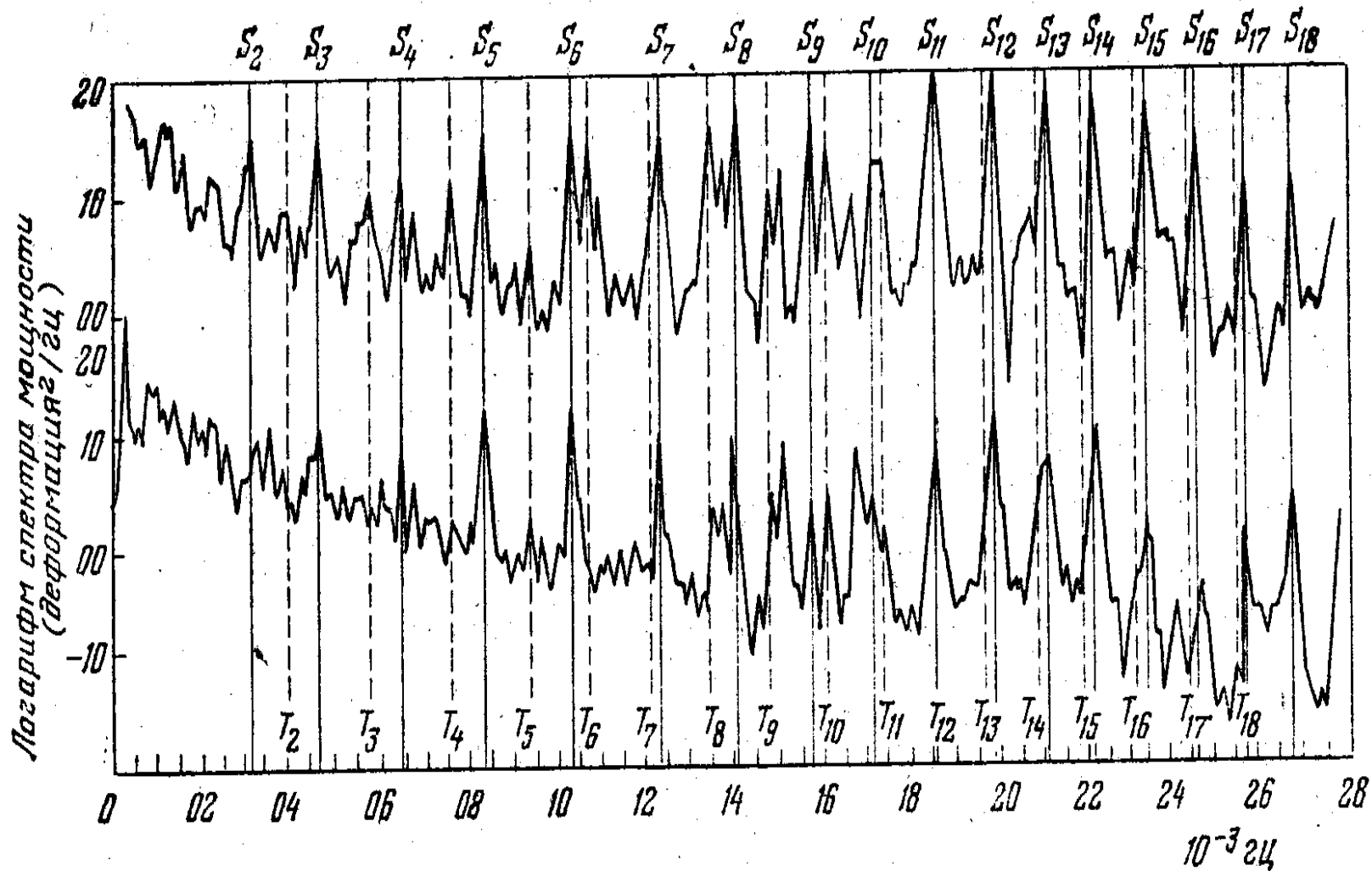


## Сфероидальные колебания

## Тороидальные колебания

Тип	Период, мин	Глубина проникновения, км.	Тип	Период, Мин.
${}^0S_0$	20,46	6370		
${}^0S_2$	53,84	5850	${}^0T^2$	43,94
${}^0S_3$	35,56	5500	${}^0T^3$	28,37
${}^0S_4$	25,76	5270	${}^0T^4$	21,72

# Спектры собственных колебаний Земли



# Затухание сейсмических волн

Амплитуда монохроматической  
волны:

$$A(\Delta, t) = A_0 \Delta^n e^{-(\alpha_r + \alpha_d)\Delta} \cos 2\pi \left( t - \frac{\Delta}{c} \right)$$

$A_0$  - Амплитуда волн в источнике

$\Delta$  - Эпицентрально-расстояние

$t$  - время

$c$  - Фазовая скорость

Затухание:  $\alpha = \alpha_r + \alpha_d$

$\alpha_r$  - Коэффициент рассеяния

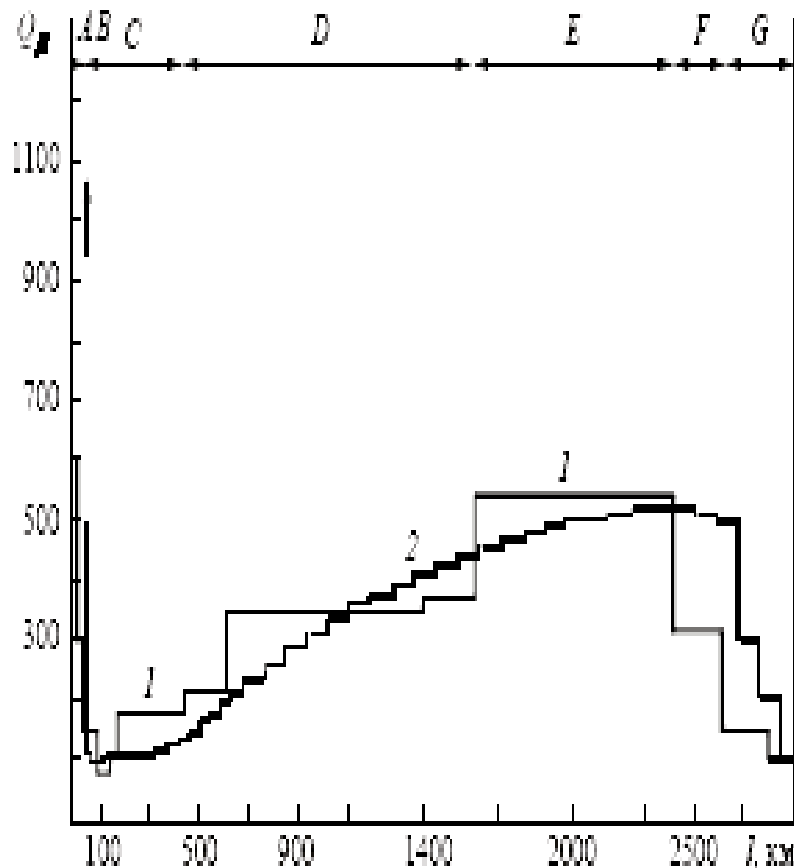
$\alpha_d$  - Коэффициент поглощения

Добротность:

$$Q_{P,S} = \frac{\pi f}{\alpha V_{P,S}}$$

$f$  - частота

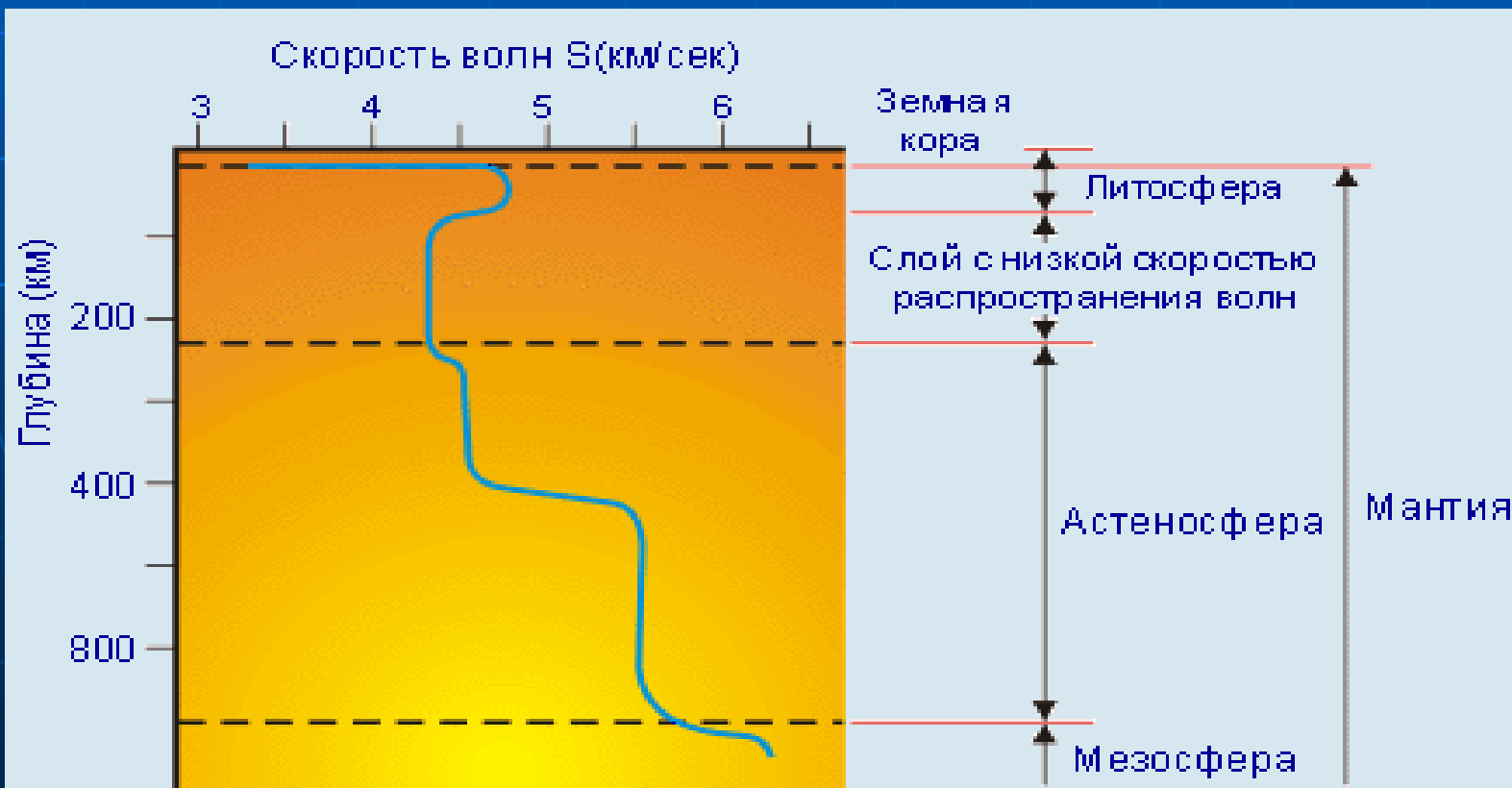
# Распределение механической добротности в коре и мантии Земли



- $A$  (0–38 км) – 1-я зона высоких  $Q$   $\mu$  (упругая литосфера);
  - $B$  (38–90 км) – неупругая литосфера;
  - $C$  (90–450 км) – 1-я зона низких  $Q$   $\mu$ ;
  - $D$  (450–1600) – 1-я зона промежуточных  $Q$   $\mu$ ;
  - $E$  (1600–2400 км) – 2-я зона высоких  $Q$   $\mu$ ;
  - $F$  (2400–2600 км) – 2-я зона промежуточных  $Q$   $\mu$ ;
  - $G$  (2600–2885 км) – 2-я зона низких  $Q$   $\mu$ .
- $1$  – модифицированное распределение  $Q$   $\mu$  из [Жарков, 1978];  
 $2$  – модель SLS [Anderson, 1978]

# Слой пониженной скорости в мантии Земли

Современная реальная модель Земли в соответствии с которой на глубине от 70 до 250 км была выделена литосфера, которая включила в себя земную кору и верхнюю часть мантии



# ОСНОВЫ ГЕОФИЗИКИ И ЭКОЛОГИИ



---

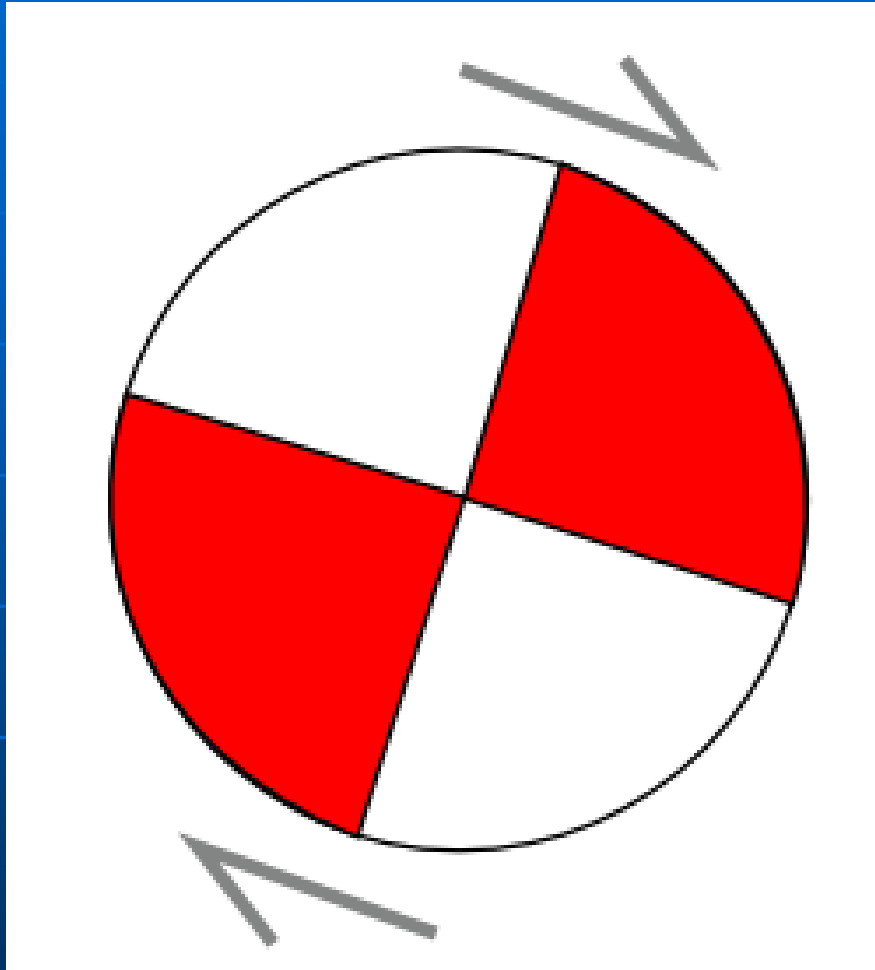
2015 Лекция №13

---

Воронина Елена Викторовна

*кафедра физики Земли*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*



# Механизмы очага землетрясений



# Понятие механизма очага.

- Механизм очага описывает неупругие деформации, возникающие в области очага землетрясения (**подвижку**) и генерирующие упругие сейсмические волны
- Механизм очага определяет ориентацию разрыва и **направление подвижки**, а также – ориентацию главных осей напряжений сжатия и растяжения в пространстве
- Графически представляется в виде **стереографической проекции очаговой сферы на поверхность Земли.**

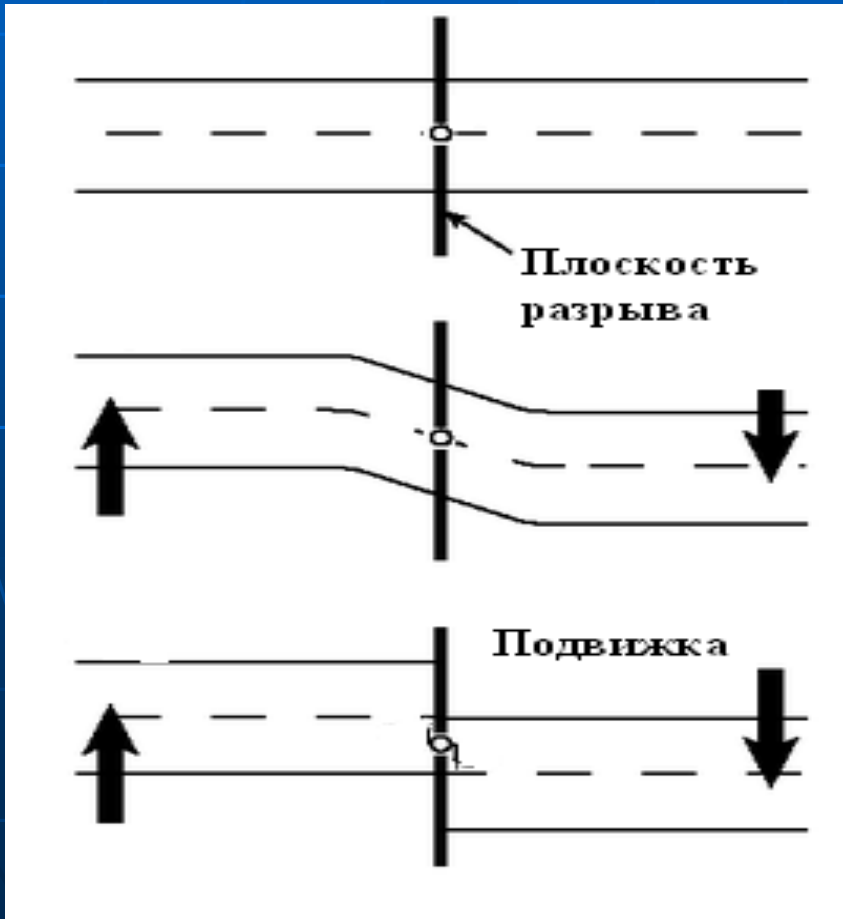
# Теория упругой отдачи

## Г.Ф.Рейда, 1911г.

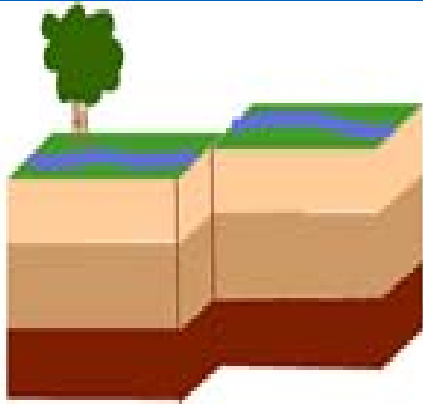


### Определение очага

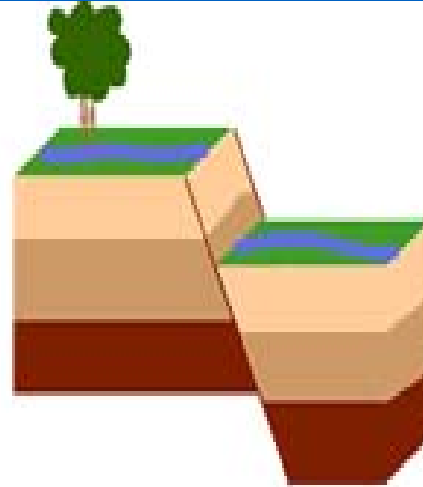
- Очаг землетрясения – **разрыв** сплошности среды.
- Разрыв возникает когда величина внешних **напряжений превосходит предел прочности горных пород**
- Разрыв сопровождается **сдвигом**
- Разрыв распространяется в среде со скоростью, **меньшей скорости  $S$  волн**
- Сложный очаг состоит и нескольких разрывов.



