

# Введение в физику гидросферы

2026 Лекция №4

Носов Михаил Александрович

*кафедра физики моря и вод суши*

*отделение геофизики*

*физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*



**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

# Испускательная способность АЧТ (закон излучения Планка [M. Planck, 1900] )

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

**спектральная  
плотность**

$T$  – температура

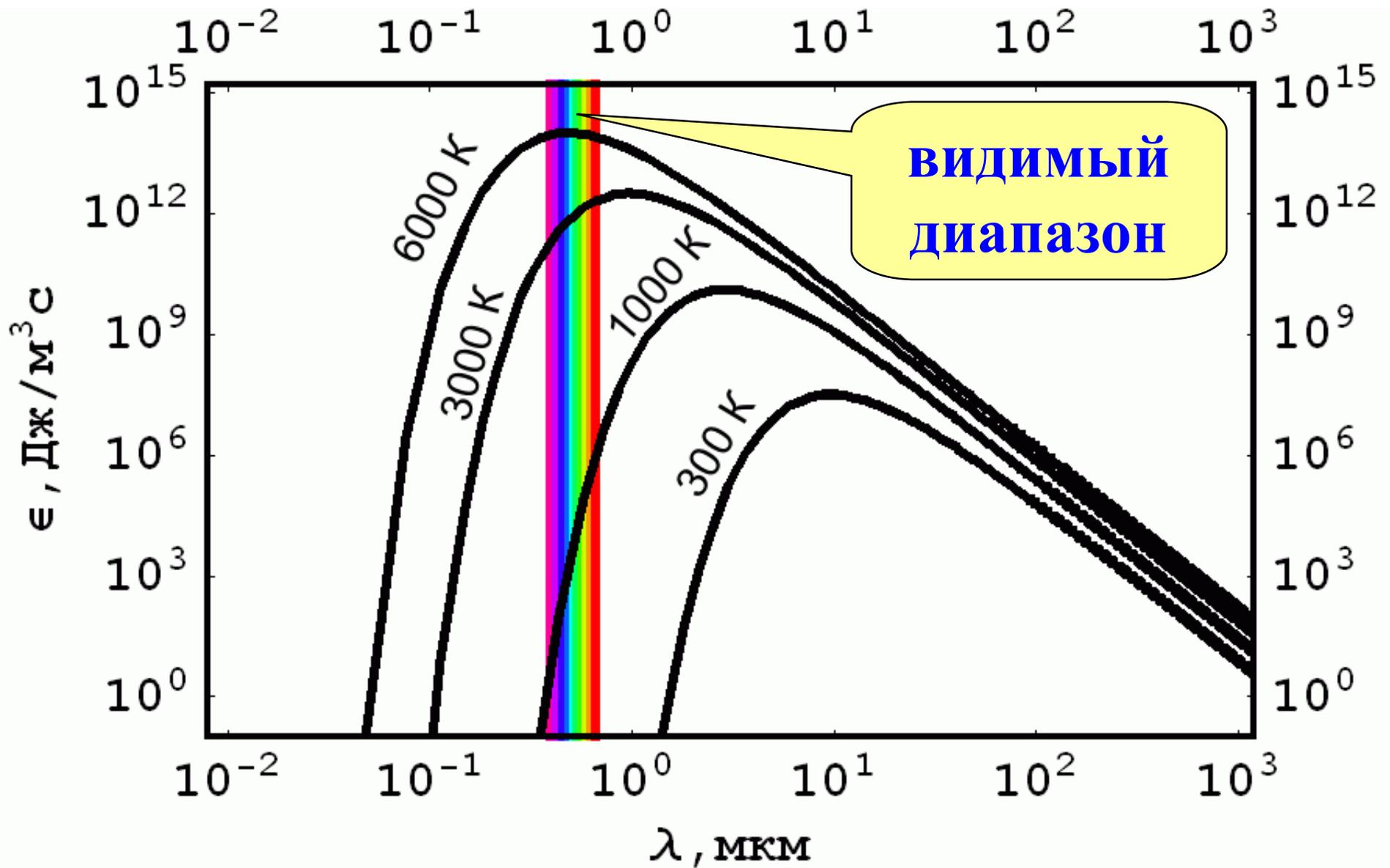
$\lambda$  – длина волны

$c$  – скорость света

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

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

# Испускательная способность АЧТ (закон излучения Планка [М.Планк, 1900] )



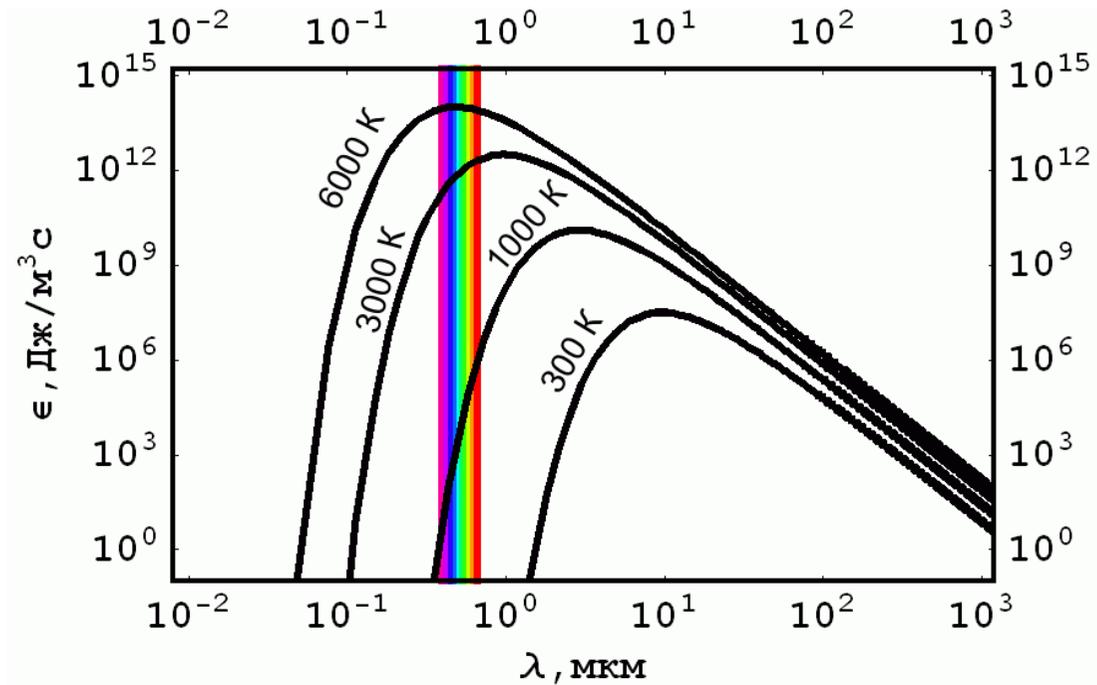
**800-1200 °C**



**2000-3000 °C**



# Следствия закона Планка



# Закон смещения Вина [W. Wien, 1893]

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

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

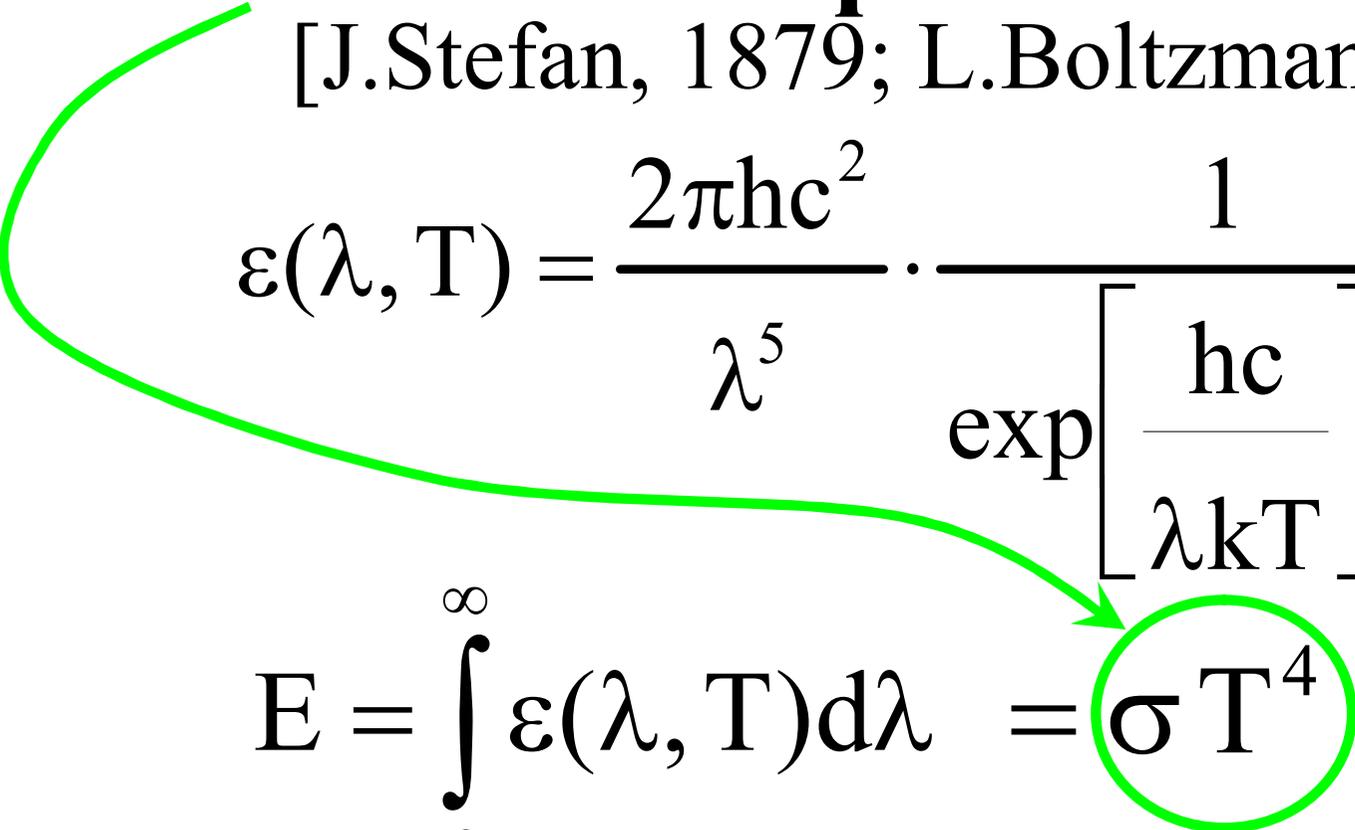
$$\frac{d}{d\alpha} \left( \frac{F(\alpha)}{\alpha^5} \right) = 0 \Rightarrow \alpha_{\max}$$

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

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

# Закон Стефана-Больцмана

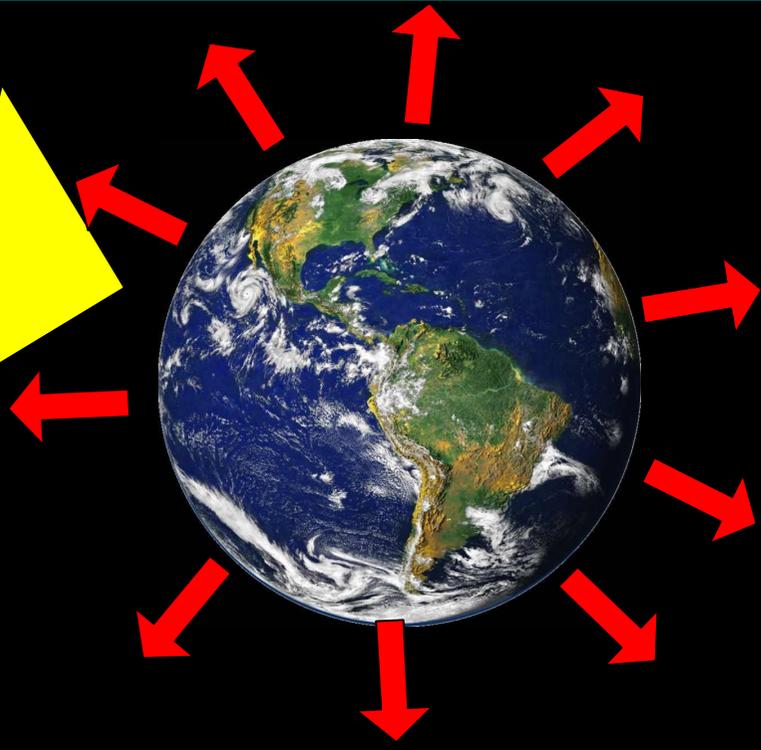
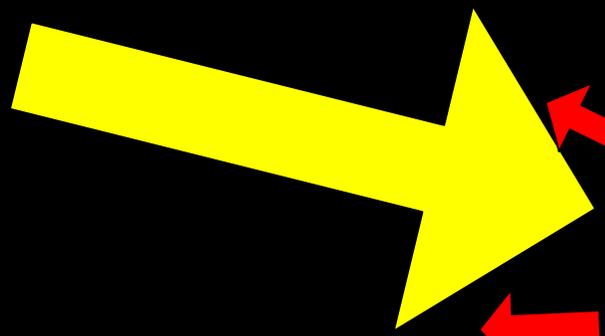
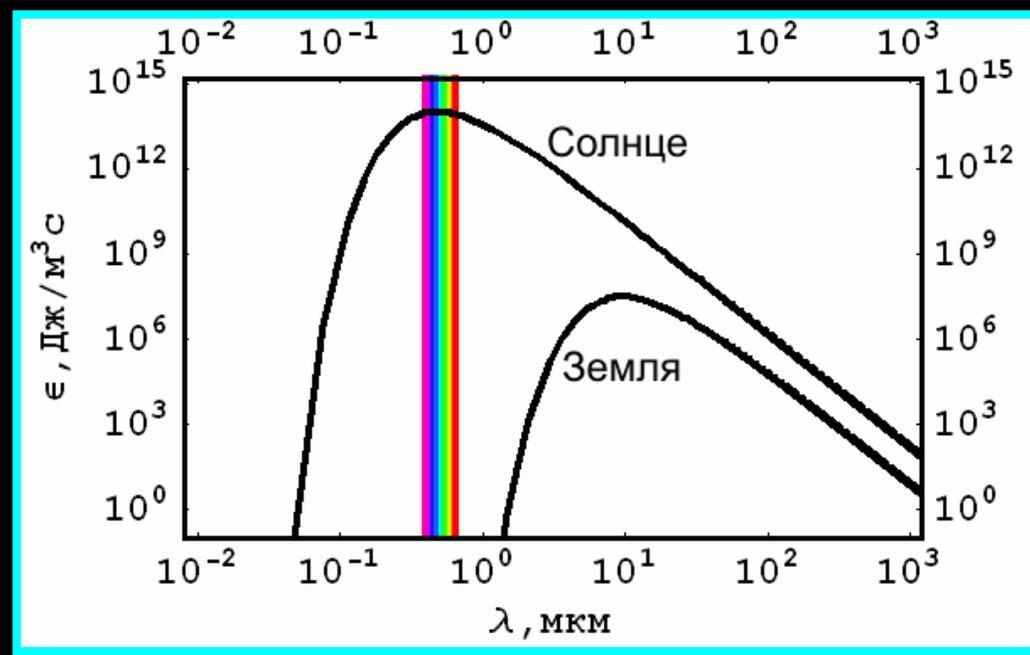
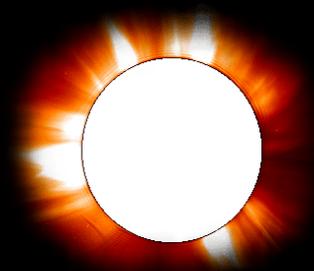
[J.Stefan, 1879; L.Boltzmann, 1884]

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


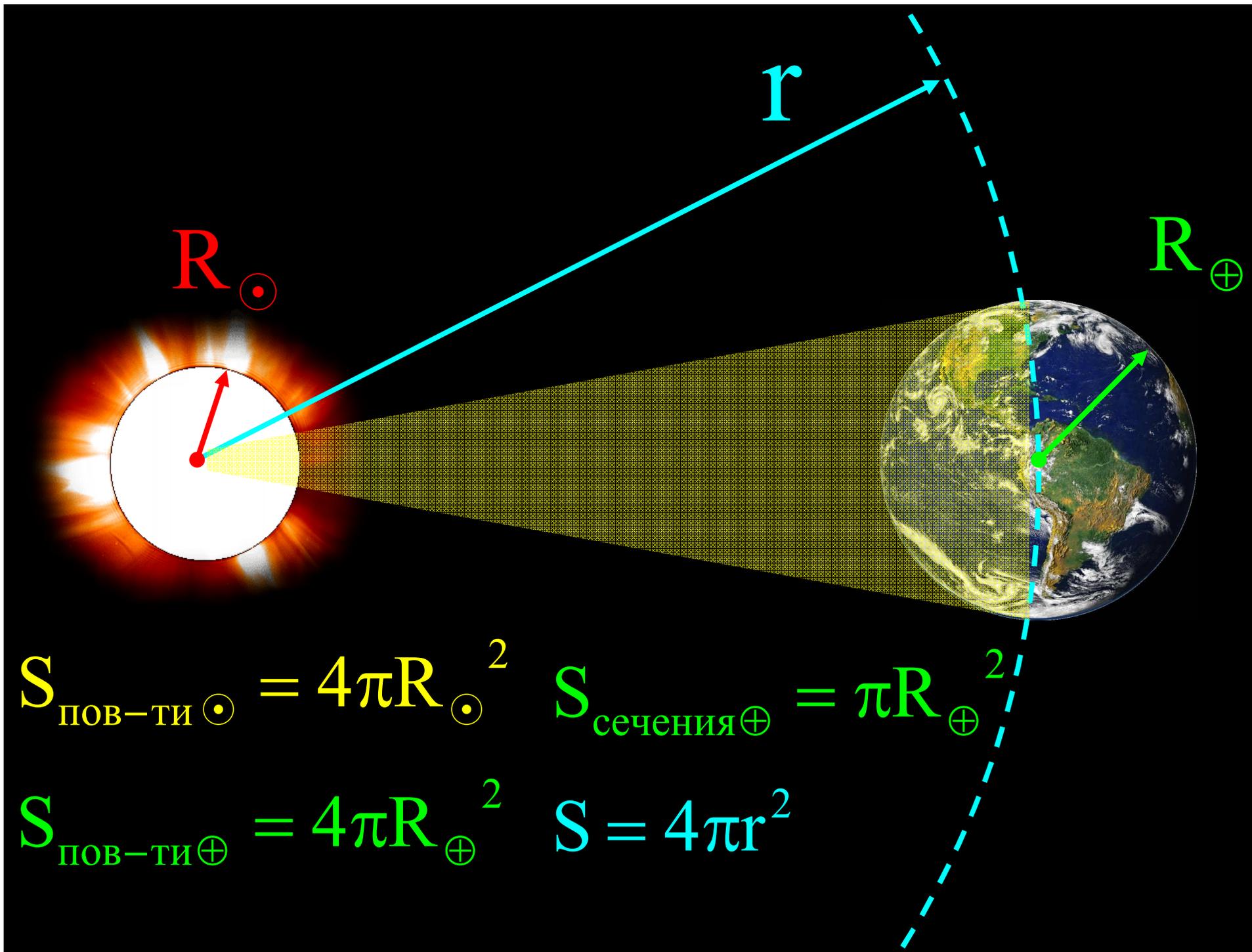
$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

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

**6000 K**  
**0.5 мкм**



**300 K**  
**10 мкм**



## Светимость Солнца

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

$$L_{\odot} = \sigma T_{\odot}^4 4\pi R_{\odot}^2$$

АЧТ при  $T=5770 \text{ К}$

## Доля энергии, получаемая Землей

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

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

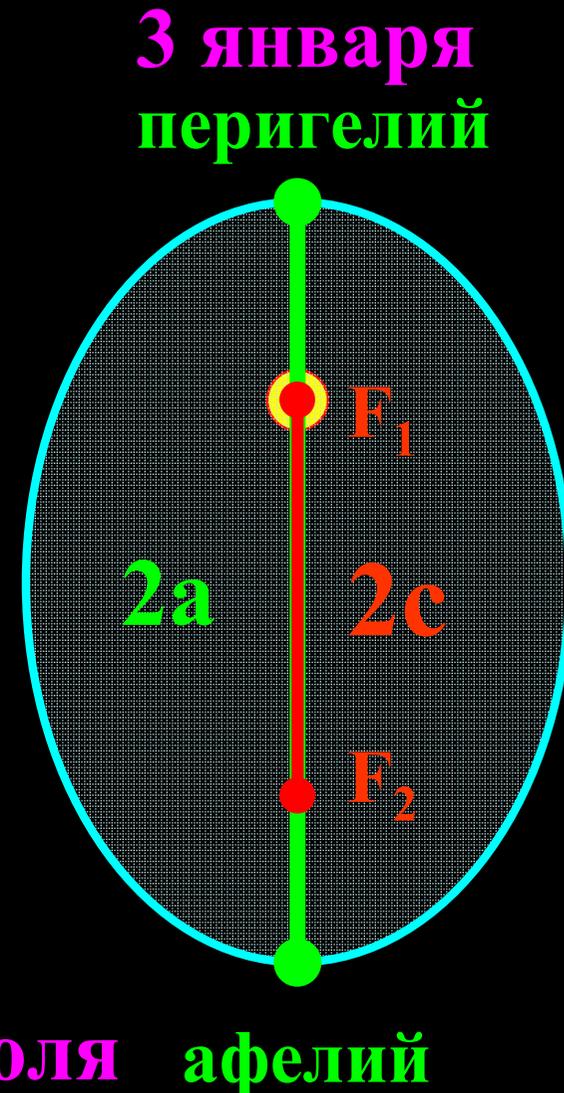
# Сезонные вариации солнечной радиации (но не солнечной постоянной!)

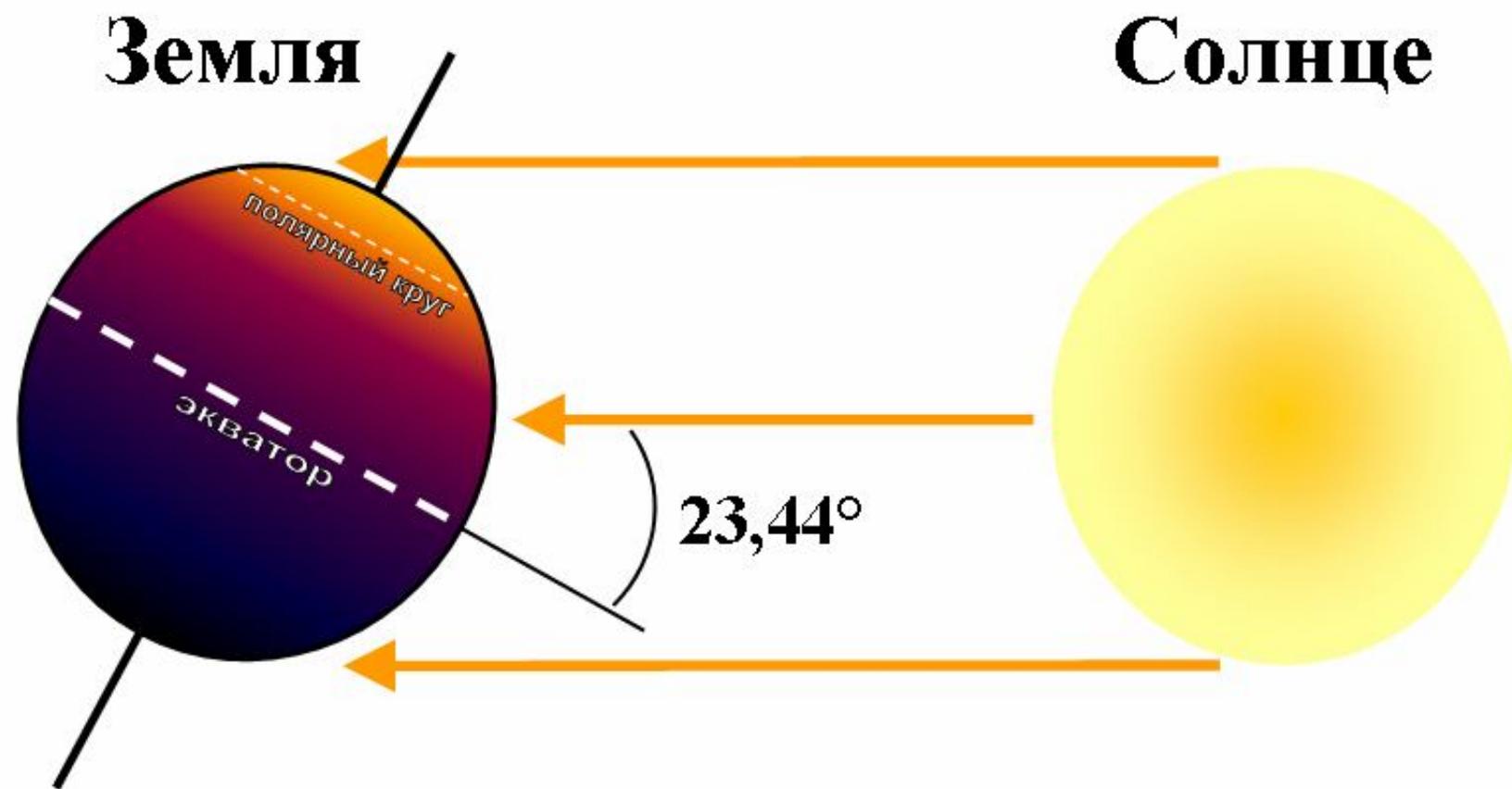
$$\Phi \sim \frac{1}{r^2} \Rightarrow \frac{\Phi_{\text{перигелий}}}{\Phi_{\text{афелий}}} = \left( \frac{r_{\text{афелий}}}{r_{\text{перигелий}}} \right)^2$$