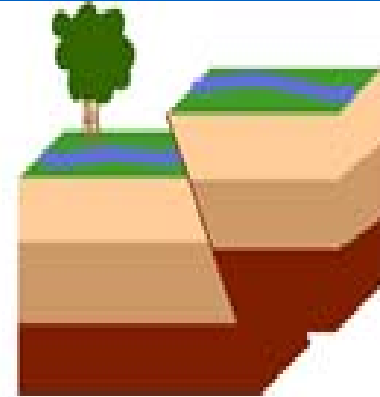
# Типы разломов на поверхности Земли и ориентация главных напряжений.



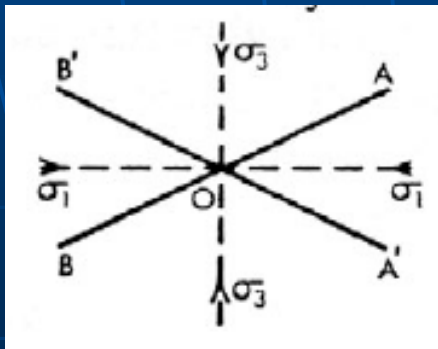
Сдвиг



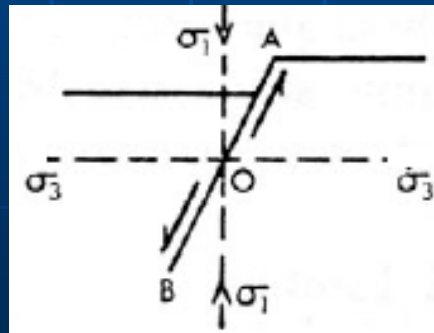
Сброс



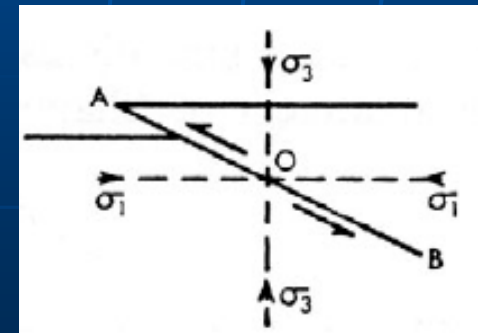
Взброс



Сдвиг

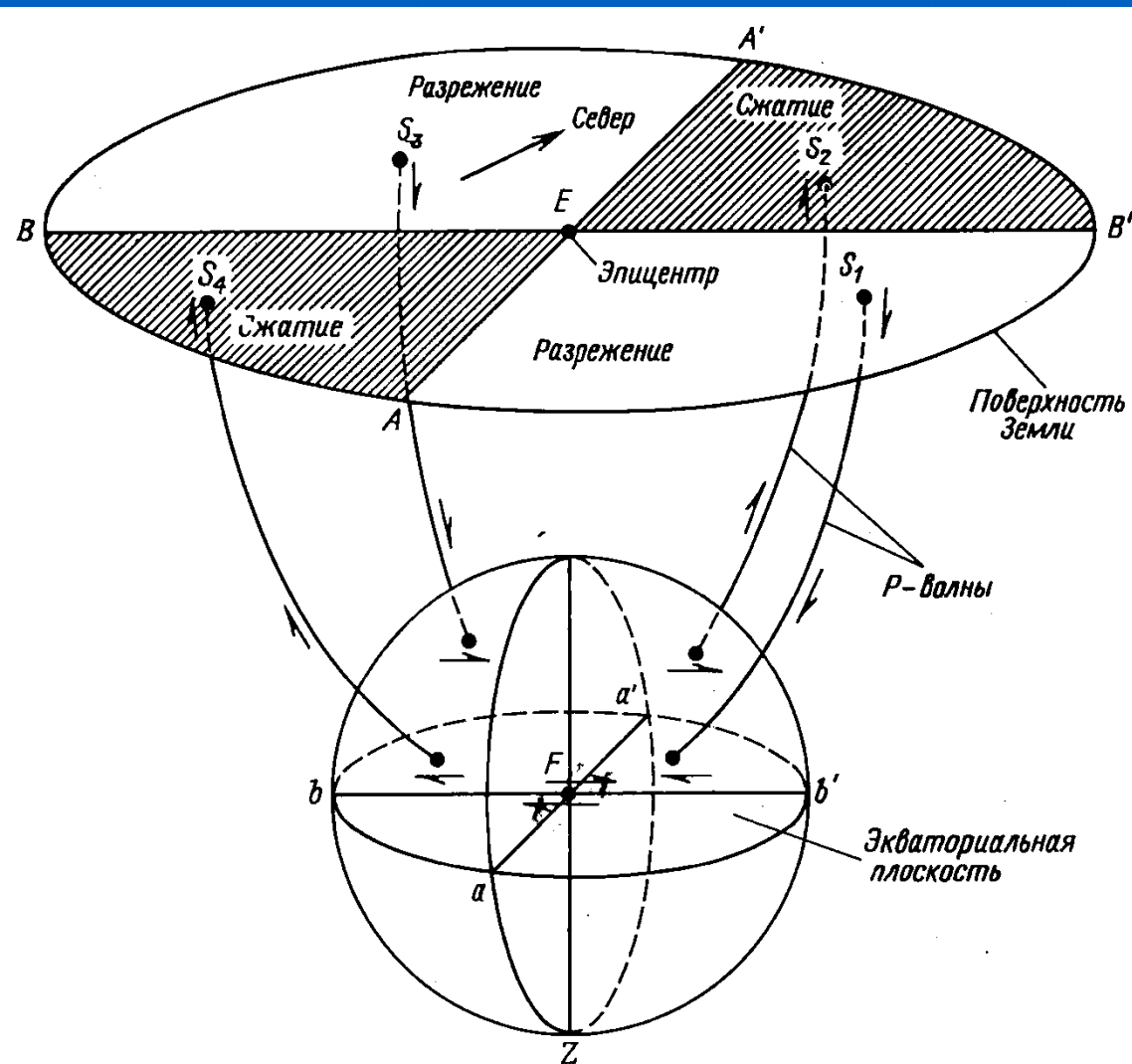


Растяжение



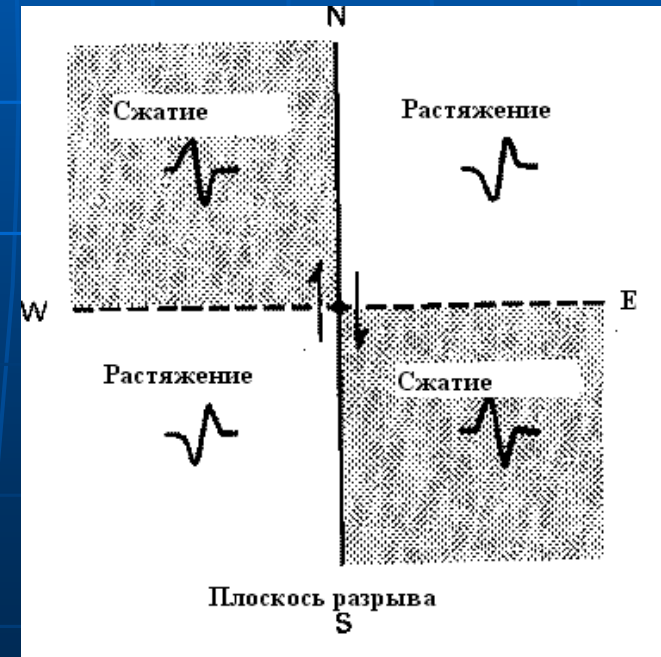
Сжатие

# Квадрантное чередование знаков вступлений Р волн в разных направлениях от источника на поверхности Земли



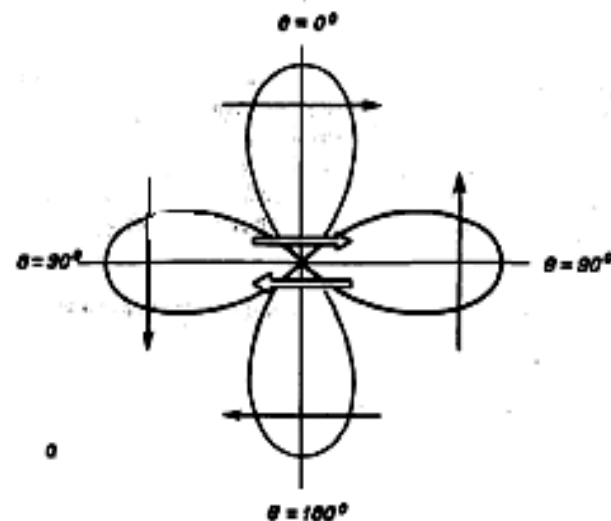
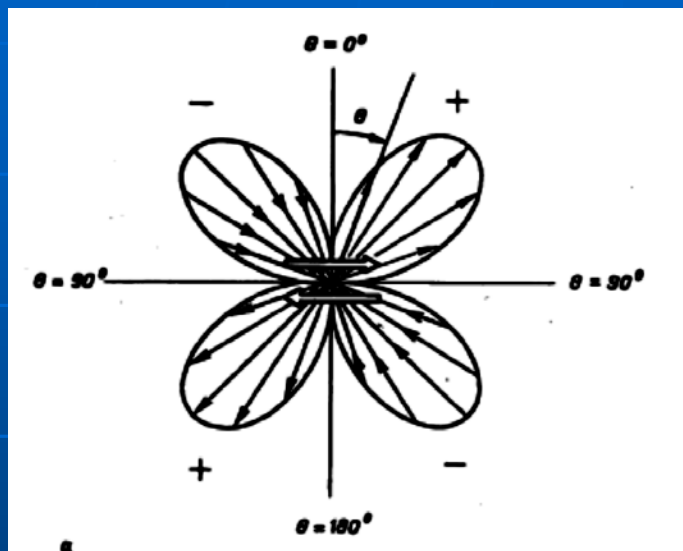
Очаг большинства  
землетрясений  
представляет собой

**СДВИГ**

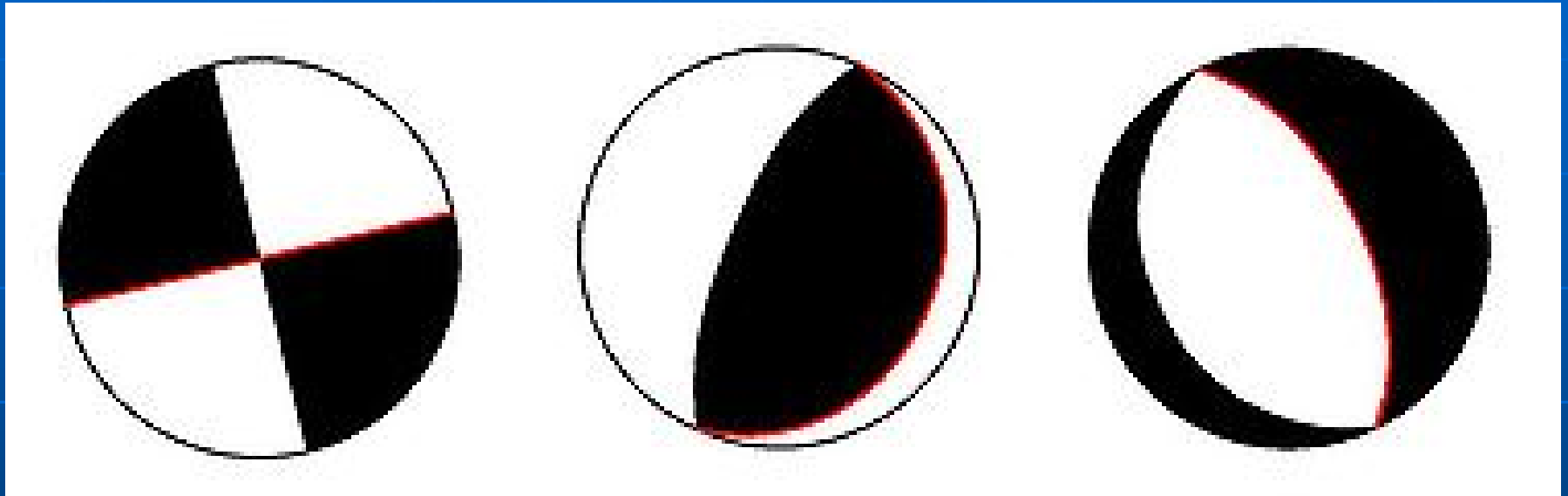


Вид сверху

Диаграммы направленности излучения Р и S волн, вызванного источником сдвигового типа в плоскости постоянного азимута и на сфере с центром в источнике.



# Связь типа механизма очага с тектоникой региона.

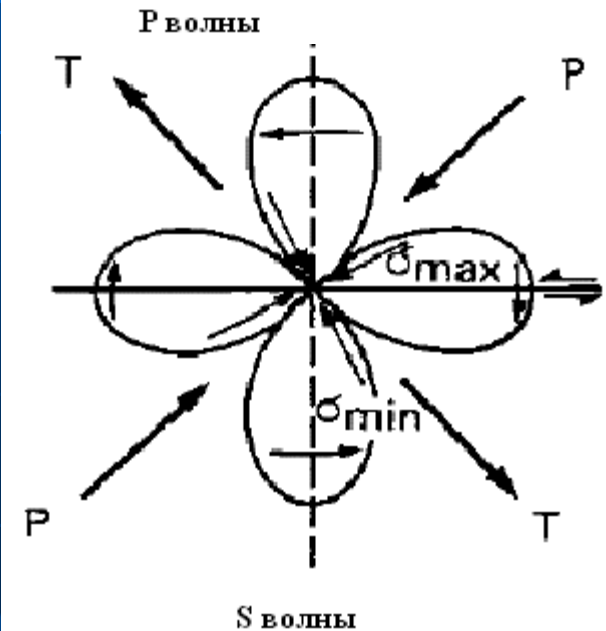
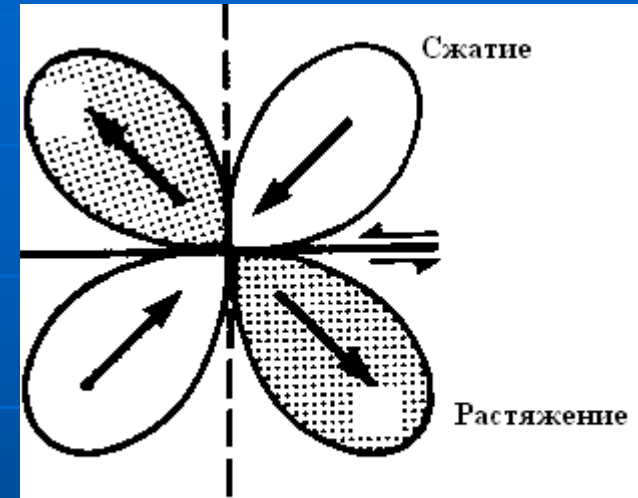
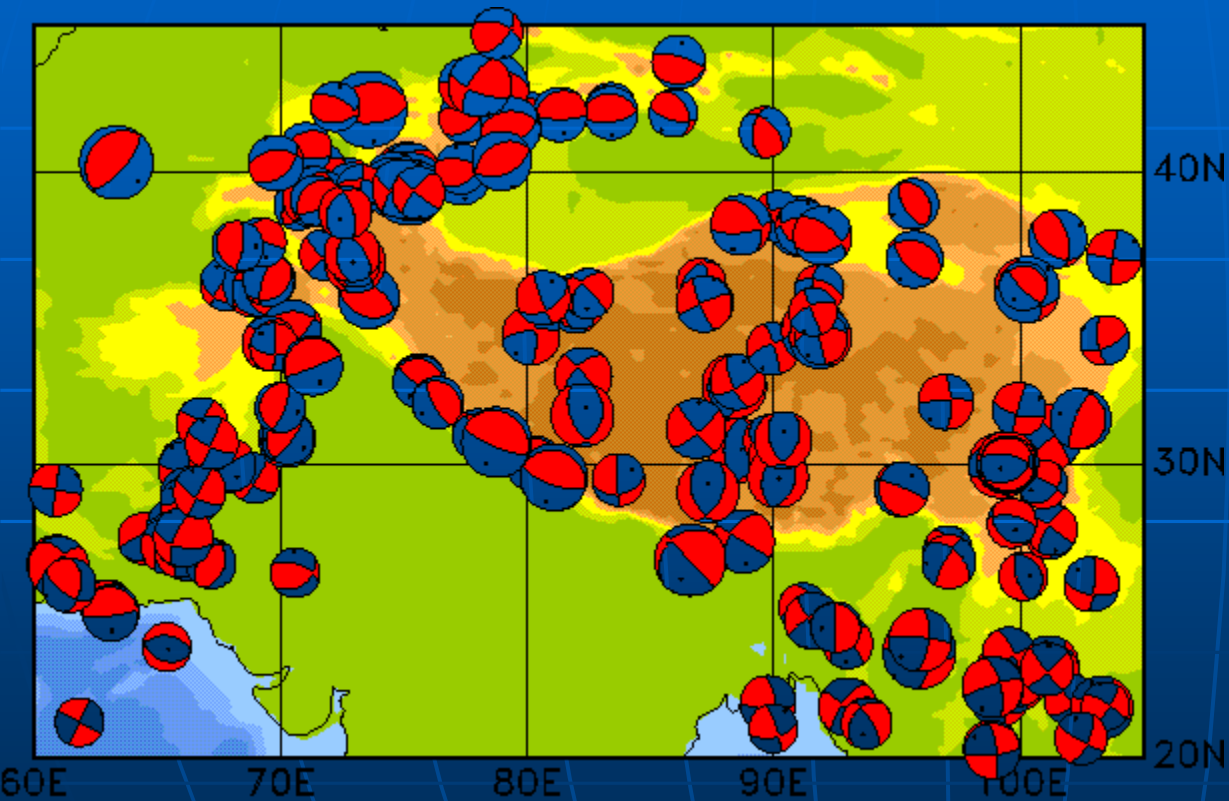