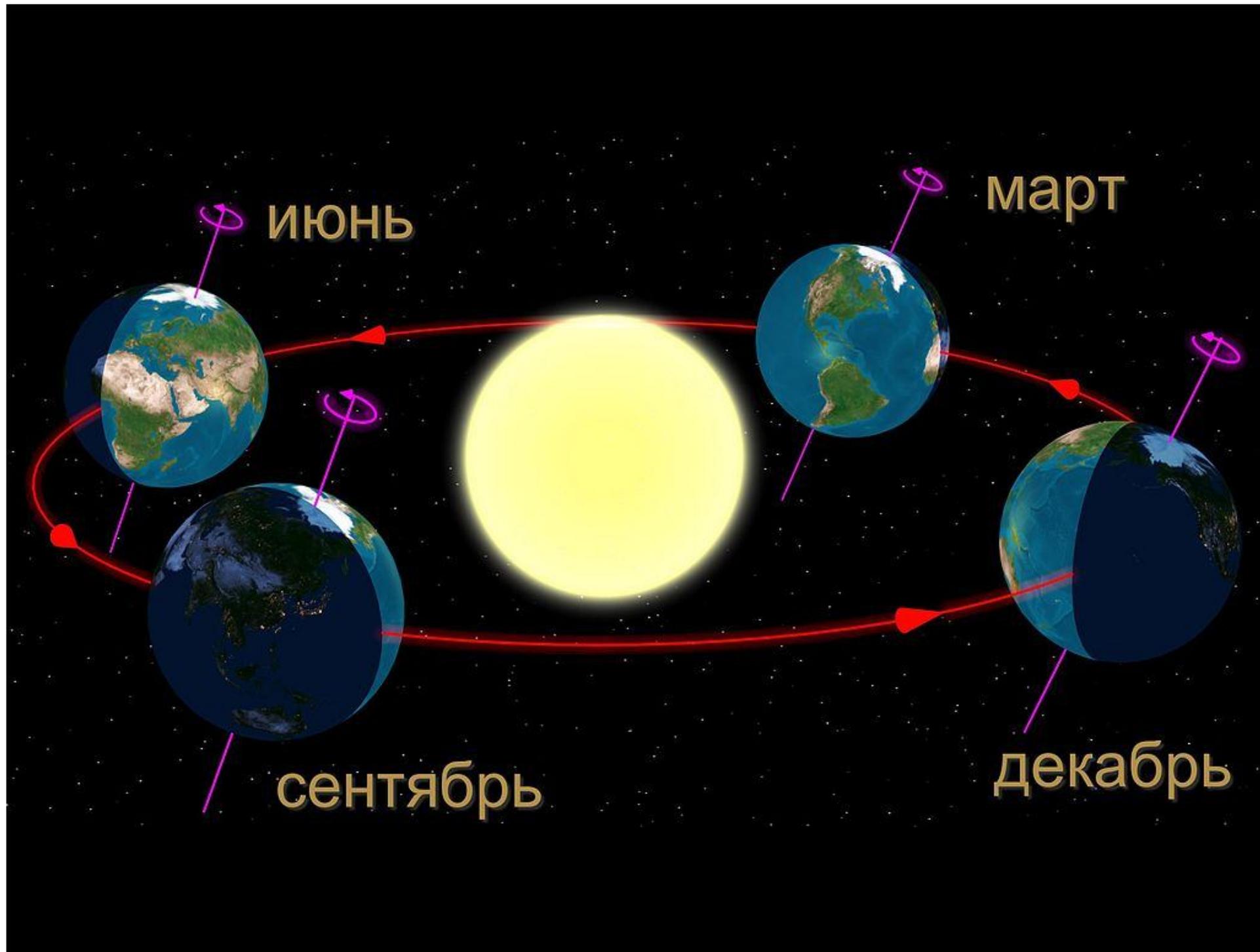
$$e = c/a = 0.0167$$

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

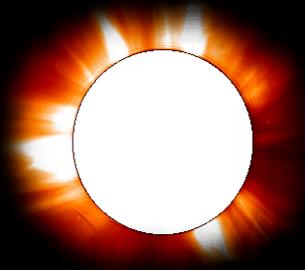
$$\frac{\Phi_{\text{перигелий}}}{\Phi_{\text{афелий}}} = \left( \frac{1+e}{1-e} \right)^2 \approx 1.034$$