**Сдвиг** –  
Трансформные  
разломы: Сан-  
Андреас,  
Северо-  
Анатолийский

**Взброс** –  
конвергентные  
границы плит,  
горные системы,  
зоны субдукции,  
островные дуги

**Сброс** –  
Дивергентные  
границы плит,  
рифтовые  
системы, зоны  
спрединга

# Механизмы очага землетрясений.

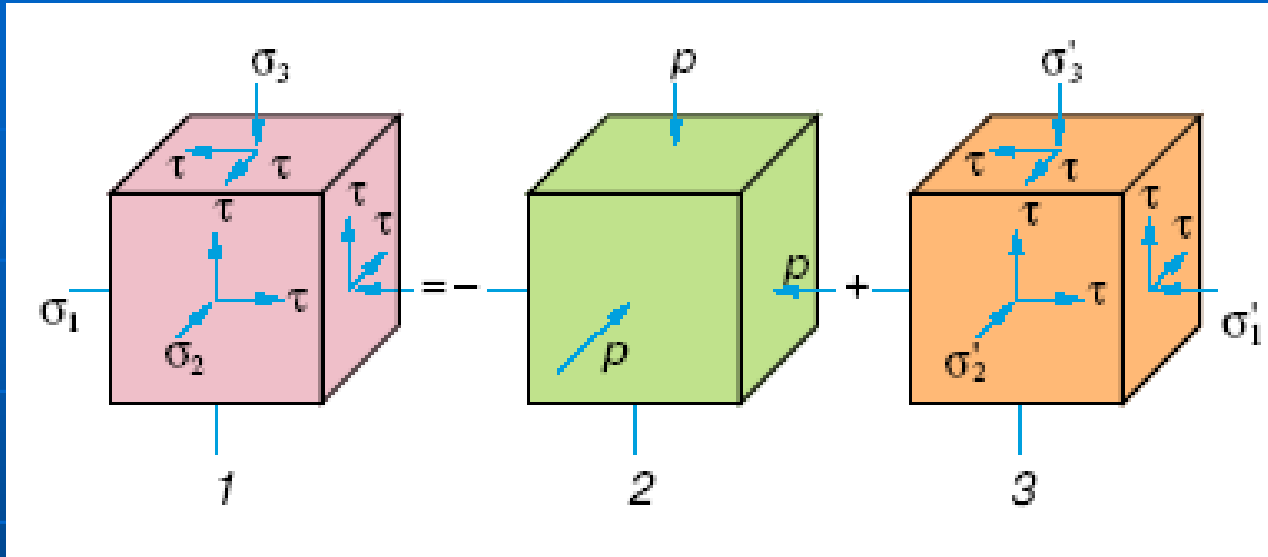


# Источники напряженного состояния литосферы Земли.

- **Эндогенные**- связаны с внутренними процессами в недрах, такими как термогравитационная неустойчивость вещества Земли. Это основная составляющая, варьирующая в интервале **50-500МПа**.
- **Экзогенные** – связаны с процессами на поверхности Земли:
  1. ледниковые покровы,
  2. заполнения водохранилищ,
  3. откачка нефти и газа и другими последствиями деятельности человека.
- **Космические:**
  1. изменение скорости вращения Земли изменяет напряжения в диапазоне **0,1-1МПа**,
  2. Приливное взаимодействие приводит к вариации напряжений в интервале **1-10МПа**.



# Тензор напряжений.

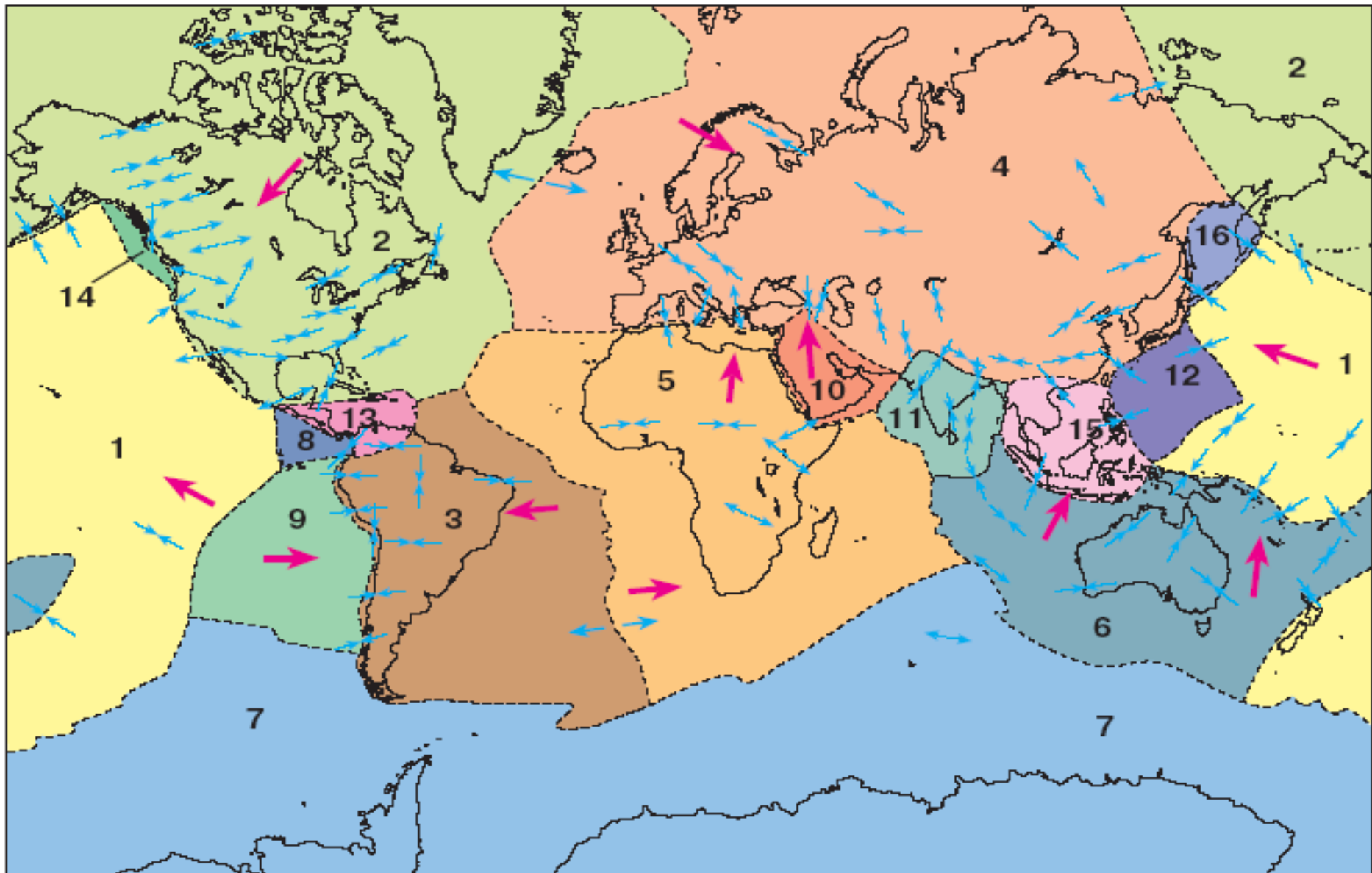


$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} P & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & P \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} (\sigma_1 - P_0) & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & (\sigma_2 - P_0) & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & (\sigma_3 - P_0) \end{vmatrix}$$

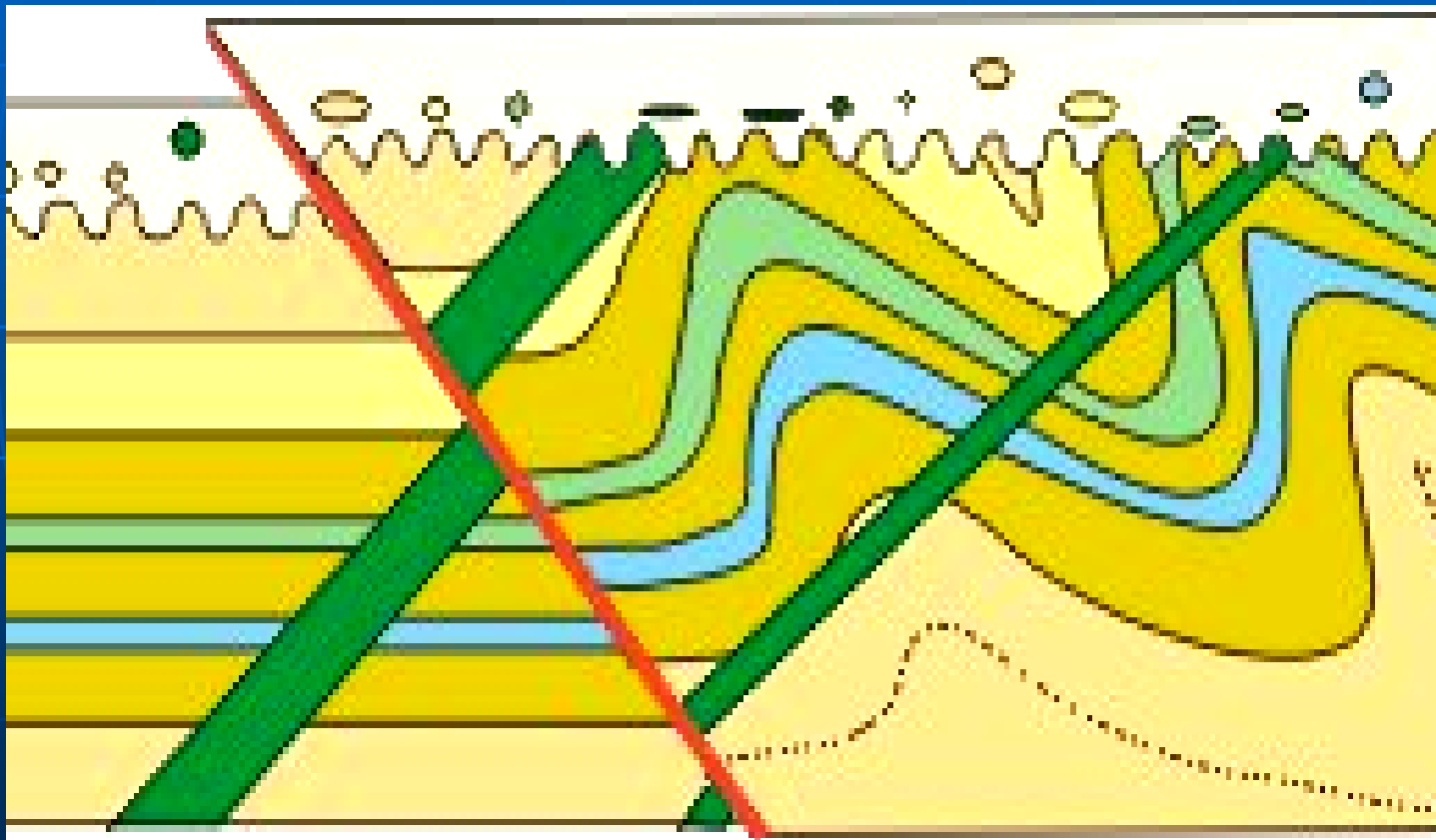
Литологическое  
давление

Девiator сдвига

# Ориентация современного поля напряжений на поверхности Земли.



# Реология недр Земли.



# Основные понятия.

- **РЕОЛОГИЯ** (от греческого rheos-течение, поток и logos-слово, учение), наука, изучающая деформационные свойства реальных тел.

Термин предложен Ю. Бингамом; официально принят в 1929г.

Реологические свойства вещества - совокупность свойств, определяющих способность горных пород изменять во времени напряжённо-деформированное состояние в поле действия механических сил. К основным реологическим свойствам относятся: упругость, пластичность, прочность, вязкость, ползучесть, релаксация напряжений.

- **УПРУГОСТЬ** — свойство горных пород восстанавливать исходную форму и размеры после снятия механической нагрузки.
- **ПЛАСТИЧНОСТЬ** горной породы - способность горной породы деформироваться под действием внешнего давления без разрыва сплошности среды и изменять природную форму после прекращения воздействия внешних сил.
- **ВЯЗКОСТЬ** обусловлена пластической деформацией. Различают вязкость динамическую и кинематическую, представляющую собой отношение динамической вязкости к плотности вещества. Единицы измерения вязкости (СИ): динамической —  $1 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; кинематической —  $1 \text{ м}^2/\text{с}$ .
- **ПОЛЗУЧЕСТЬ** — медленная непрерывная пластическая деформация горных пород под воздействием постоянной нагрузки или механических напряжений.
- **РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ** состоит в убывании упругой и возрастании пластической деформации при неизменной общей.

# Элементы моделей реологической среды.

Тело Гука –упругая модель

$$\sigma \cong \mu \epsilon$$

$$\sigma_{xx} = (2\mu + \lambda)\epsilon_{xx} + \lambda(\epsilon_{yy} + \epsilon_{zz})$$

Тело Ньютона –вязкая модель

$$\sigma \cong \eta \dot{\epsilon};$$

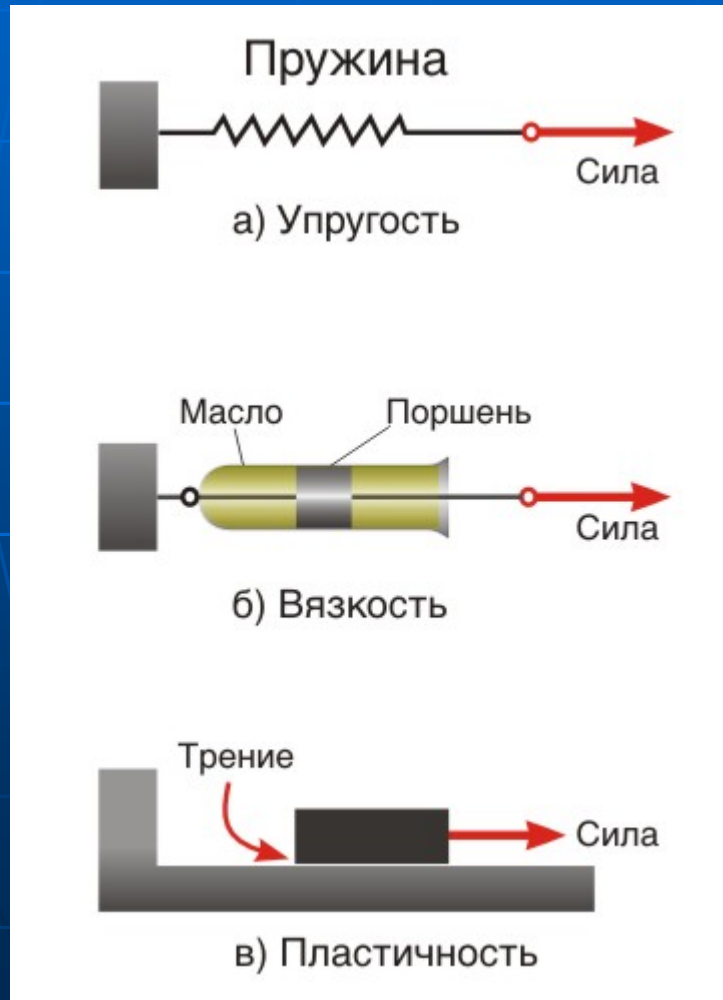
$$\sigma_{xy} = \lambda \theta + 2\eta \frac{d\epsilon_{xx}}{dt}$$

$\eta$  – ВЯЗКОСТЬ

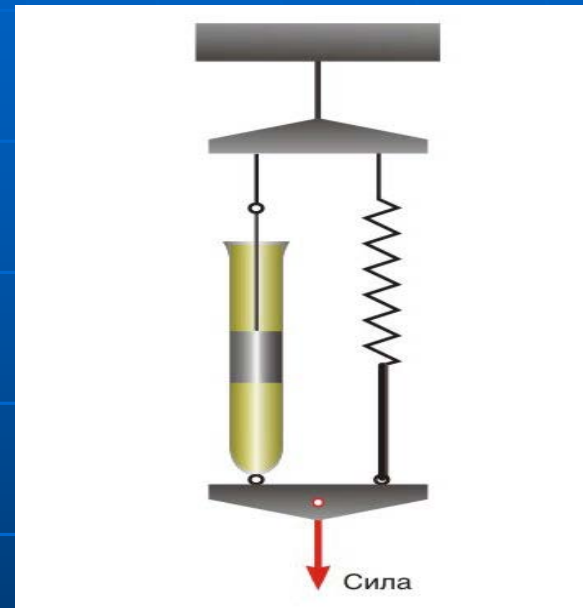
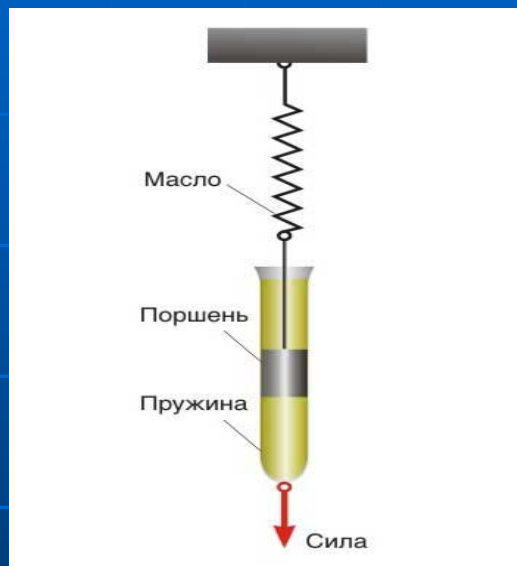
$$\theta = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$$

Тело Сен - Венана -

идеально пластичная модель



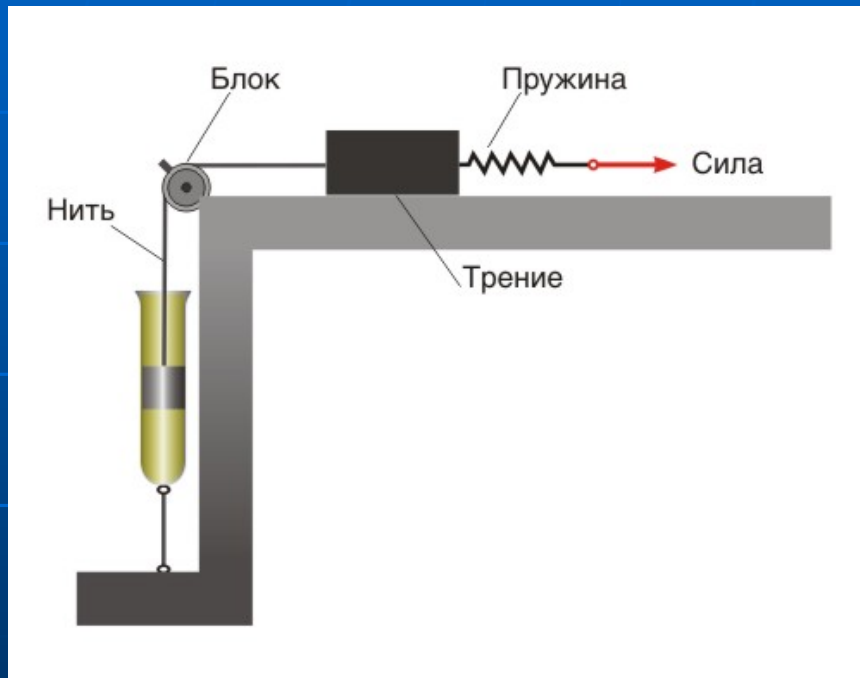
# Модели вязкоупругой среды: релаксирующее тело Максвелла и тело Кельвина. Реологические уравнения.



$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{\mu} + \frac{\sigma}{\eta}$$

$$\sigma = \mu\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}$$

# Модель вязкопластической среды Бингама



$\sigma < \sigma_T$  - упругое тело

$\sigma > \sigma_T$

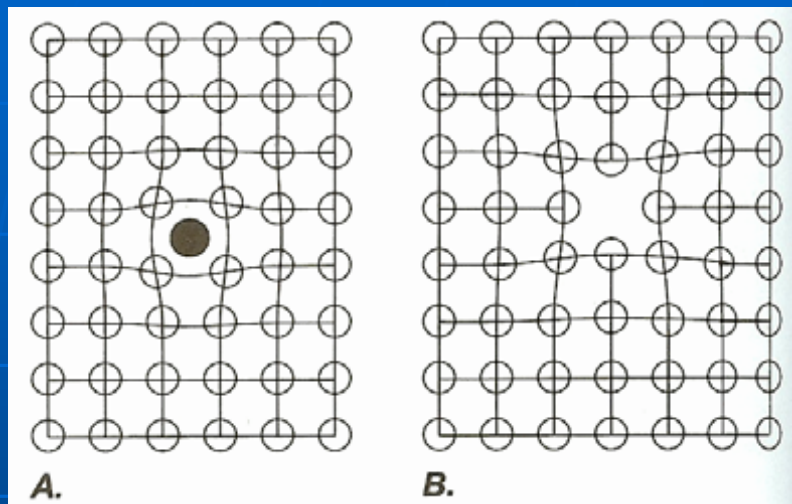
$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{\mu} + \frac{\sigma - \sigma_T}{\eta}$$

$\sigma_T$  — предел текучести

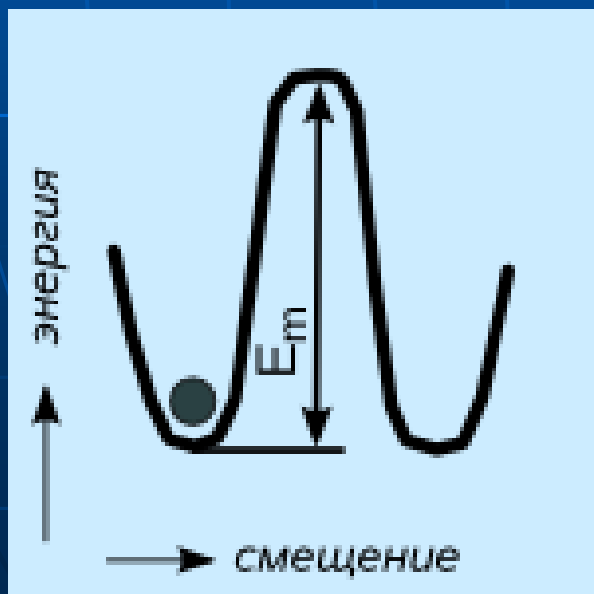
Описывает поведение густых смазок



# Точечные дефекты кристаллической структуры



**Дефектами кристалла** называют всякое нарушение симметрии кристалла — идеальной периодичности кристаллической решётки. Они бывают **точечными** и **линейными** (дислокации).



Дефекты при повышенной температуре обладают высоким коэффициентом самодиффузии

# Диффузионная вязкость.

описывает течение вещества при температурах, близких к температурам плавления

$$\eta_1 = A \frac{kT}{D\alpha} \left( \frac{l}{\alpha} \right)^2 ;$$

$$\left( \frac{l}{\alpha} \right) \cong 10^{10}$$

- средний размер кристаллических зерен,

$\alpha$  - постоянная кристаллической решетки,

$1500K \leq T \leq 1800K$  - абсолютная температура,

$D$  - коэффициент самодиффузии.

$$A \cong 1/30 - const$$

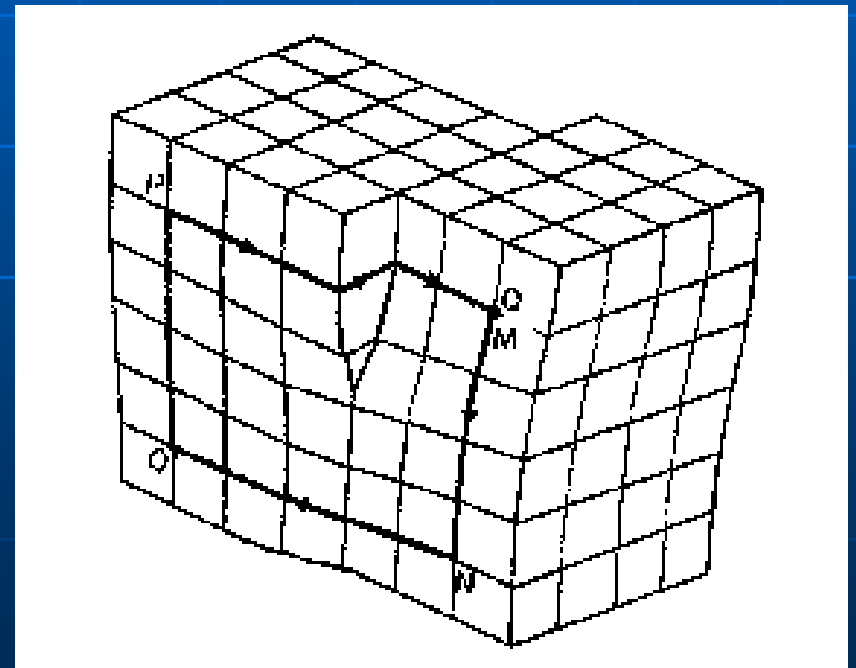
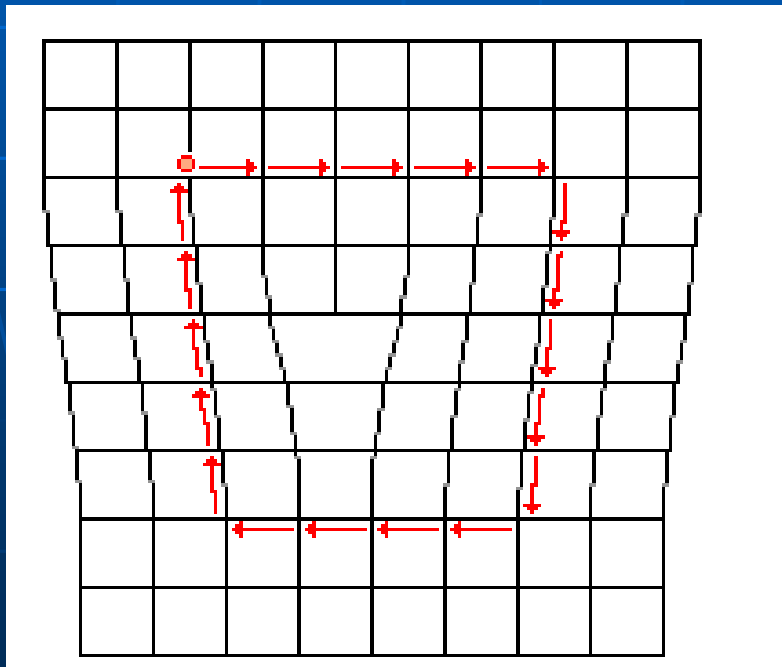
$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E(\rho)}{kT}\right);$$

$E(\rho)$  - энергия активации

$k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана,

# Краевая и винтовая дислокации.

Пластическое течение кристаллических твердых тел может быть обусловлено движением **линейных дефектов – дислокаций**.



# Дислокационная вязкость.

$$\eta_2 = \frac{1}{2} \frac{\tau}{\gamma_0} \left( \frac{\mu}{\tau} \right)^3 e^{\beta};$$

$\tau$  - касательное напряжение,

$\mu$  - модуль сдвига

$\gamma_0 - \mathit{const}$  - деформация

$$\eta_2 \sim \tau^{-2}$$

$$\beta = \frac{E(\rho)}{T}$$

Дислокационная вязкость мантии Земли обратно пропорциональна квадрату сдвиговых напряжений и имеет место три температурах близких к температурам поверхности Земли

# Эффективная вязкость.

$$\eta_m = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2}$$

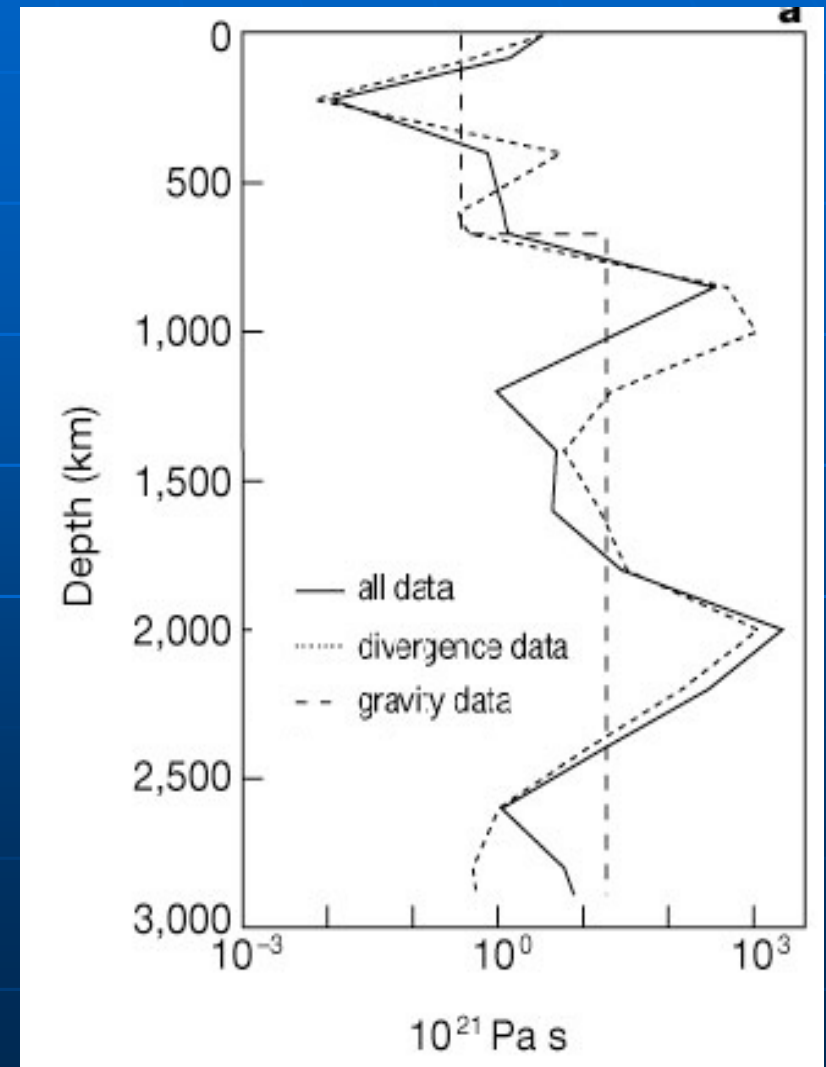
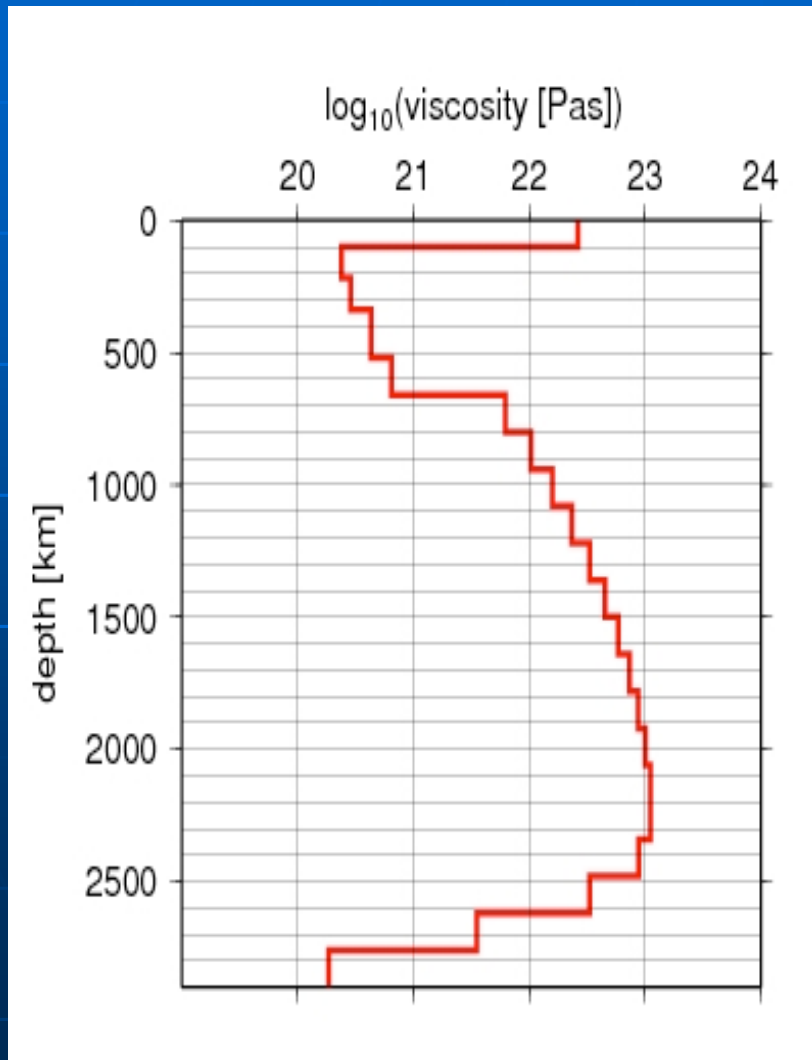
$$\eta_m = \begin{cases} \eta_1, \tau < \tau_c \\ \eta_2, \tau > \tau_c \end{cases}$$

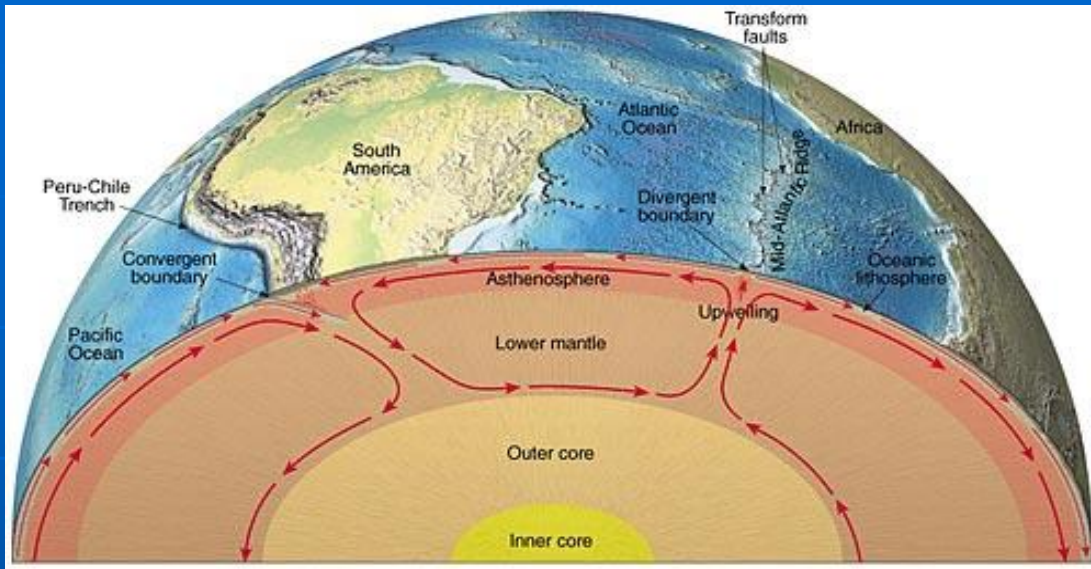
$0,1 \leq \tau_c \leq 1 \text{ МПа}$  - критическое касательное напряжение

$$\eta_1 = \eta_2$$

Критическое напряжение разграничивает действие механизмов диффузионной и дислокационной вязкости.