# Оценка радиационной температуры Земли



# Модель без учета атмосферы

~0.5 мкм

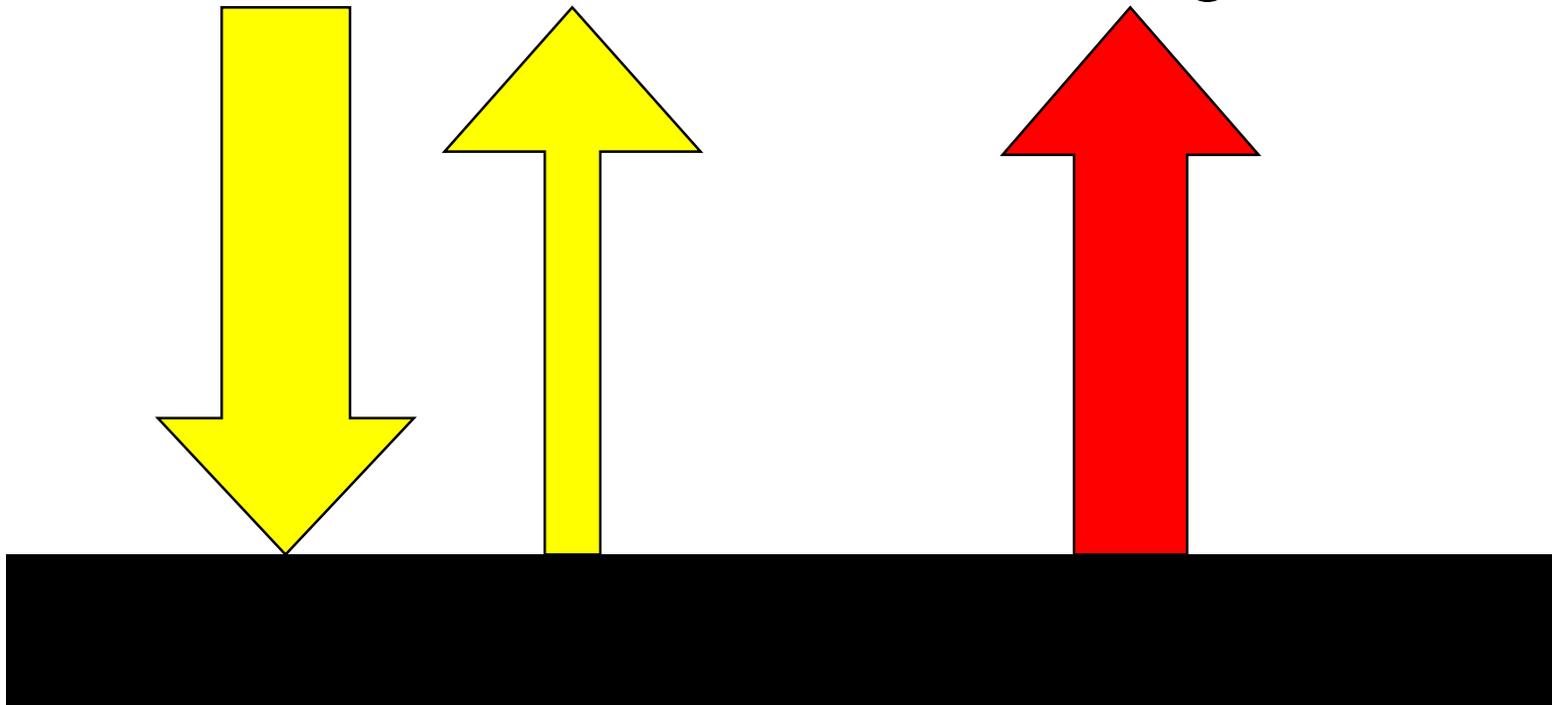
~10 мкм

Альbedo

$\Phi_{\odot}$

$A\Phi_{\odot}$

$\Phi_{\oplus}$



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

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

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

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

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

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

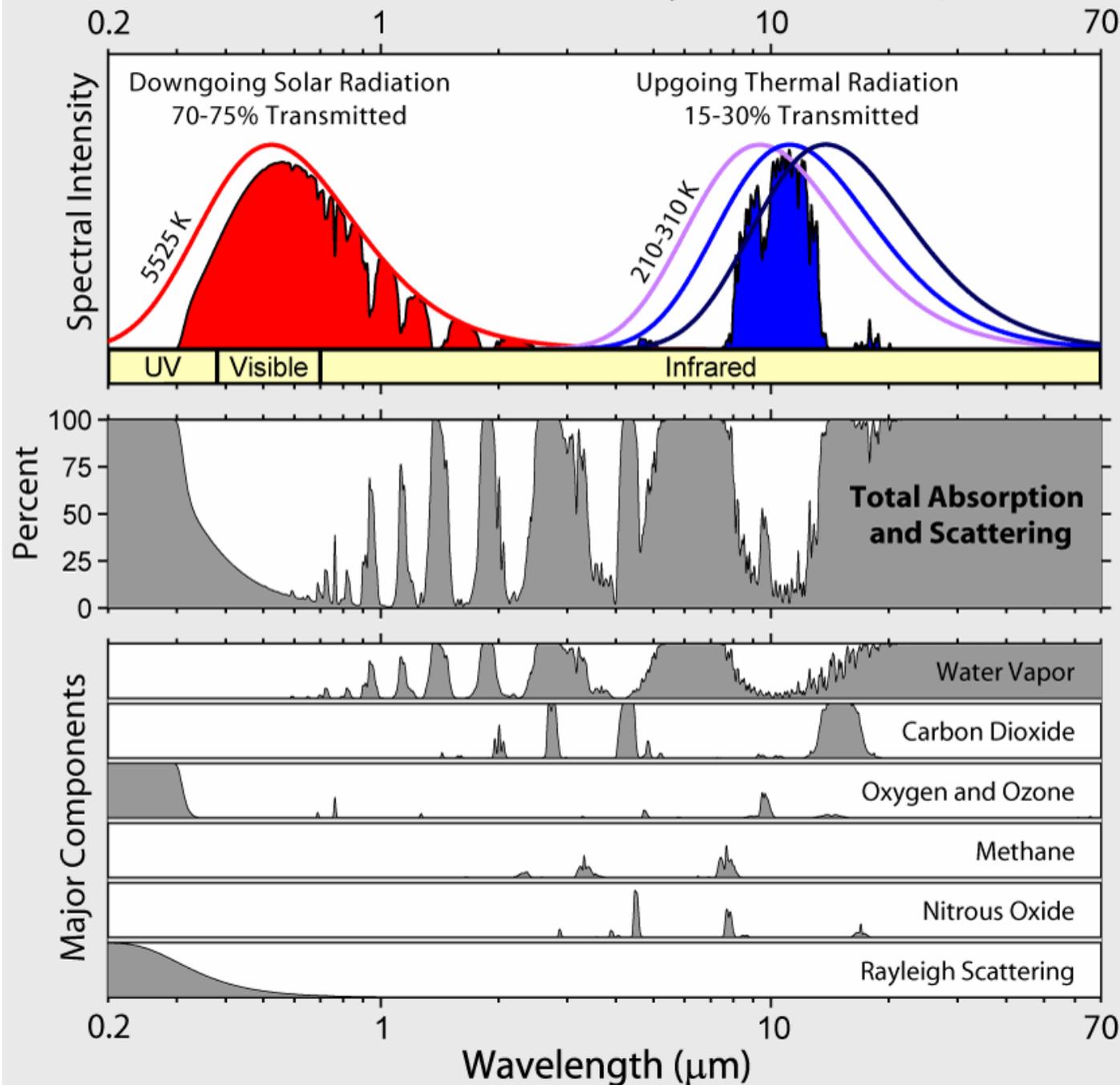
$$A \approx 0.3$$

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

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

$$r = 149.6 \cdot 10^9 \text{ м}$$

# Radiation Transmitted by the Atmosphere



Нормированные  
спектры  
излучения  
Солнца и Земли

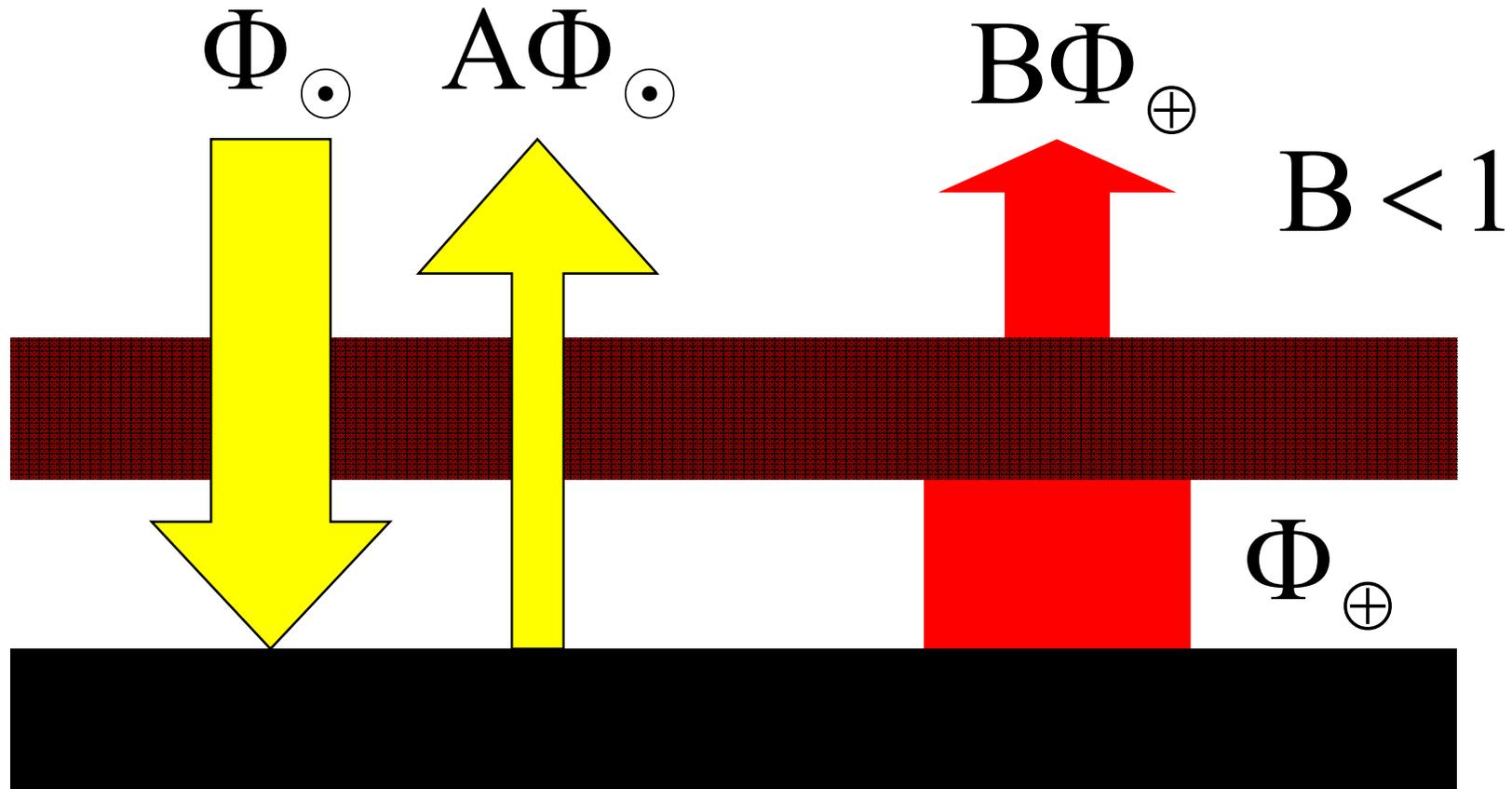
Спектр  
поглощения  
атмосферы

водяной пар  
углекислый газ  
кислород и озон  
метан  
закись азота

# Модель с учетом атмосферы

$\sim 0.5 \text{ мкм}$

$\sim 10 \text{ мкм}$



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

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

$$B < 1$$

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

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

$$B \approx 0.6$$

$$A \approx 0.3$$

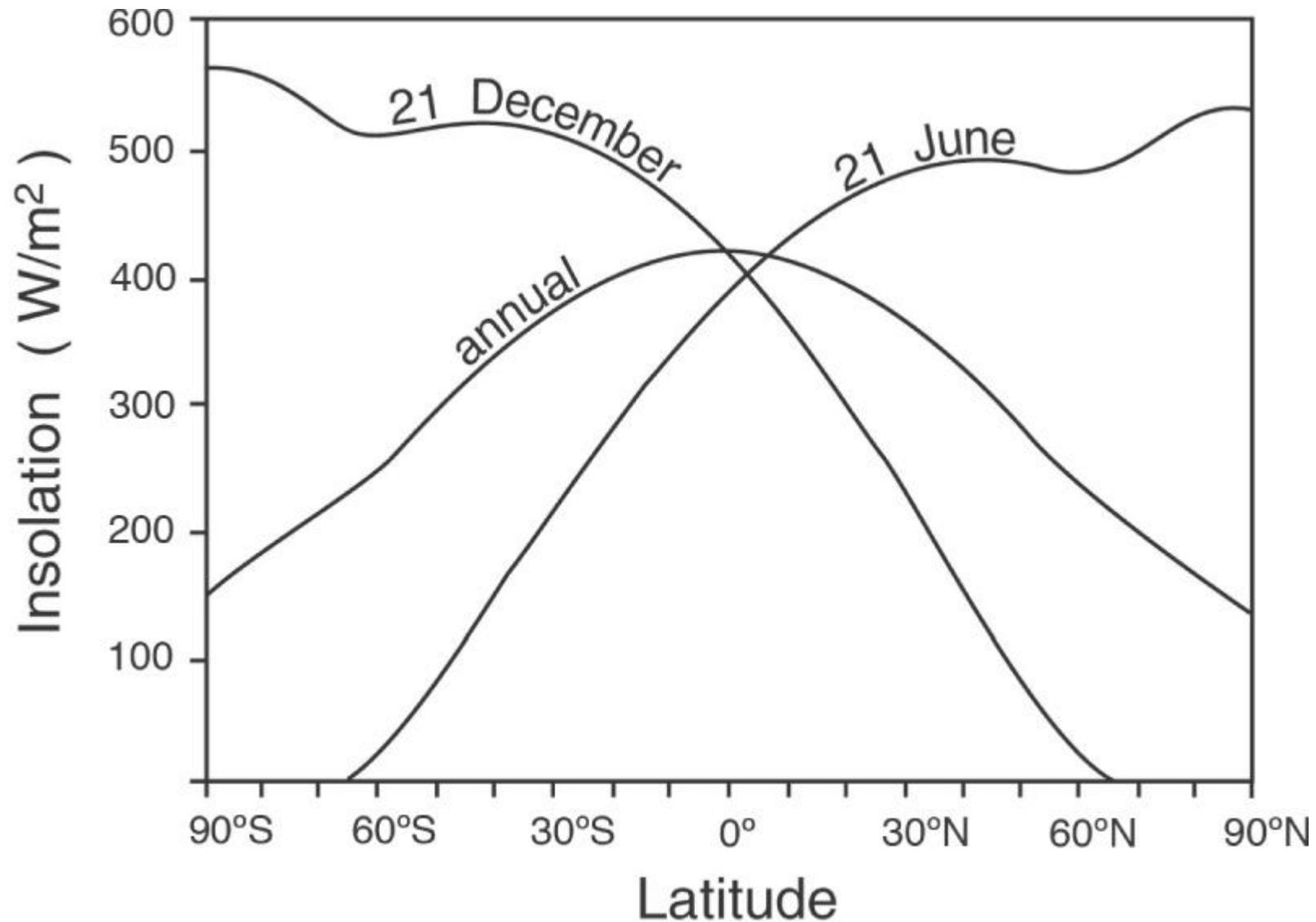
$$R_{\odot} = 6.96 \cdot 10^8 \text{ м}$$

$$r = 149.6 \cdot 10^9 \text{ м}$$

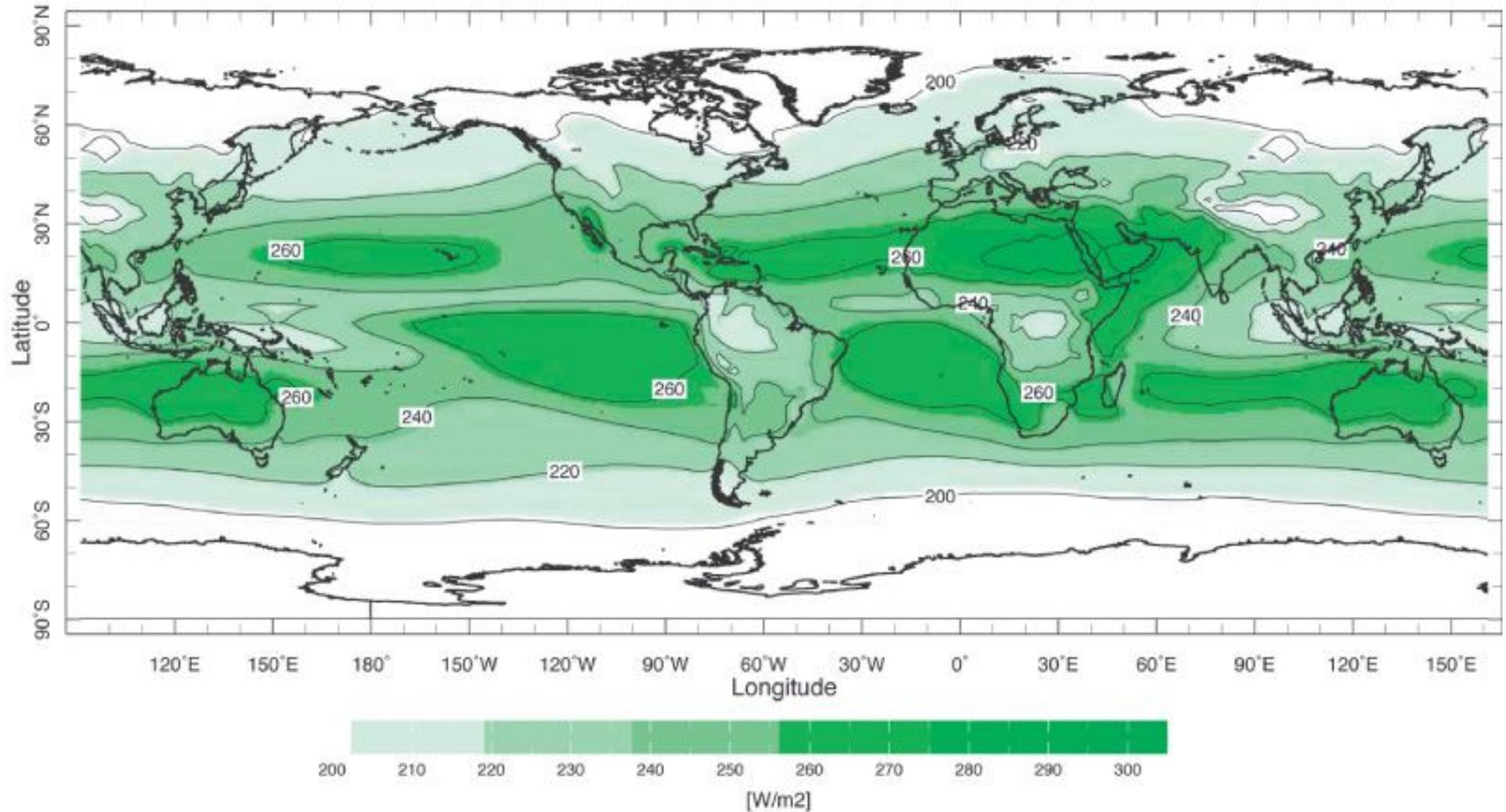
$$A(T_{\oplus}), \quad B(T_{\oplus})$$

**ВОЗМОЖНОСТЬ ГЛОБАЛЬНОГО  
ОЛЕДЕНЕНИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ**

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



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

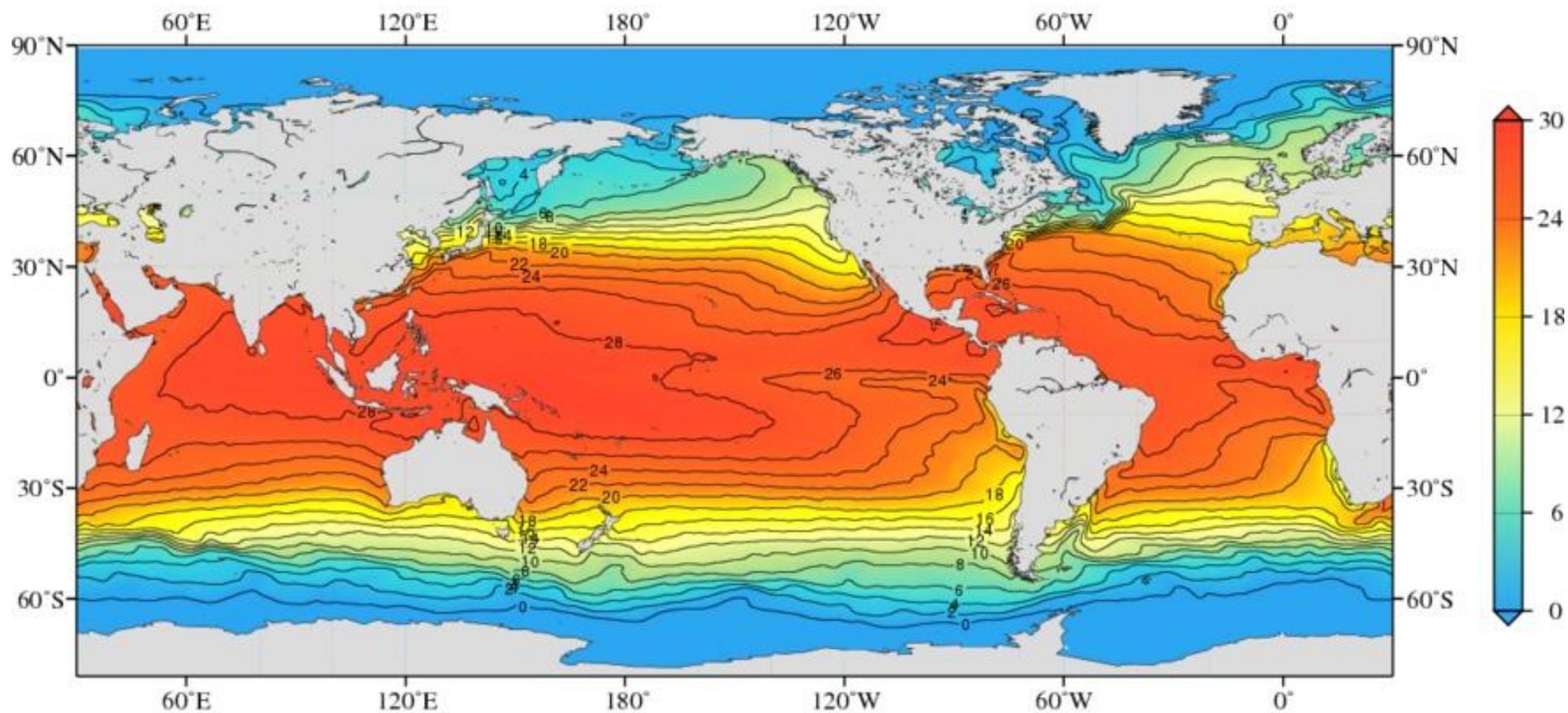


# Среднегодовая температура поверхности Мирового океана

World Ocean Atlas Climatology

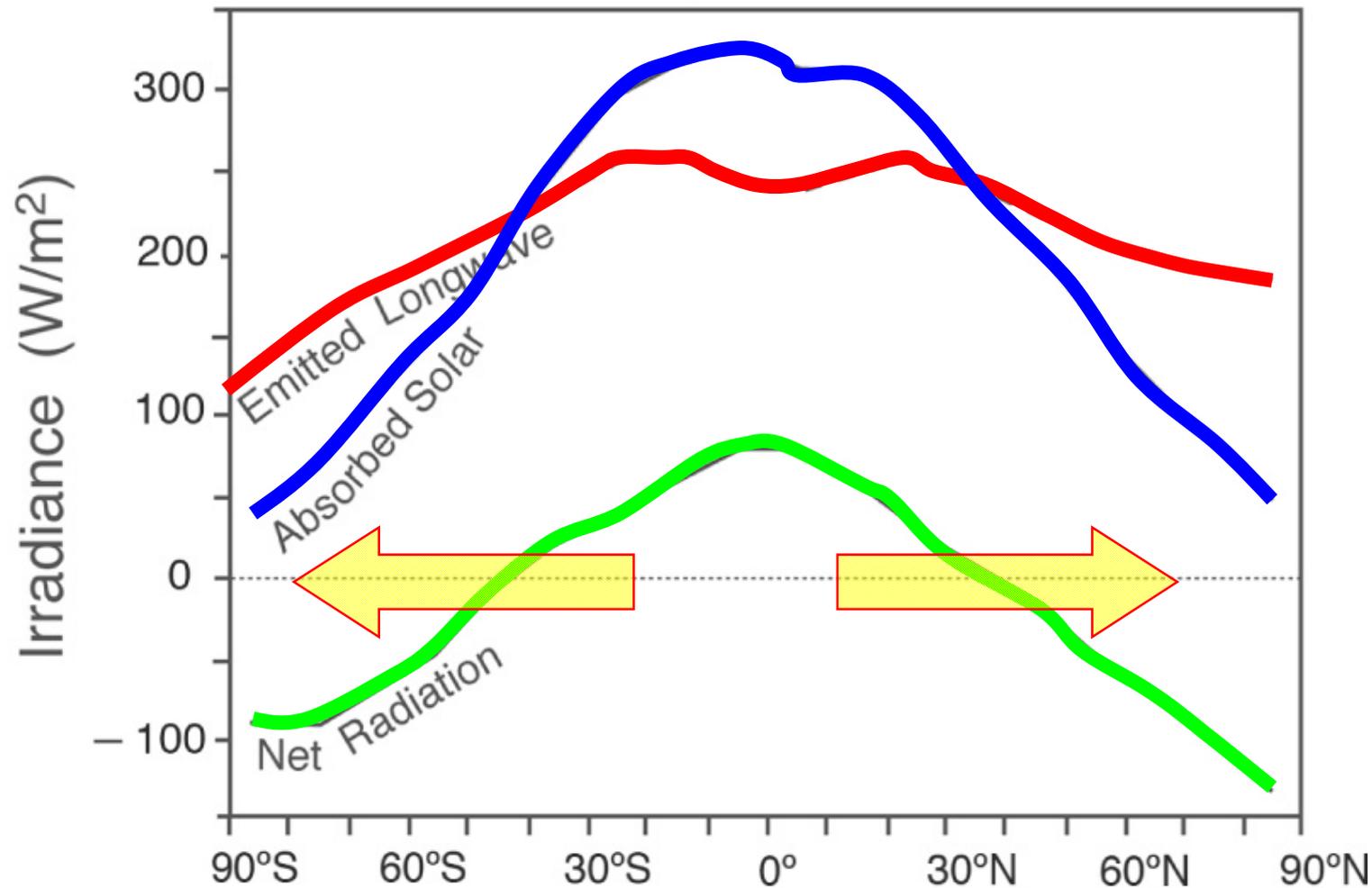
Decadal Average: 1955 - 2012

Contour Interval=2



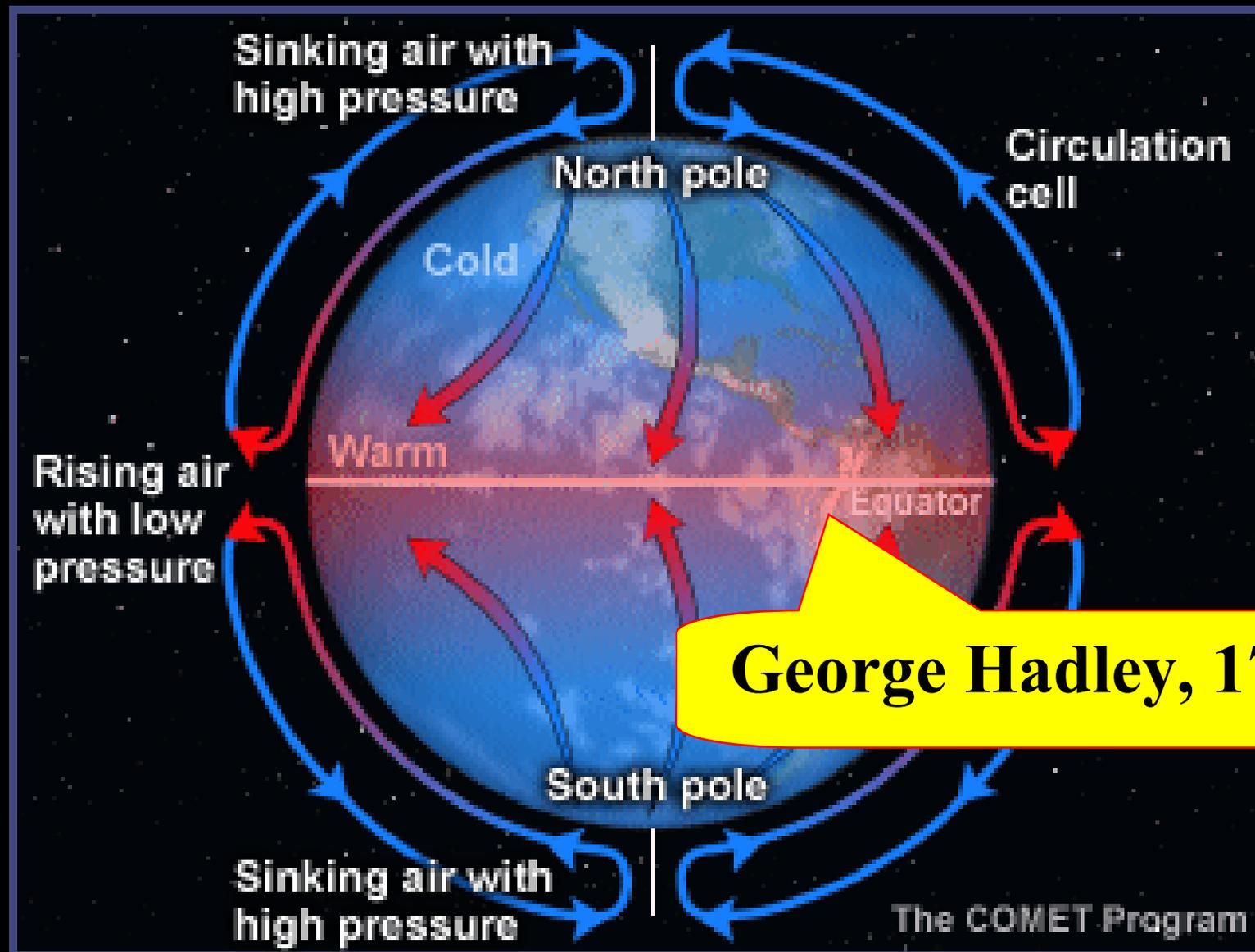
Annual temperature [°C] at the surface (quarter-degree grid)