# Параметры вязкости мантии и их вариации для обобщенной модели Земли.



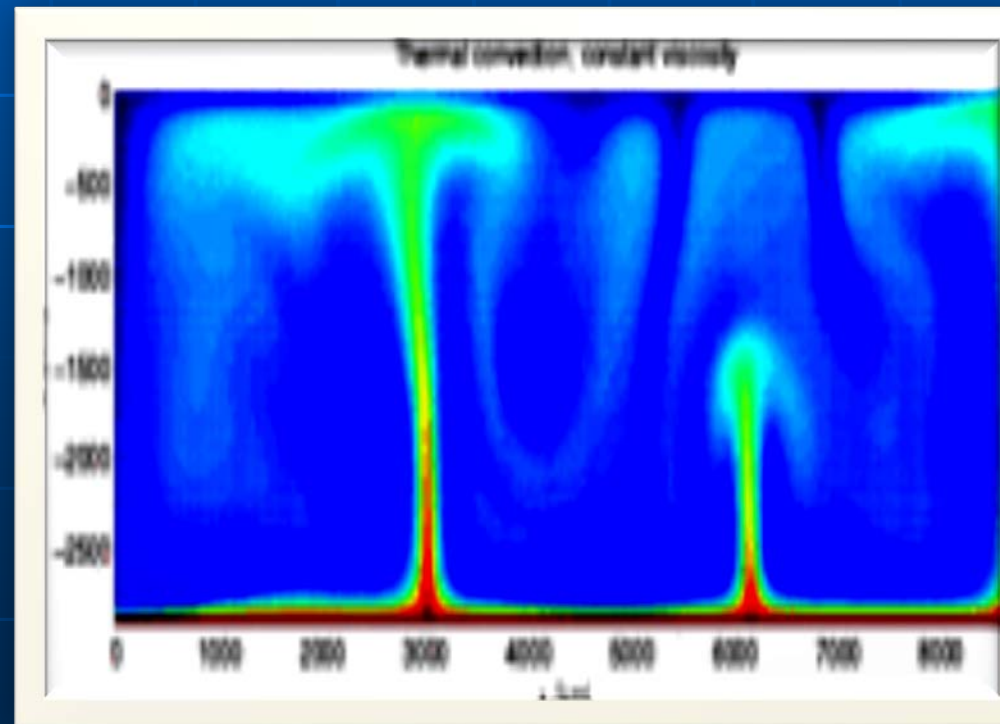
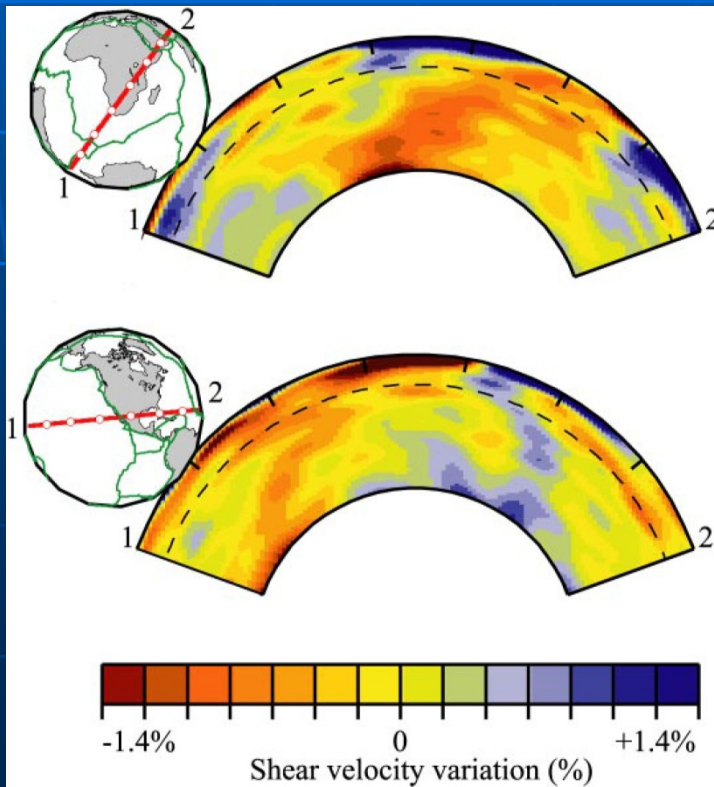


$10^6 \div 10^7$  лет

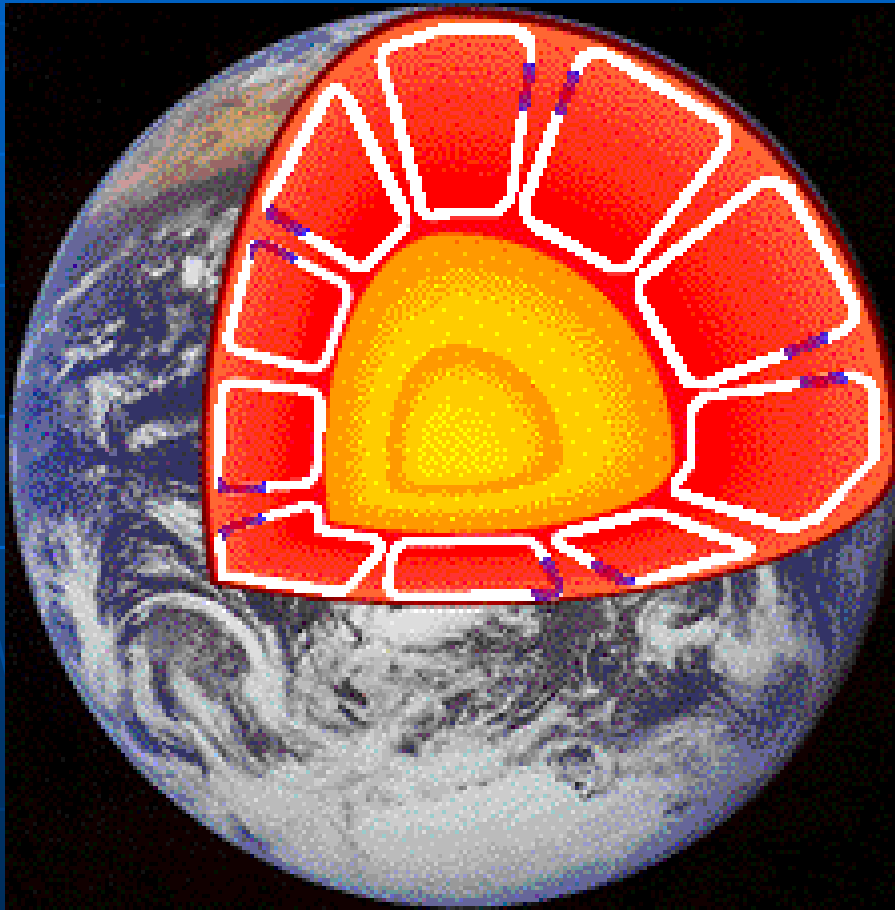
- Период мелкомасштабной  
конвекции в мантии

$10^8$  лет

- Период крупномасштабной  
конвекции в мантии



# Тепловое поле Земли.



- **Геотермия** (англ. geothermy) — раздел геофизики, изучающий тепловое поле Земли, распределение температуры на поверхности и её источники в недрах Земли, а также тепловую историю Земли.



# Источники тепловой энергии Земли.

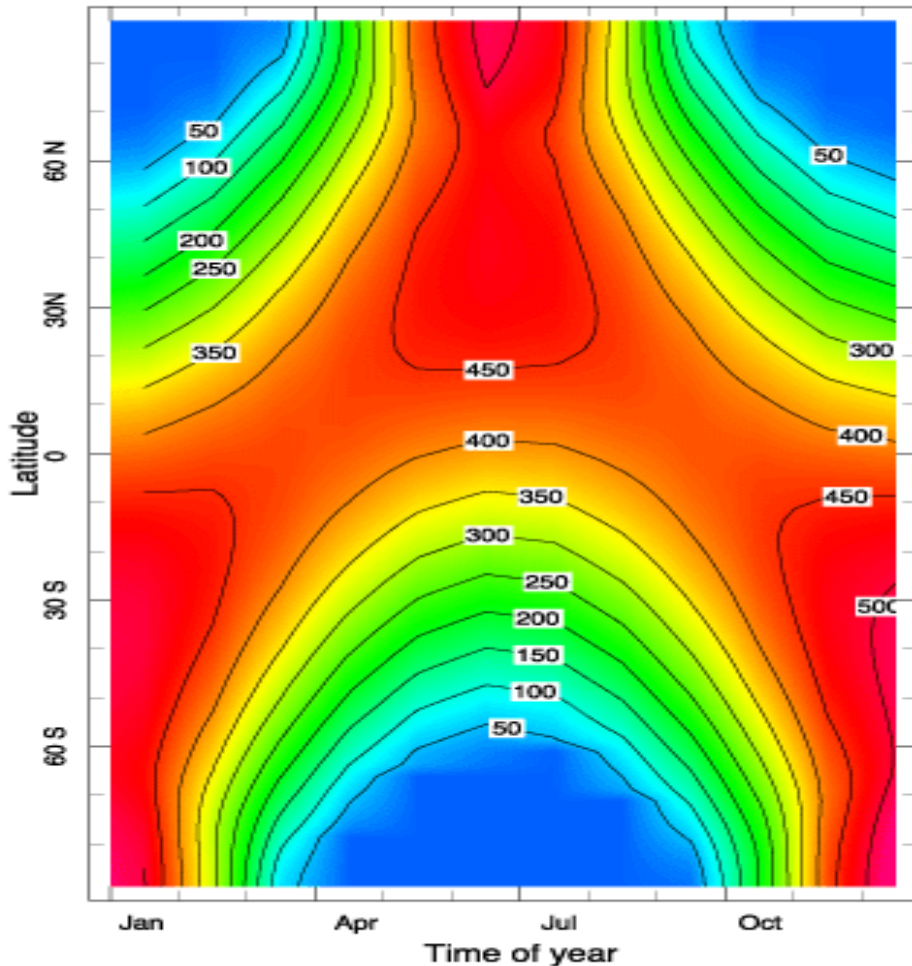
- Тепло, унаследованное от протопланетного диска, обеспечивало нагрев до 1200 К;  $1^{\circ}\text{C}=273\text{K}$
- Тепло, образующееся результате превращений радиоактивных элементов в теле Земли  $\Delta T \sim 1700\text{K}$ ;
- Тепло, выделившееся в процессе адиабатического гравитационного сжатия  $\Delta T \sim 900\text{K}$ ;
- Тепло за счет плотностной дифференциации вещества при химических и фазовых превращениях  $\Delta T \sim 2700\text{K}$ ;
- Тепло, образующееся в результате приливного трения  $\Delta T \sim 500\text{K}$ .

# Энергетический баланс Земли.

Источник энергии	Дж/год
Энергия Солнца	$5,5 \cdot 10^{24}$
Упругая энергия землетрясений	$3 \cdot 10^{19}$
Приливное трение	$3 \cdot 10^{19}$
Вулканы	$10^{18}$
Тепло, выделяемое срединно-океаническими хребтами	$10^{18}$
Гидротермальные источники на суше	$2 \cdot 10^{18}$
Процессы складкообразования	$2 \cdot 10^{17}$
Вынос тепла за счет кондуктивной теплопередачи	$10^{21}$
<b>Суммарные теплопотери Земли</b>	<b><math>1,3 \cdot 10^{21}</math></b>

# Вариации солнечного излучения в зависимости от широты и времени года

Latitude-Time Distribution of Incoming Solar Radiation at the Top of the Atmosphere



Based on ERBE data. Units are  $W/m^2$

**Суточные** колебания температуры воздуха проявляются в почвенном слое глубиной 1 - 1,5 м. Это связано с переносом солнечного теплового потока за счет молекулярной теплопроводности пород и конвекции воздуха

**Сезонные** (годовые) колебания вызывают изменения температур на глубинах до 20 - 40 м

# Тепловой поток.

Тепловой поток определяется законом Фурье как:

$$\Phi = \frac{Q}{t}$$

$Q$  - Количество теплоты  
 $t$  - время

Количество теплоты:

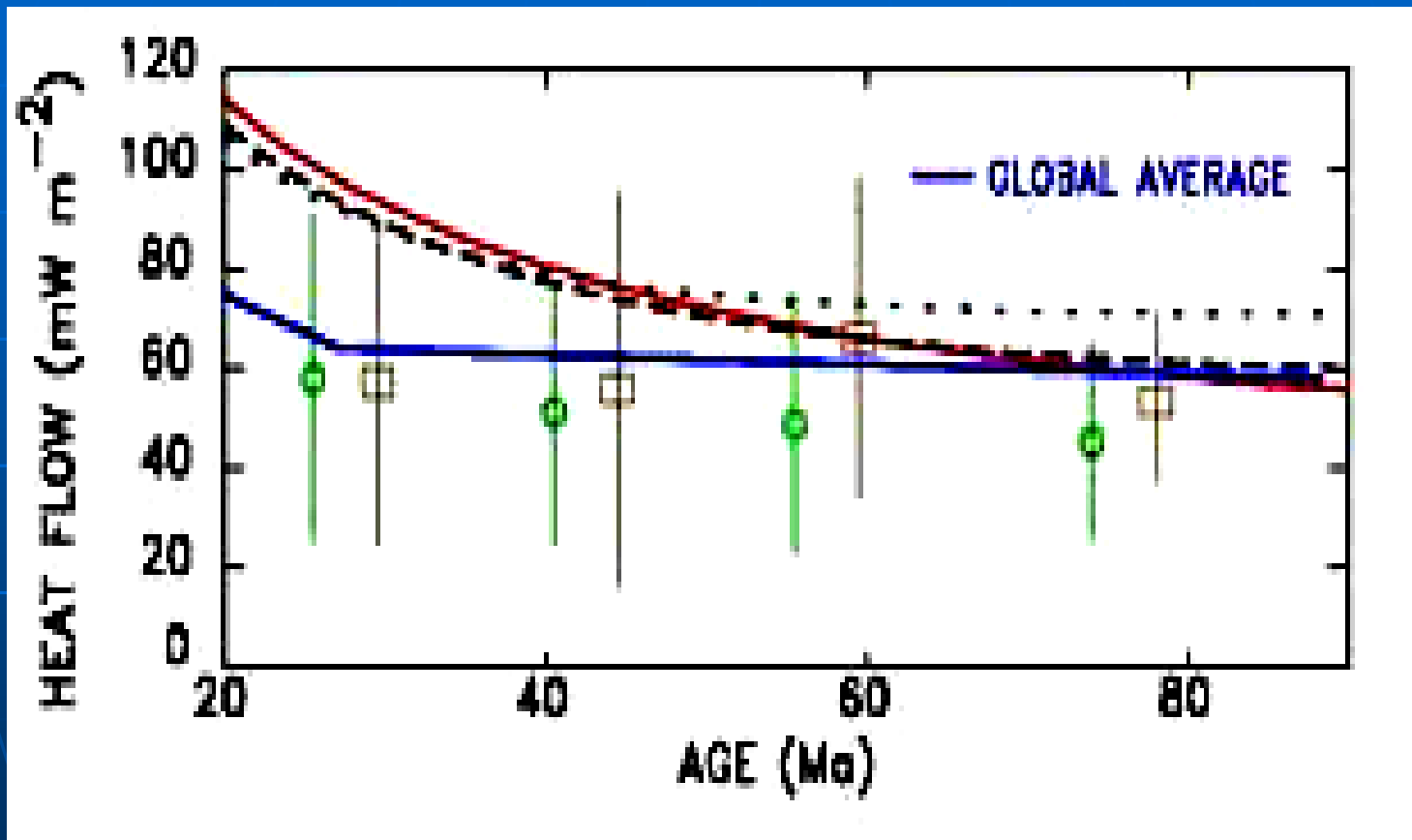
$$Q = -\chi \frac{dT}{dh}$$

$\chi$  - Коэффициент теплопроводности горных пород

$\frac{dT}{dh}$  - Геотермический градиент

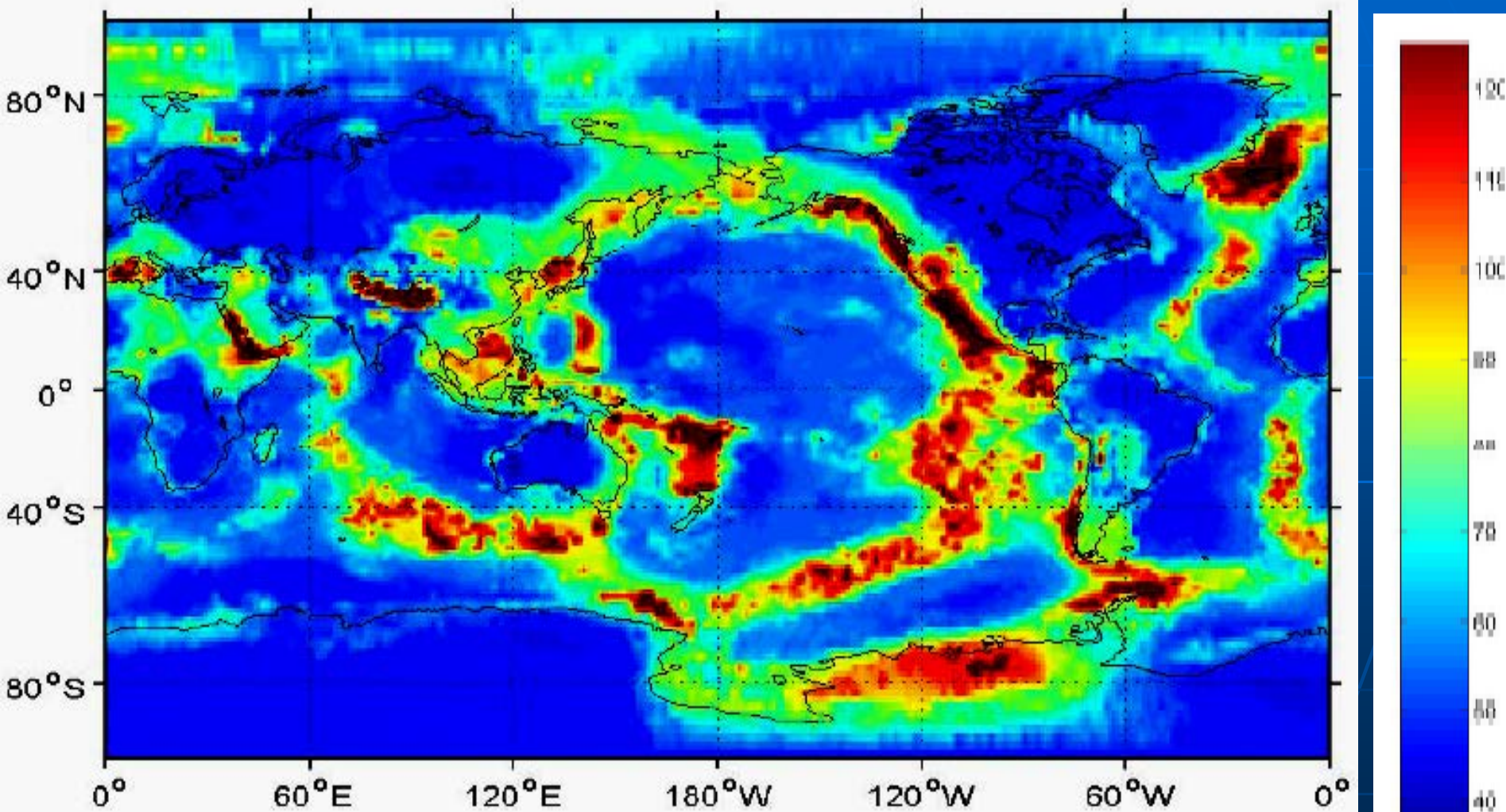
$T$  - температура;  $h$  - глубина

# Изменение теплового потока во времени.



Выделение тепла 3 млрд. лет тому назад было в 2 раза больше, чем в настоящее время

# Глобальный тепловой поток (мВт/м<sup>2</sup>) (результат наблюдений).



# Средний тепловой поток в различных тектонических структурах.

Тепловой поток	мВт/м <sup>2</sup>
Древние щиты (Балтийский, Африканский и др.)	50
Горные районы	63
Рифты (срединно-океанические)	75
Вулканы	90-190
Средний поток на континентах	65±1,6
Средний поток в океанах	101±2,2
Средний поток на поверхности Земли	83±5,3

# Механизмы передачи тепла.

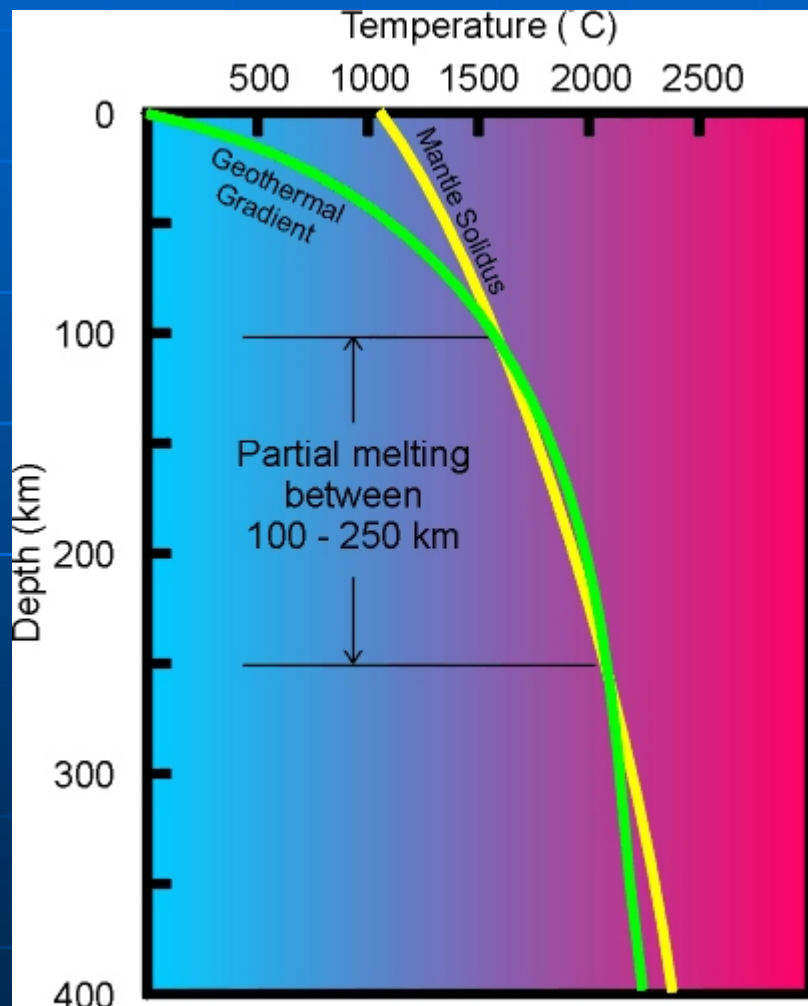
- **Кондуктивный**- медленный, при соприкосновении горячего тела с холодным.  
Хорошие проводники – металлы;  
плохие – горные породы,  
изоляторы – асбест, дерево, воздух.
- **Конвективный** – быстрый, за счет движения вещества при различной его плотности.
- **Радиационный** –на глубине, небольшие примеси радиоактивных элементов(урана, тория, калия, радона) в горных породах, сопровождается излучением.



# Тепло, создаваемое распадом радиоактивных изотопов.

Изотоп	Тепло выделение [Вт / кг изотопа]	Период полураспада [лет]	Средние концентрации и мантии [кг изотопа / кг мантии]	Тепло выделение [Вт / кг мантии]
$^{238}\text{U}$	$9,46 \times 10^{-5}$	$4,47 \times 10^9$	$30,8 \times 10^{-9}$	$2,91 \times 10^{-12}$
$^{235}\text{U}$	$5,69 \times 10^{-4}$	$7,04 \times 10^8$	$0,22 \times 10^{-9}$	$1,25 \times 10^{-13}$
$^{232}\text{Th}$	$2,64 \times 10^{-5}$	$1,40 \times 10^{10}$	$124 \times 10^{-9}$	$3,27 \times 10^{-12}$
$^{40}\text{K}$	$2,92 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^9$	$36,9 \times 10^{-9}$	$1,08 \times 10^{-12}$

# Геотермический градиент в верхней мантии.



## Геотермический градиент

- нарастание температуры на единицу глубины.

У поверхности Земли, на глубине до 100 км, он равен  $15^{\circ}\text{C}/\text{км}$ .

На глубине 400 км -  $5^{\circ}\text{C}/\text{км}$ .

Средний градиент температур –  $1^{\circ}\text{C}/\text{км}$ .

Температура **солидуса** – переход горной породы в твердое состояние.

# Адиабатический градиент температур.

$$\frac{dT}{dP} = \frac{\alpha T}{c_p \rho}$$

$$c_p = 0,3 \text{ кал} / \text{г} \cdot \text{град}$$

$$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \approx 4 \cdot 10^{-5} 1 / \text{град}$$

$P$  - давление

$$\frac{dT}{dh} \cong 0,5^\circ\text{C}/\text{км}$$

$\alpha$  - коэффициент объемного расширения

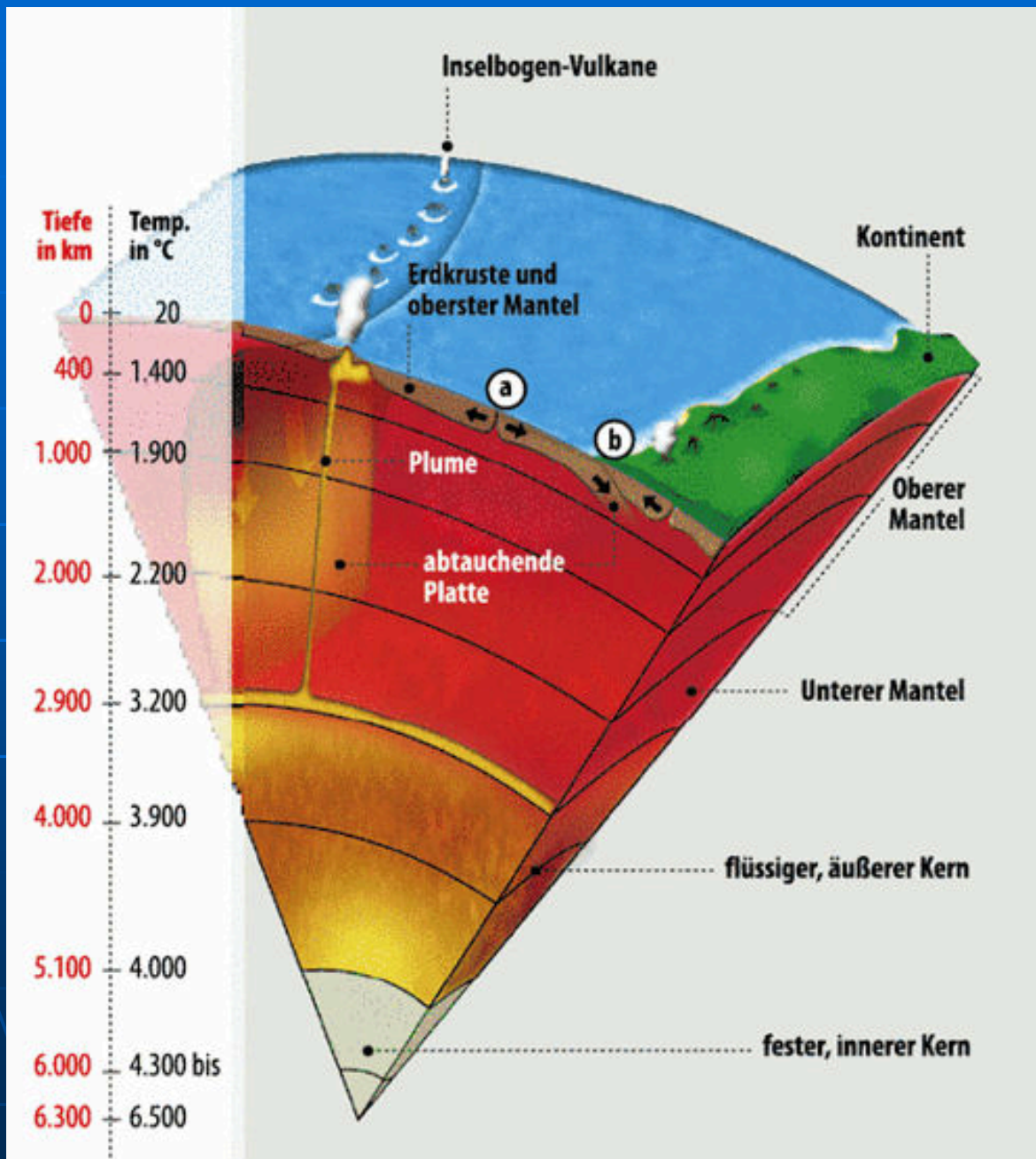
$\rho$  - ПЛОТНОСТЬ

$$1 \text{ кал} = 4,18 \text{ Дж} [Н \cdot м]$$

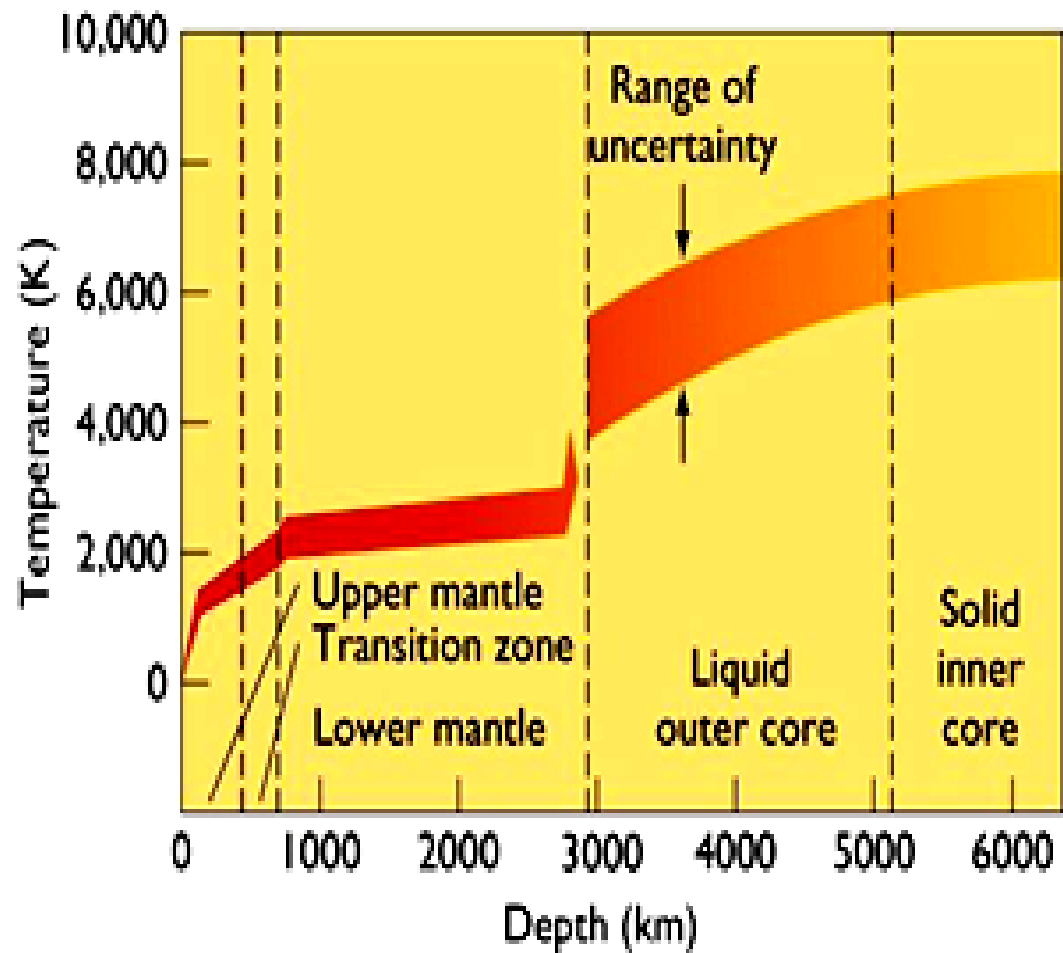
$c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении

# Изменение температуры в недрах Земли по реперным точкам

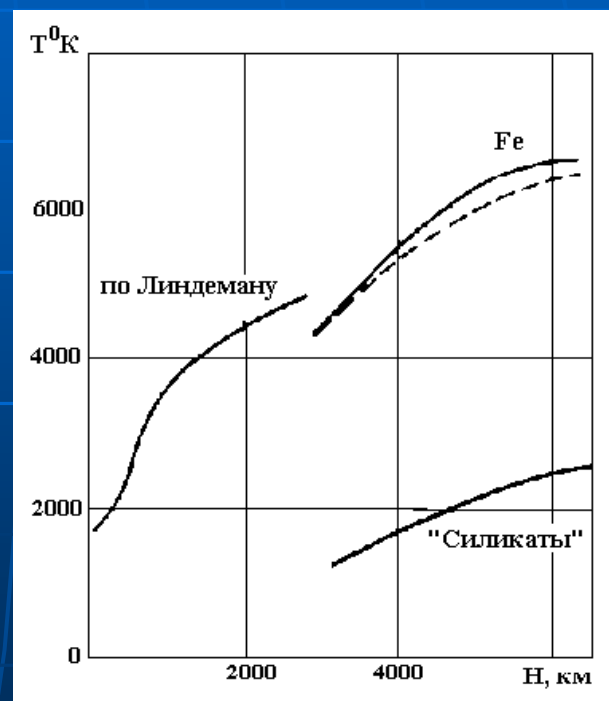
Область	Температура, К
Поверхность	273
Литосфера	1300±100
Основание литосферы	1600±100
Сейсмическая граница на глубине 410 км	1800±200
Переходная граница на глубине 670 км	2000±250
Переходной зоны верхней и нижней мантии	1900–2900
Адиабата в нижней мантии	700±200
Граница ядро–мантия	3900±600
Адиабата во внешнем ядре	1000±400
Граница внешнее–внутреннее ядро	4900±900
Центр Земли	6000±1000