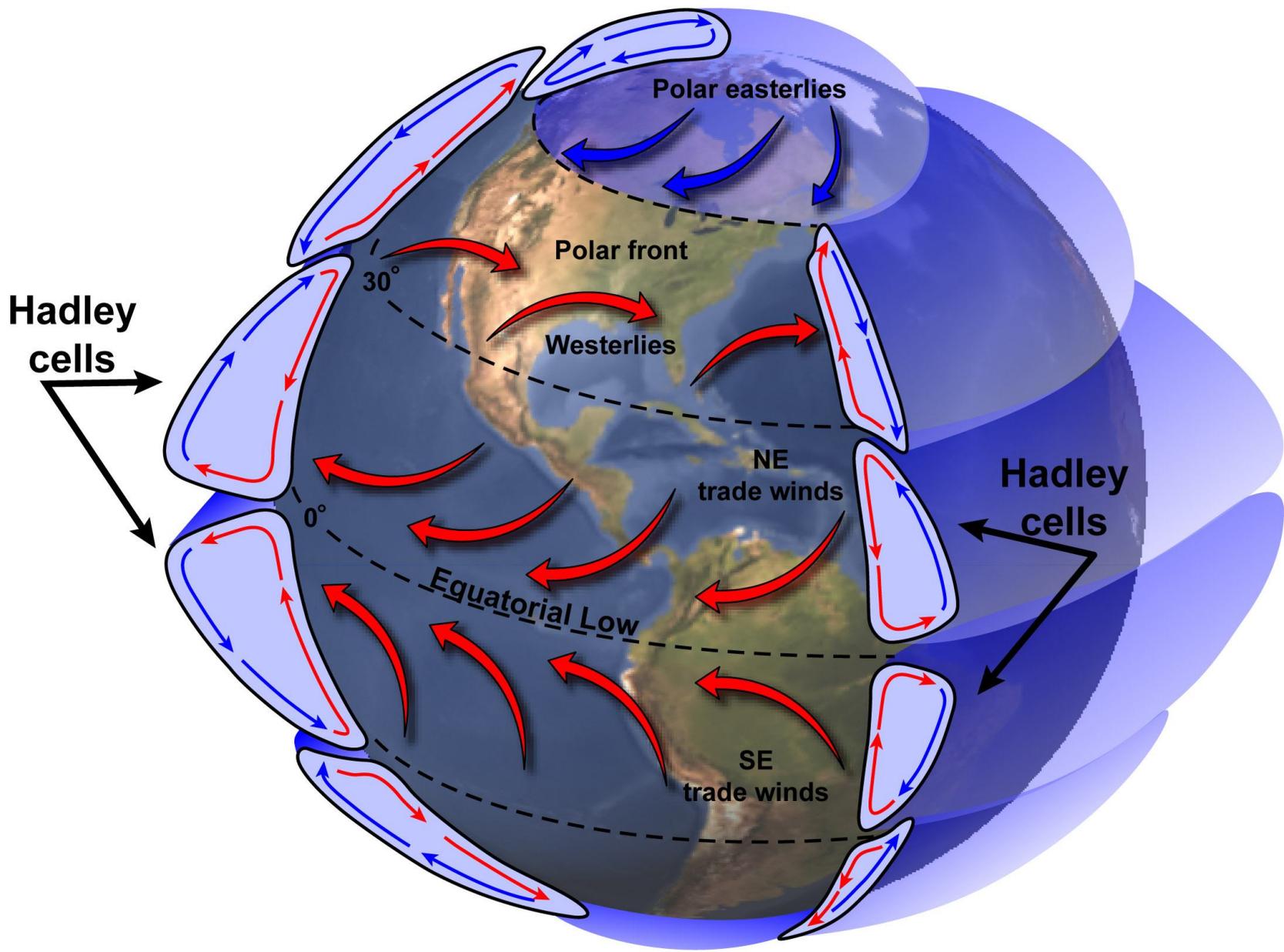
Среднегодовые широтные распределения радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ):  
поглощенной солнечной, излученной длинноволновой  
и их разница



Существует поток тепла от экватора к полюсам

# Упрощенная модель циркуляции атмосферы



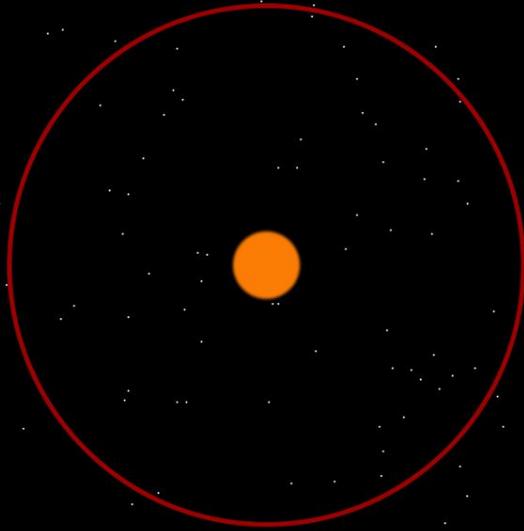




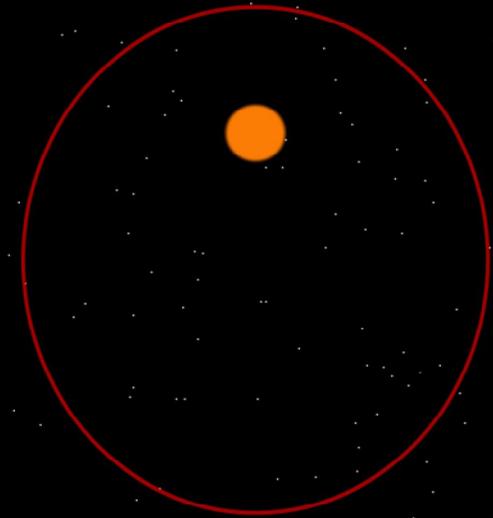
*Милутин Миланкович*  
(1879-1958 гг.)  
сербский математик,  
создавший  
математическую  
теорию климата

## Циклы Миланковича

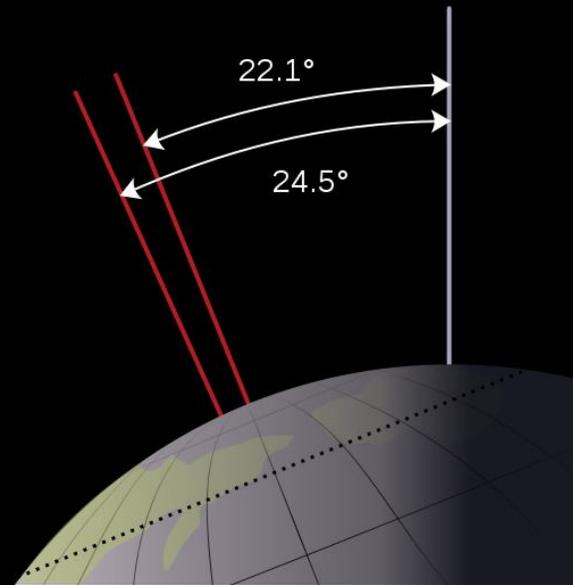
1. Эксцентриситет орбиты:  
0.0007-0.0658 с периодом  
100 тыс. лет
2. Наклон земной оси:  $22.07^{\circ}$ -  
 $24.57^{\circ}$  с периодом 41 тыс. лет
3. Прецессия: 19 и 23 тыс. лет  
(климатическая прецессия –  
вариации направления оси  
вращения Земли относительно  
плоскости орбиты)



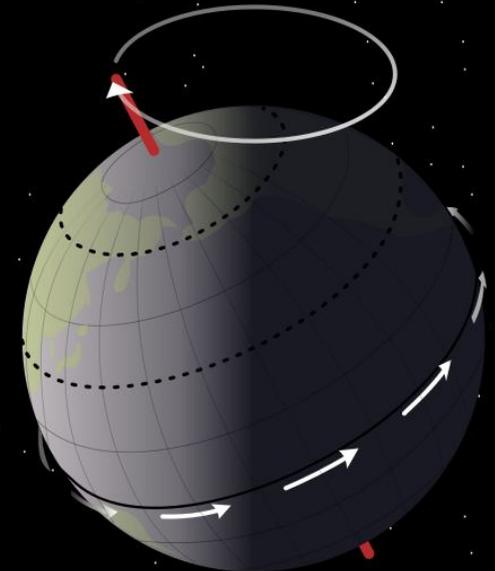
**Эксцентриситет орбиты:  
0.0007-0.0658 с периодом  
~100 тыс. лет**



**Наклон земной оси:  
22.07°-24.57° с  
периодом 41 тыс. лет**



**Прецессия: 19 и 23 тыс. лет  
(климатическая прецессия – вариации  
направления оси вращения Земли  
относительно плоскости орбиты)**



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

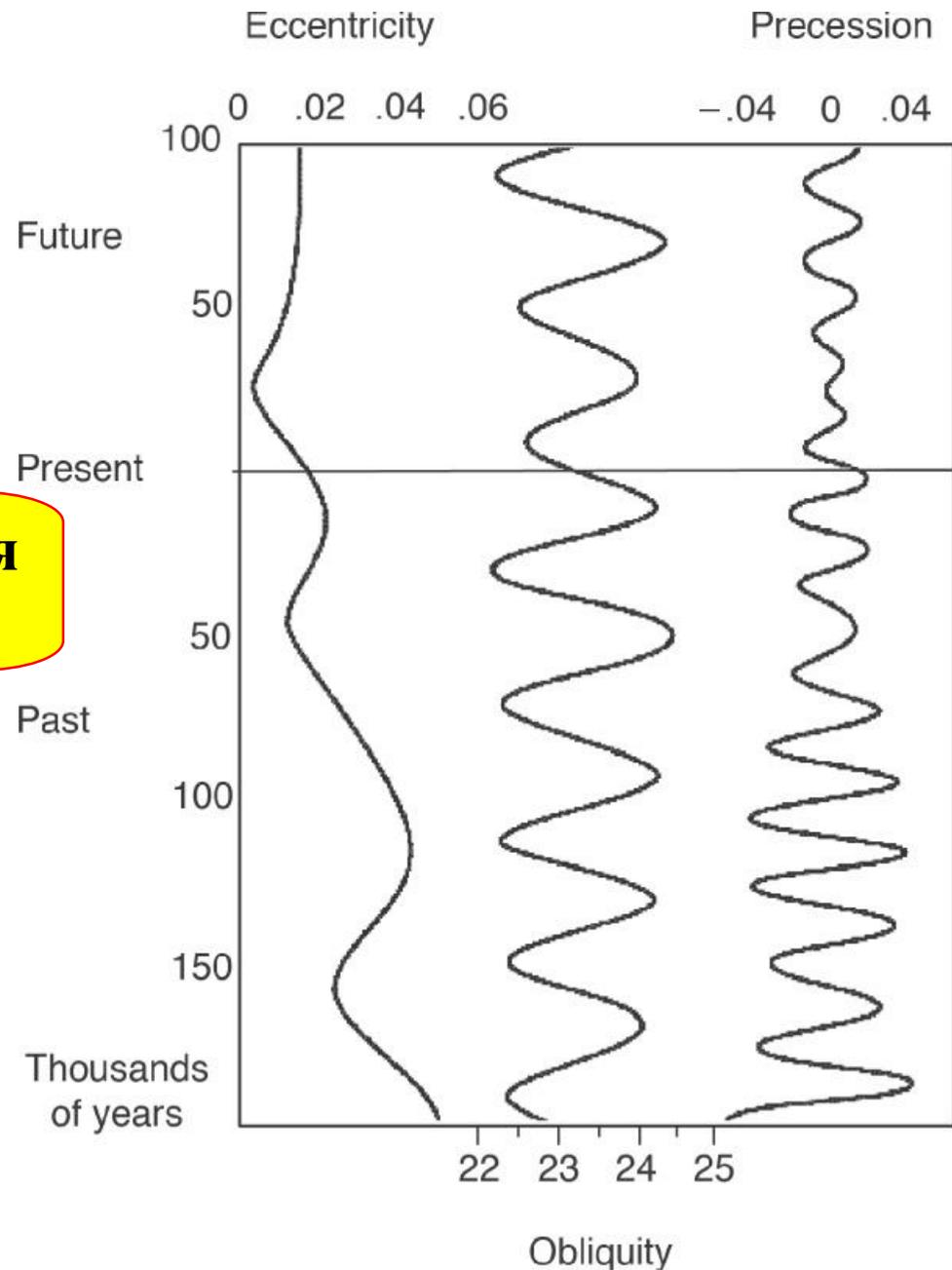
**средняя  
инсоляция на  
широте  $\varphi$**