# Распределение температур в недрах Земли



## Температуры плавления



# Эффективная температура остывания Земли.

$$\Delta T \cong \frac{\bar{Q}}{c};$$

$\bar{Q}$  - средняя потеря тепла  
 $c$  - средняя теплоемкость пород

$$\bar{Q} \approx 2,4 \cdot 10^{20} \text{ кал / год} \times 4,6 \cdot 10^9 \text{ лет} \cong 1,1 \cdot 10^{30} \text{ кал}$$

Средняя теплоемкость Земли:

$$c = c_{\text{сил}} m_{\text{мантии}} + c_{\text{жесл}} m_{\text{ядра}}$$

$$c_{\text{сил}} = 0,3 \text{ кал / град}, \quad c_{\text{жесл}} = 0,1 \text{ кал / град},$$

$$m_{\text{мантии}} = 4 \cdot 10^{27} \text{ г} \quad m_{\text{ядра}} \cong 2 \cdot 10^{27} \text{ г}$$

Получим:

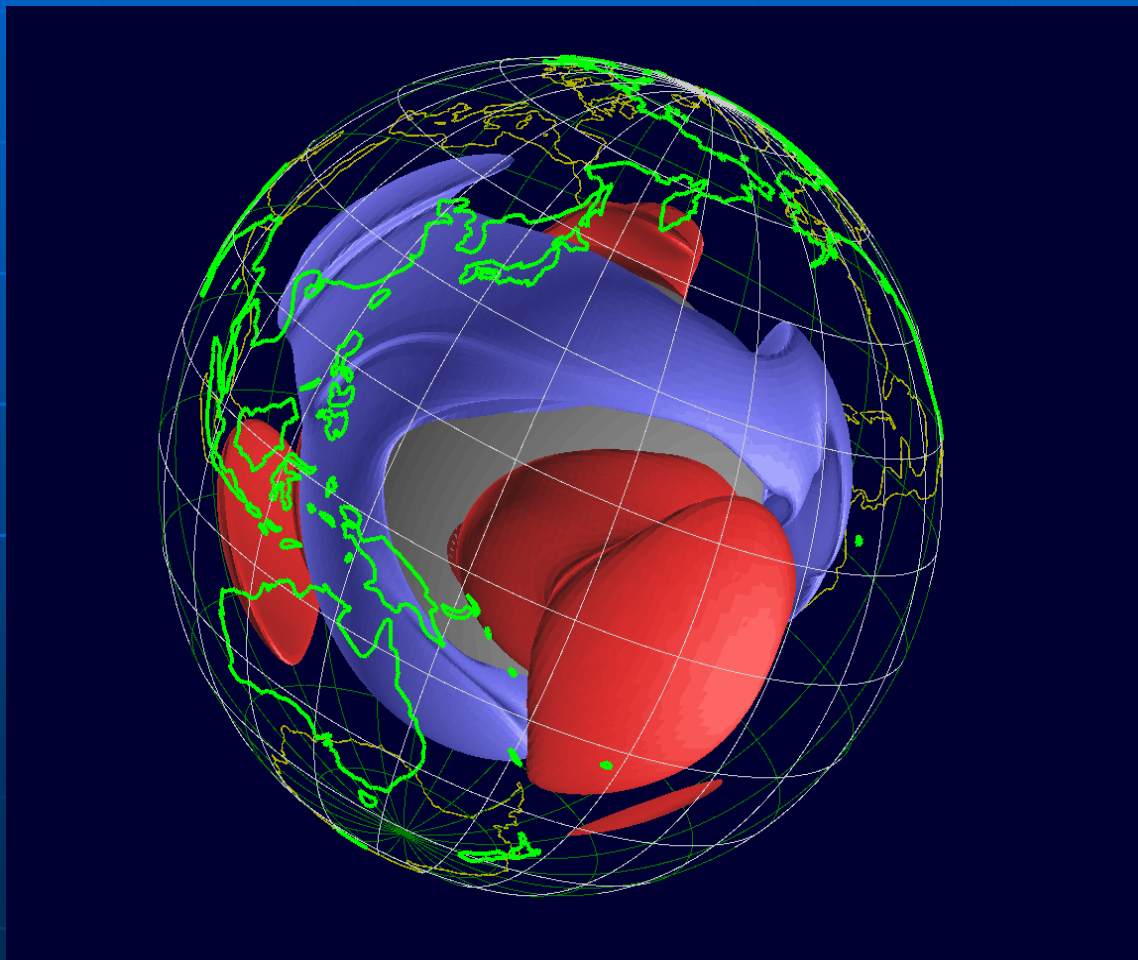
$$c = 0,3 \cdot 4 \cdot 10^{27} + 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{27} = 1,4 \cdot 10^{27} \text{ кал / град}$$

Следовательно:

$$\Delta T = \frac{1,1 \cdot 10^{30}}{1,4 \cdot 10^{27}} \cong 800^\circ \text{C}$$



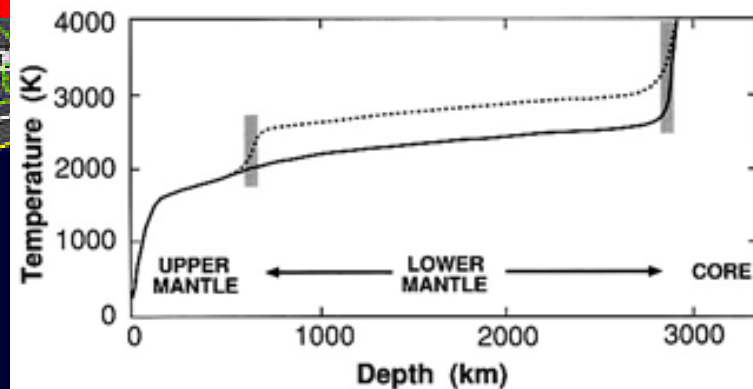
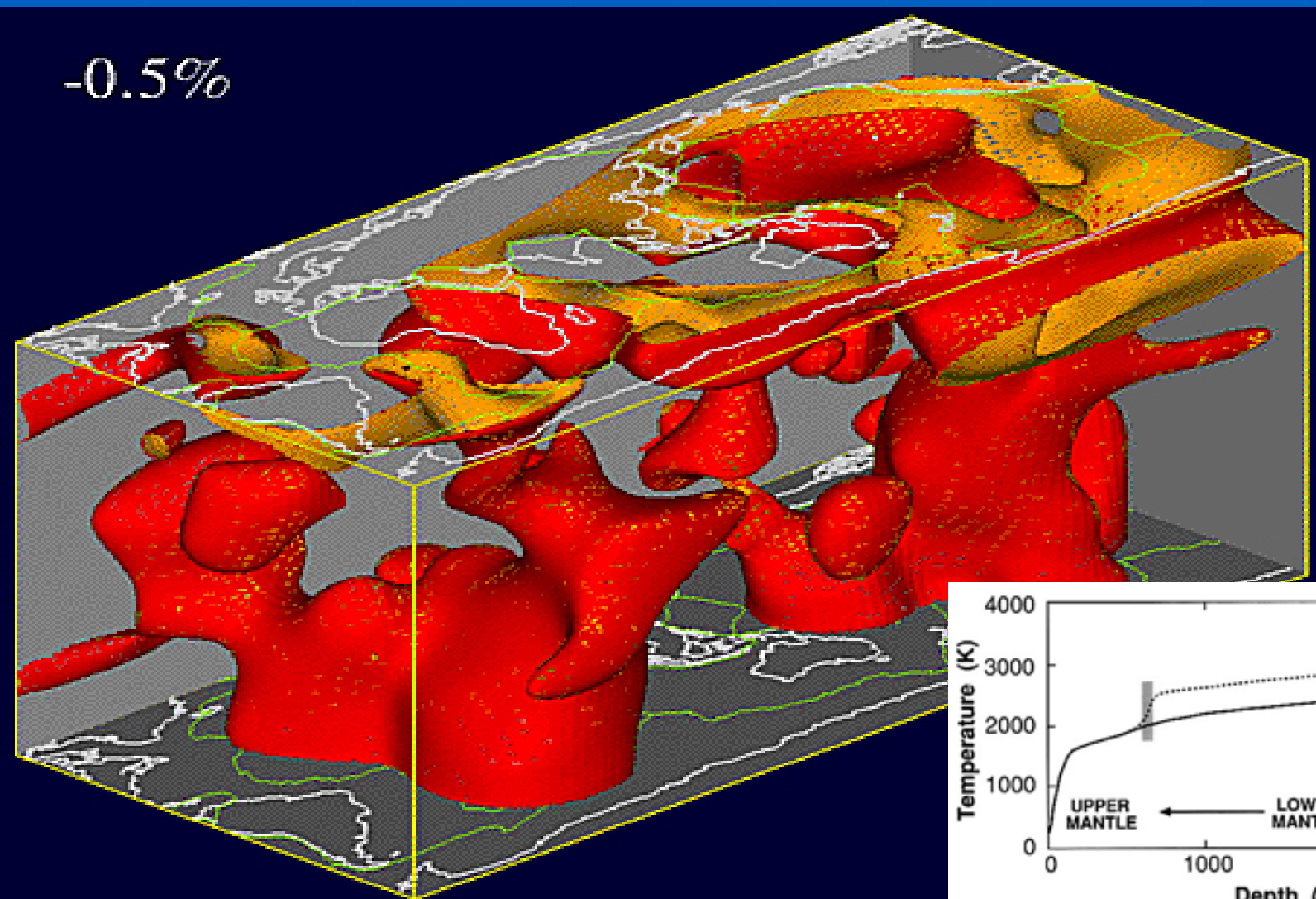
# Тепловые потоки в мантии Земли.



твёрдая Земля представляется своеобразным тепловым двигателем с двумя огромными опускающимися **ХОЛОДНЫМИ** потоками и с двумя такими же огромными **поднимающимися горячими** потоками, который передвигает континенты, управляет землетрясениями, и влияет на изменения климата.

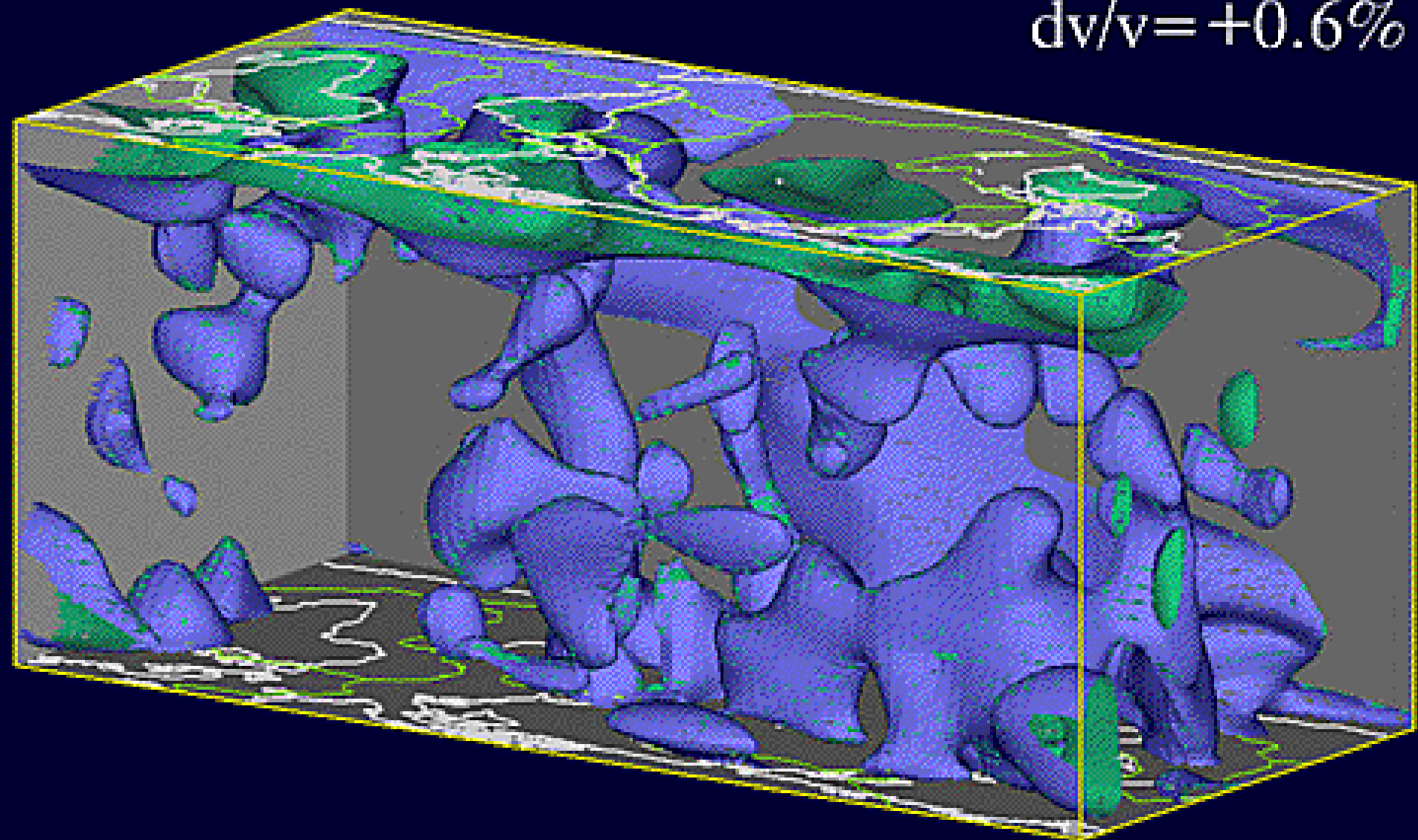
# Области горячих тепловых потоков в мантии по данным сейсмической томографии.

-0.5%

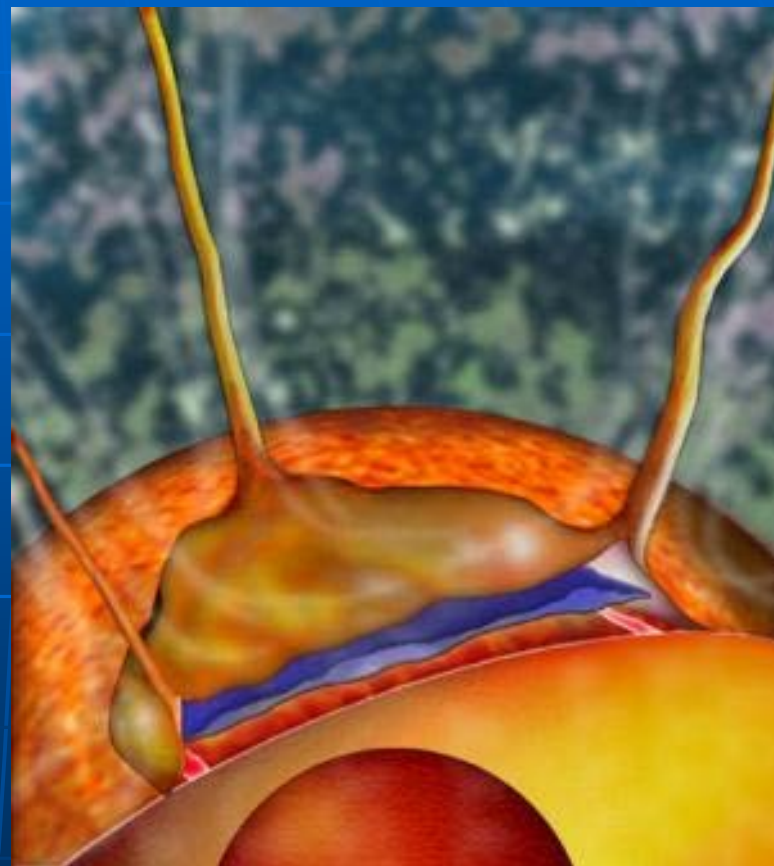


# Области холодного состояния материала мантии Земли.

$$dv/v = +0.6\%$$



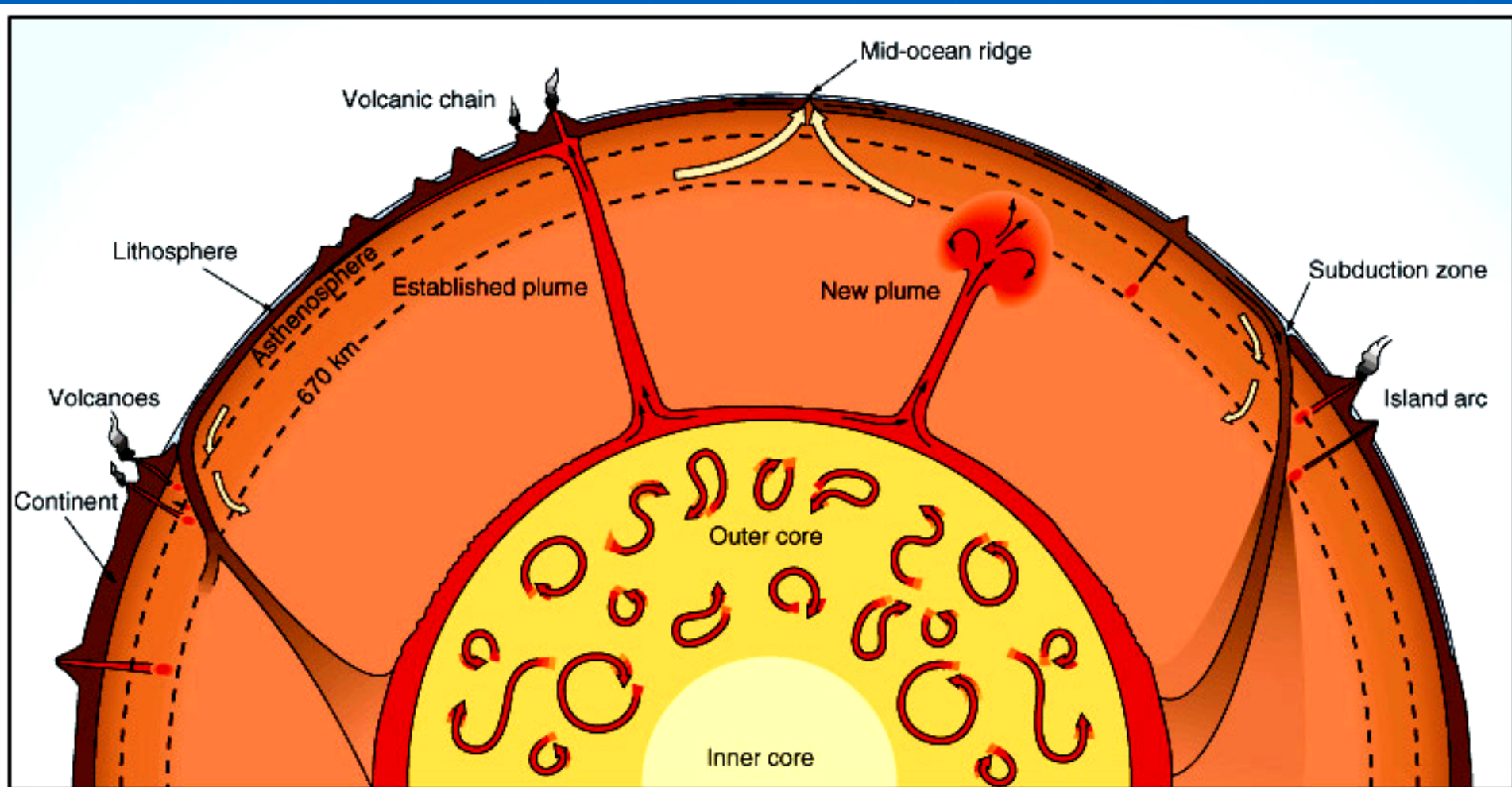
# Модель теплового потока в мантии.