$\varphi_1(t)$

**эквивалентная  
широта**

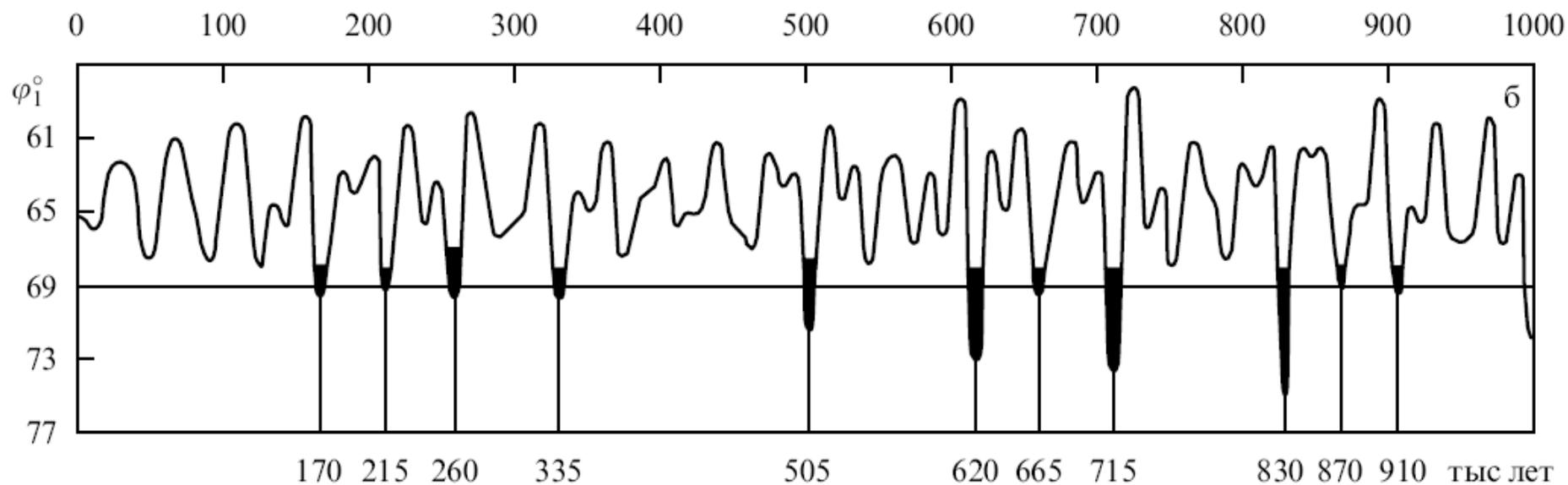
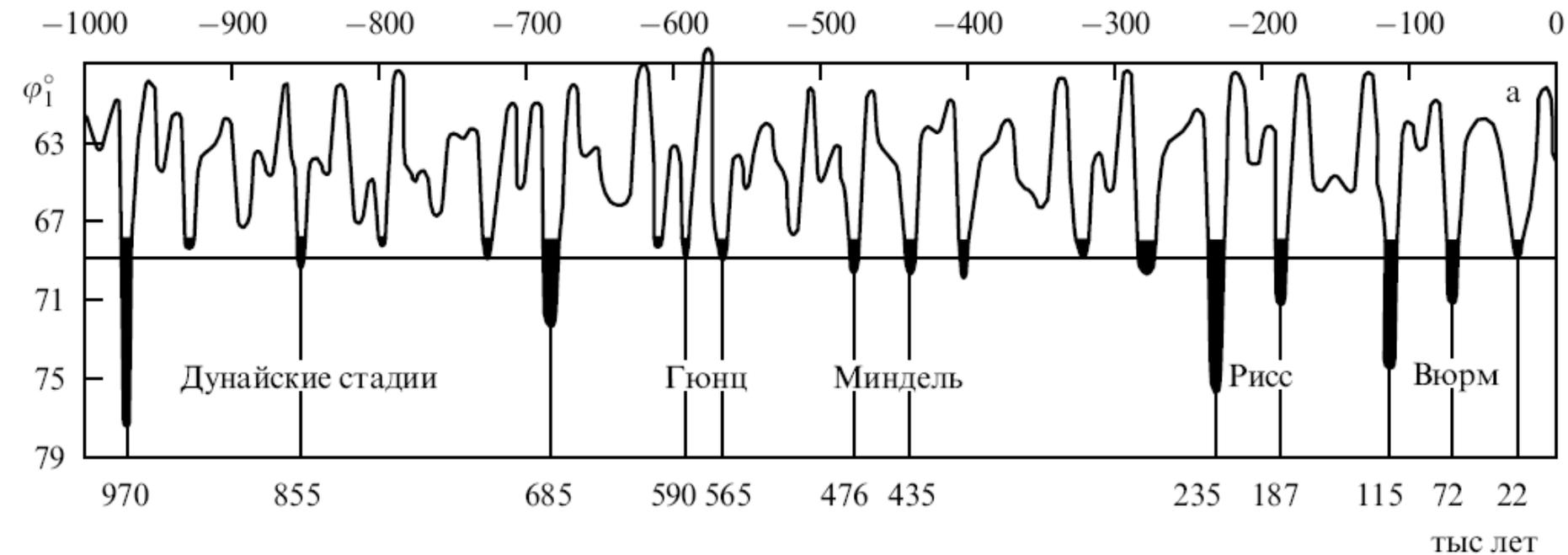
**астрономическая  
эпоха**

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



(From Berger and Loutre, (1992).)

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



**никак не связано с  
циклами Миланковича!**

**Малый ледниковый период (XIV—XIX века)**



**Питер Брейгель  
(1565 г.)**

**Элементы  
геофизической  
гидродинамики**

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

**Классическая гидродинамика**

**бароклинная  
жидкость**

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

**баротропная  
жидкость**

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

**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**

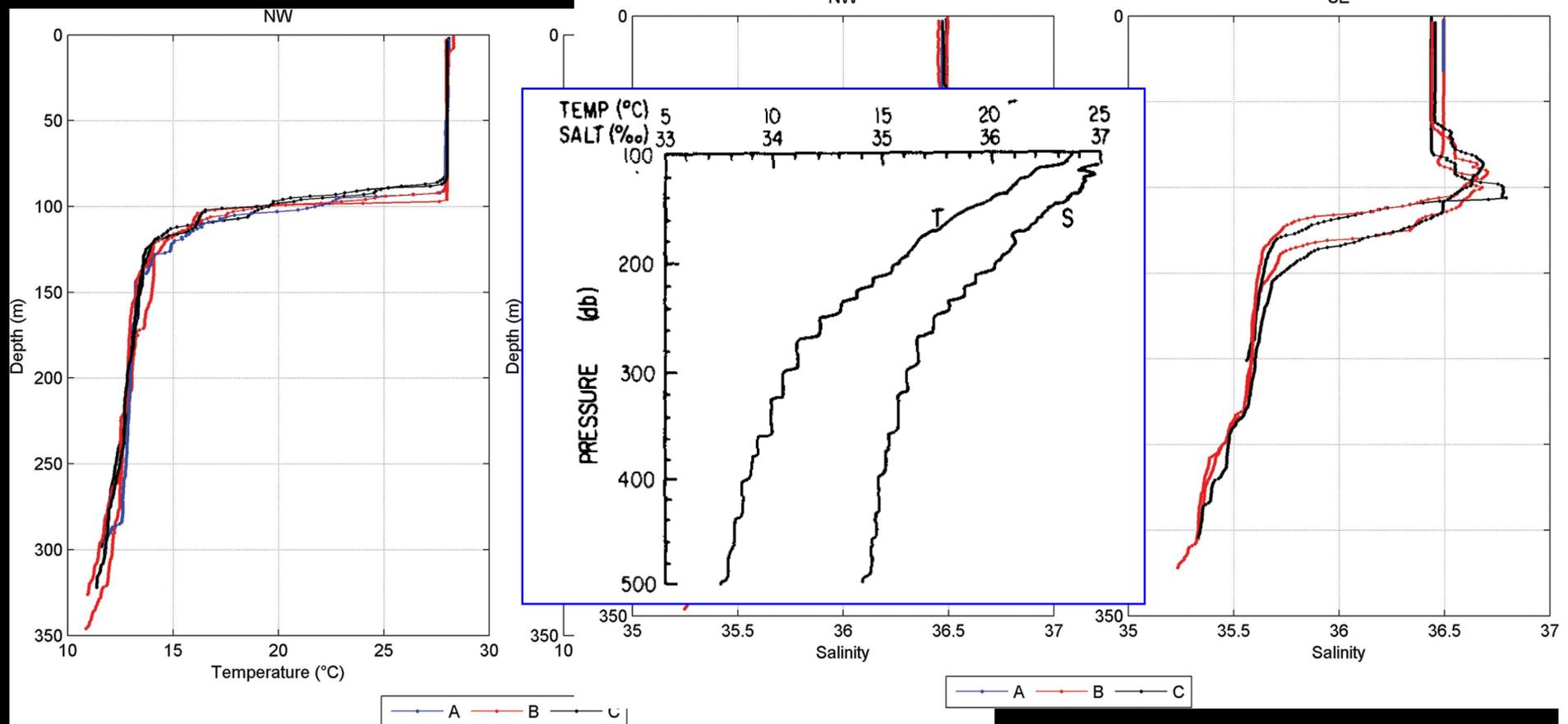
*сила градиента давления = сила Кориолиса*

# **Устойчивость стратификации**

# Стратификация –

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

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



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**

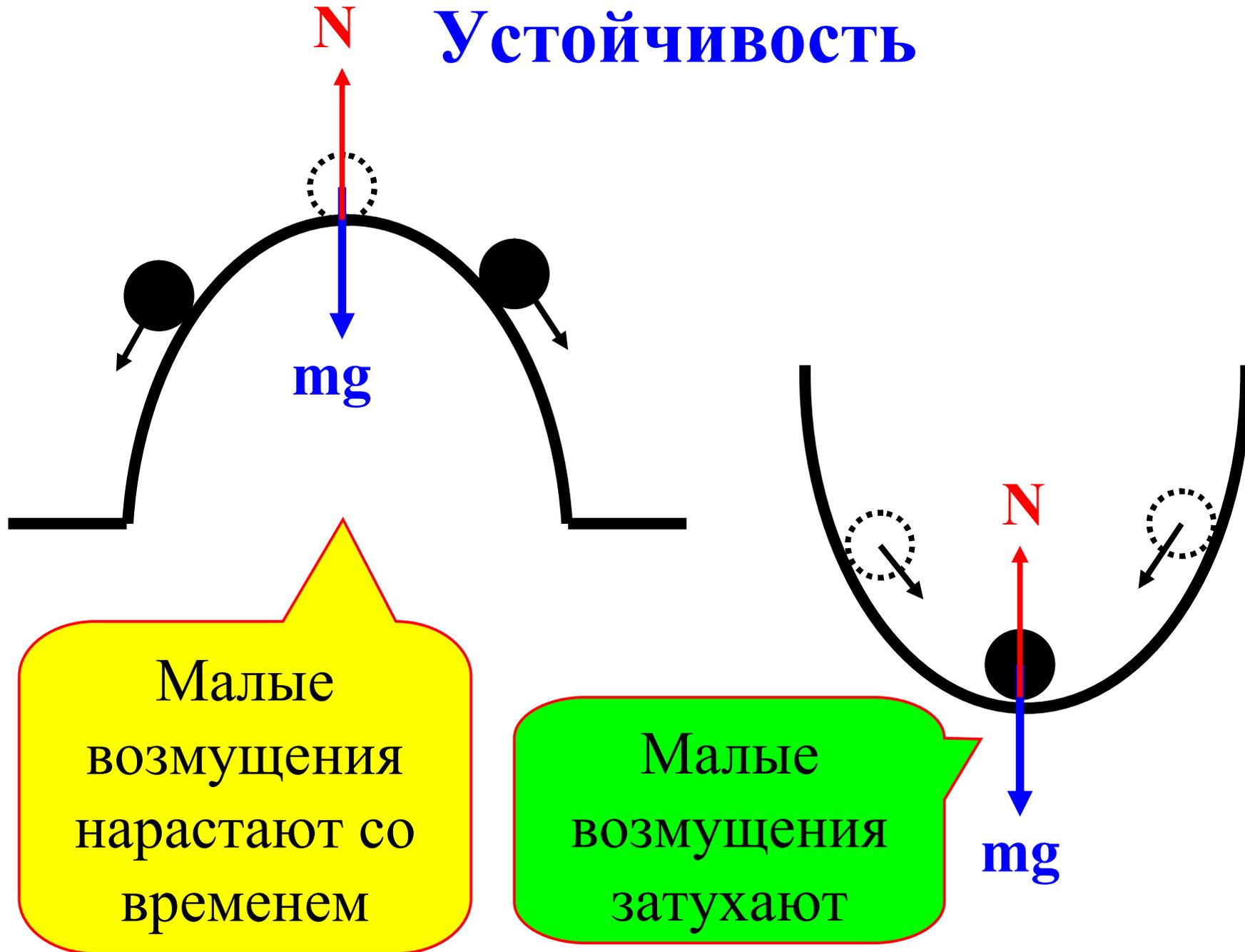
*сила градиента давления = сила тяжести*