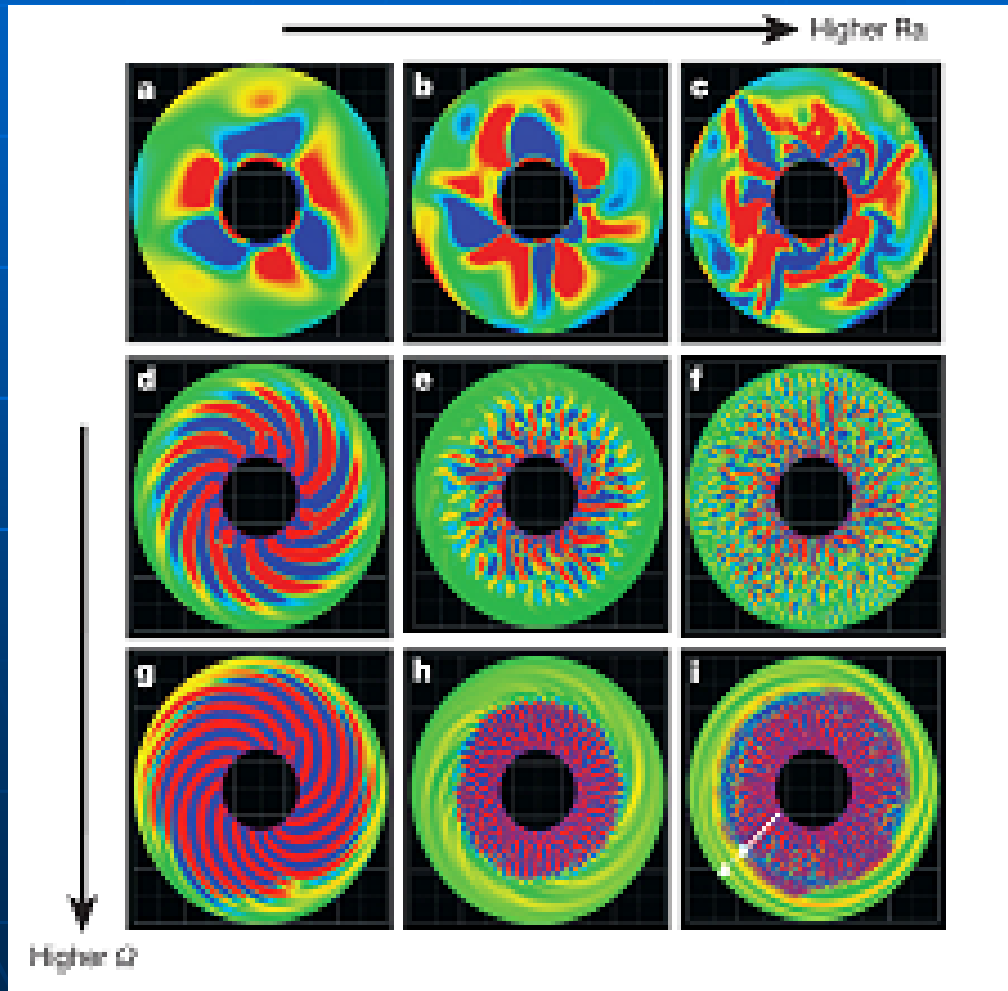
Интенсивность мантийной конвекции со временем уменьшается



# Конвекция в жидком ядре и мантии



# Конвекция в жидком ядре в зависимости от числа Релея и скорости вращения Земли



$$R_{cr} = \frac{g\rho\alpha Th^3}{\kappa\eta} \approx 10^6 \div 10^8$$

$g$  – ускорение силы тяжести

$\rho$  – плотность

$\alpha$  – коэффициент объемного расширения

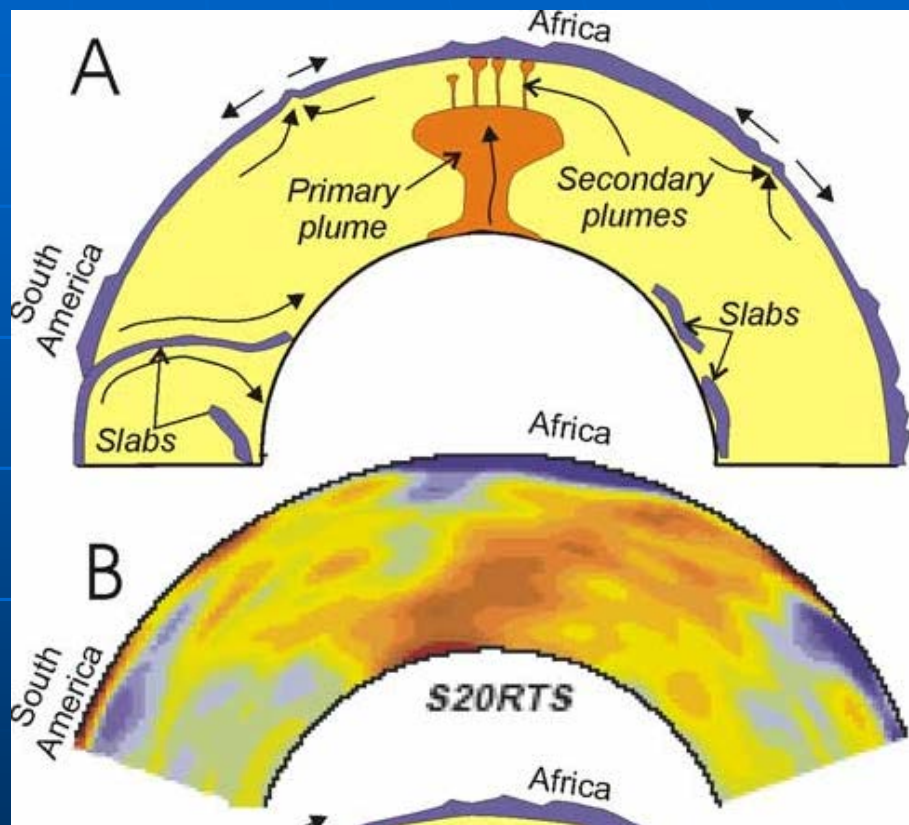
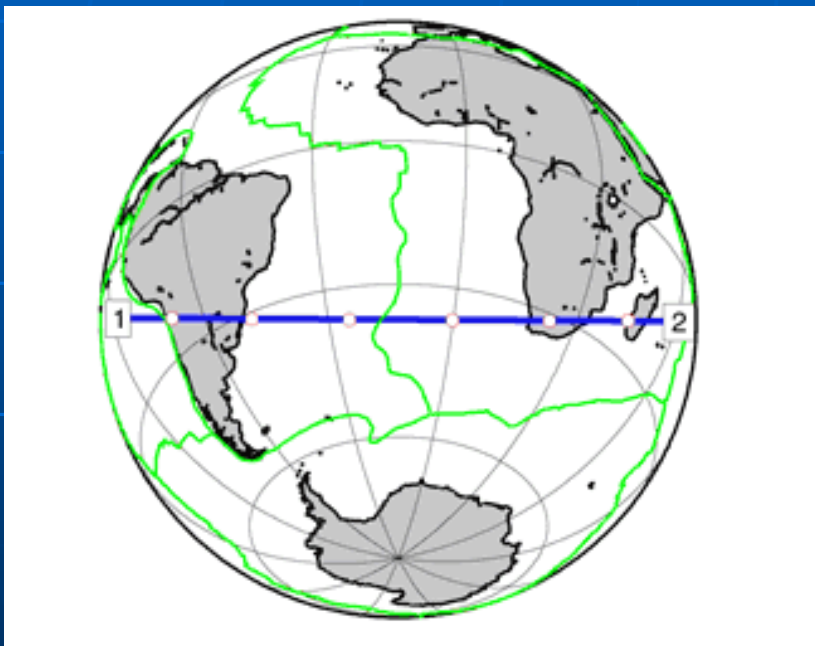
$T$  – температура

$h$  – мощность жидкого слоя

$\kappa$  – температуропроводность

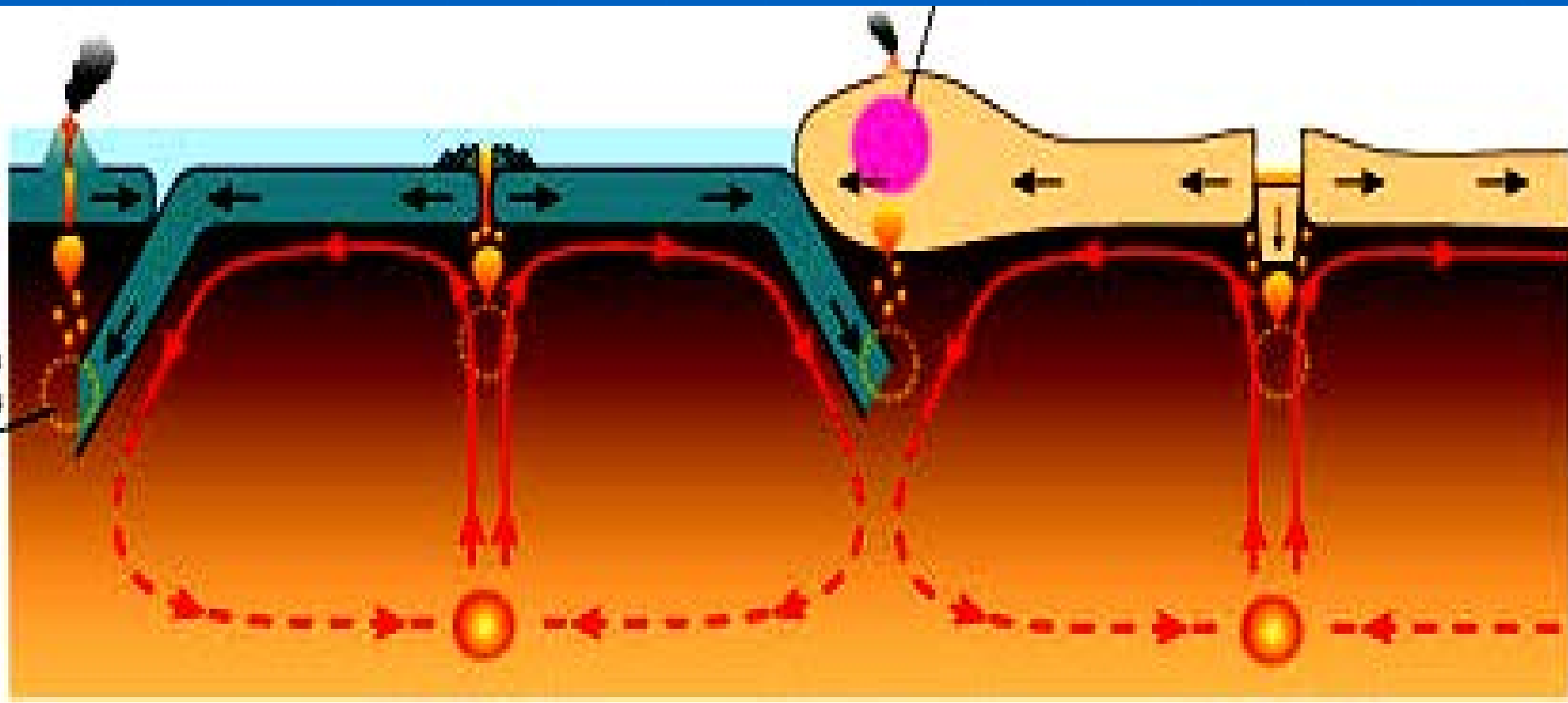
$\eta$  – вязкость

# Разрез мантии Земли и структура ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ



Под холодной плитой образуются горячие мантийные плюмы, и плита дрейфует с переменной скоростью (0.4-5.0) см/год.  
Плюм – горячий мантийный поток, образующий конвекцию.

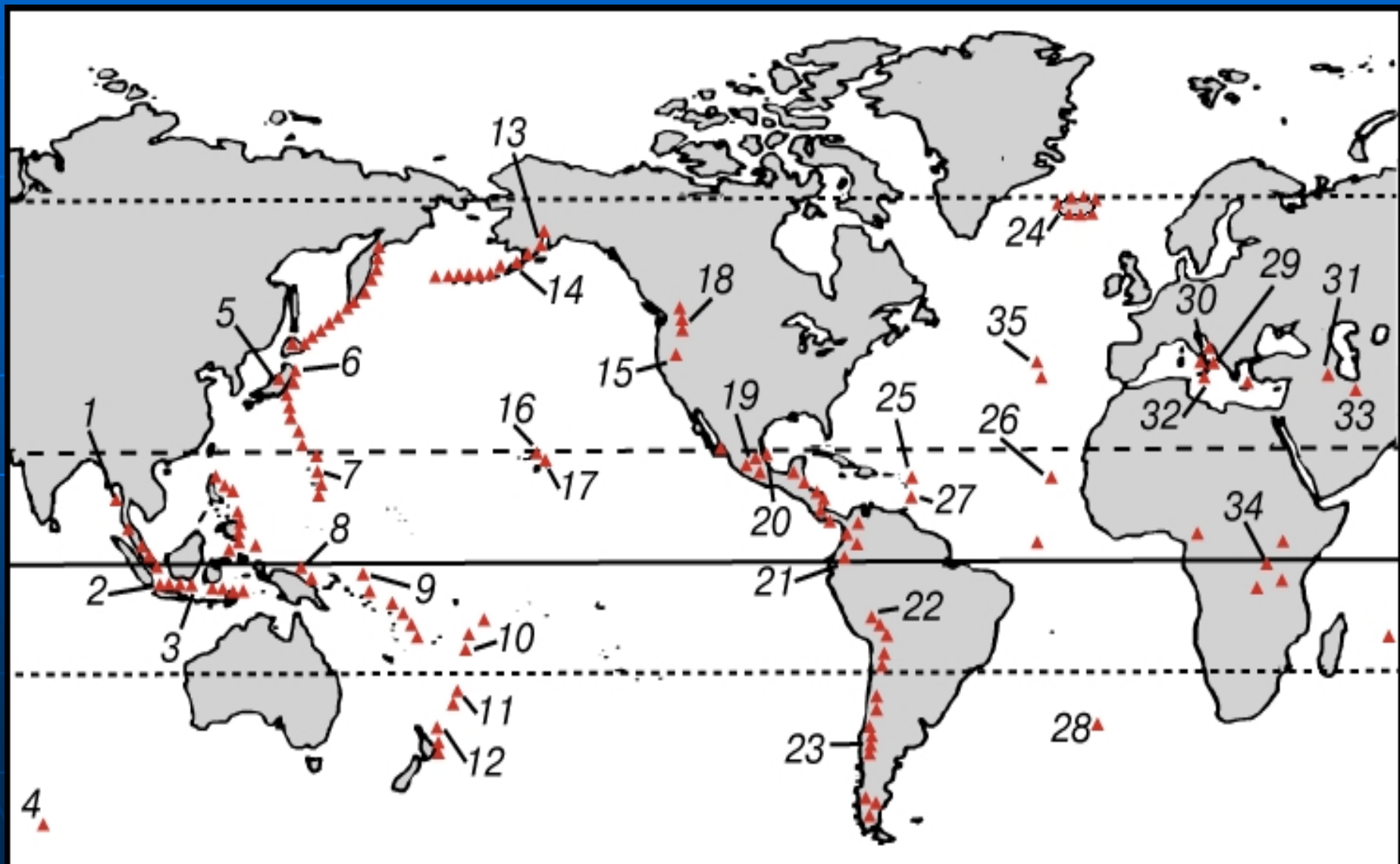
# Рифты океанического и континентального типа.



Средний возраст дна океанов – 60 млн. лет;  
За 200 млн. лет ложе всех океанов обновляется



# Действующие вулканы Земли.



# Черные курильщики - гидротермальные источники срединно-океанических хребтов