**по горизонтали:**

геострофический баланс

*сила градиента давления = сила Кориолиса*

# Устойчивость

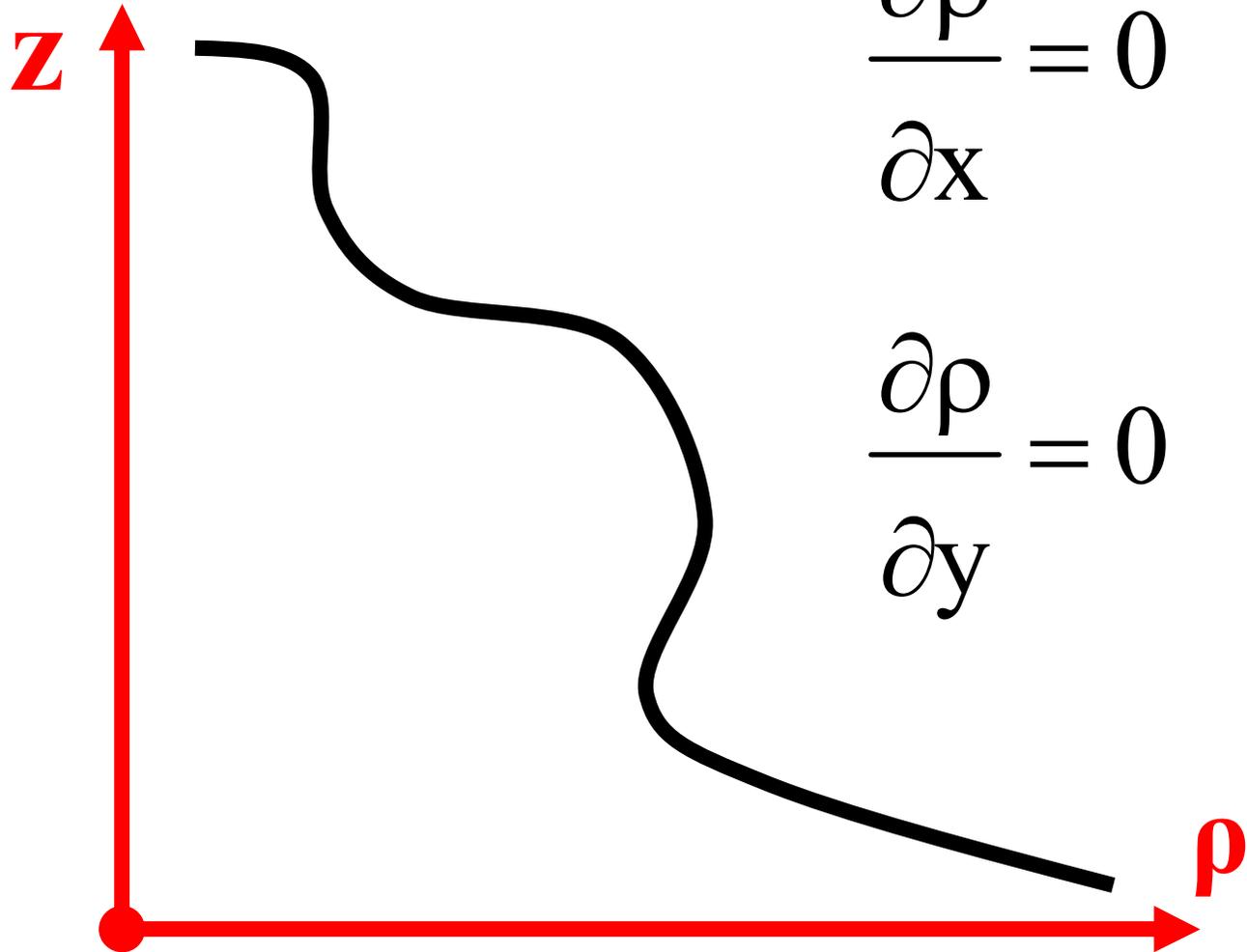
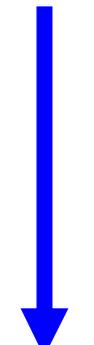


Малые  
возмущения  
нарастают со  
временем

Малые  
возмущения  
затухают

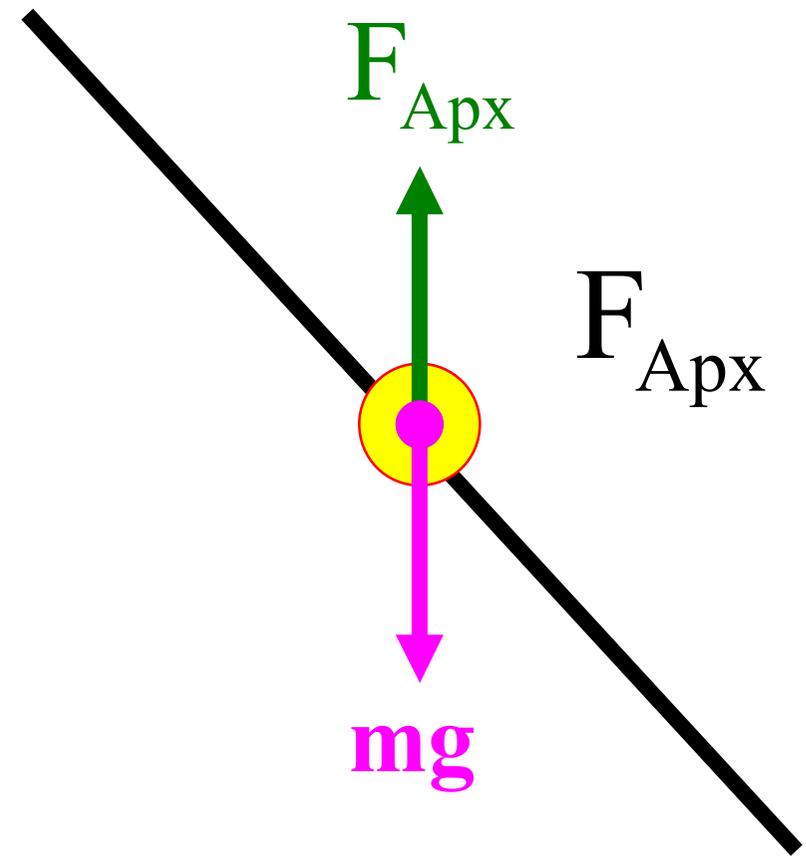
# Стратификация устойчива?

$\sigma_\theta$



$g$

$z$

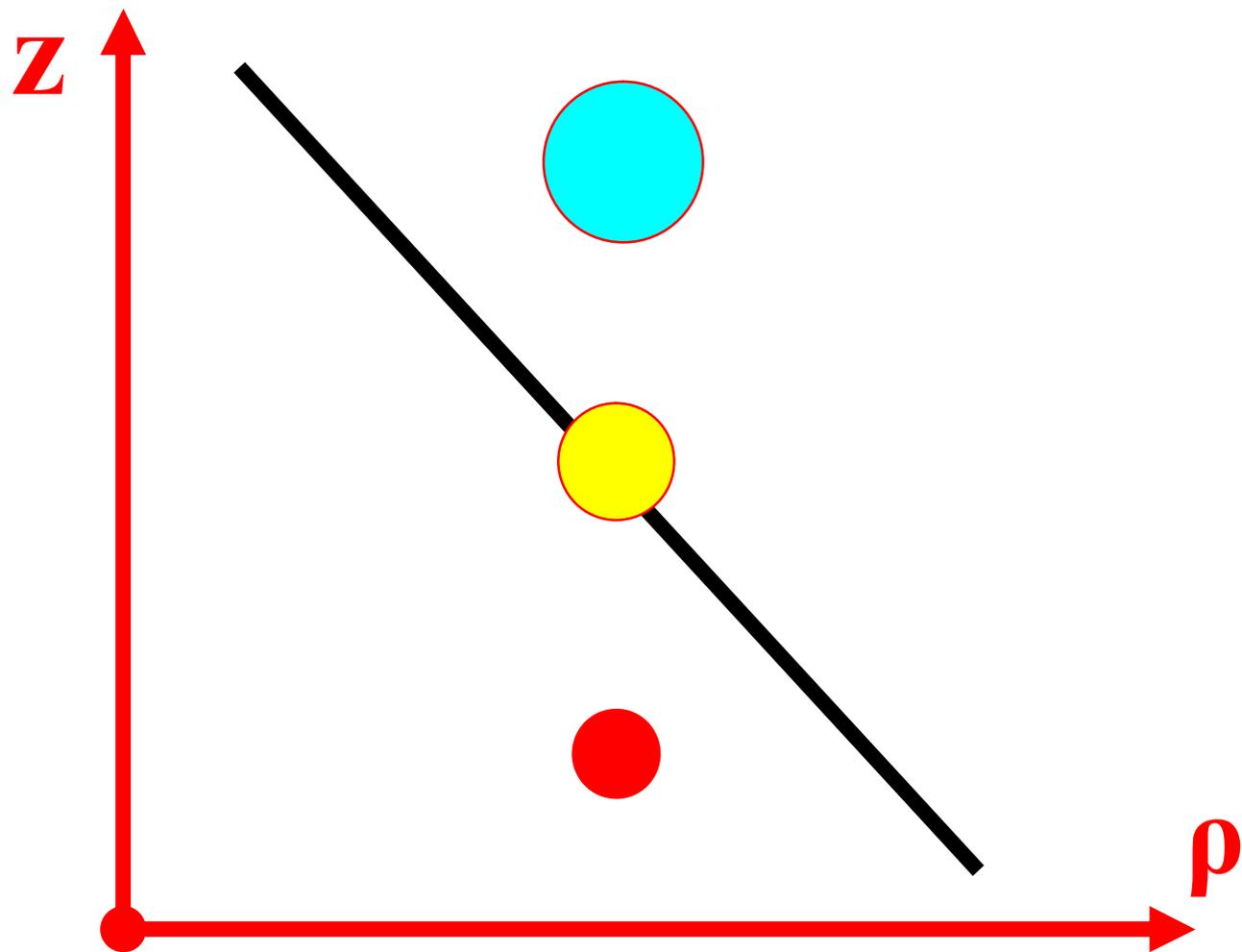


$F_{Apx}$

$mg$

$$F_{Apx} = mg$$

$\rho$



# Уравнение движения частицы по вертикали в стратифицированной среде

$$F_{\Sigma} = F_{\text{Арх}} - mg = Vg(\rho_{\text{среды}} - \rho_{\text{частицы}})$$

$$\rho_{\text{среды}} = \rho_0 + \frac{d\rho}{dz} z$$

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

**фактический градиент**

**адиабатический градиент**

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

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

**уравнение колебаний**

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

**частота Вейселя-Брента**

в океане / атмосфере

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

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

**адиабатический градиент**

$$\left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s = \left( \frac{d\rho(p(z))}{dz} \right)_s = \left( \frac{d\rho}{dp} \right)_s \frac{dp}{dz} = -\frac{\rho g}{c^2}$$

$$\left( \frac{d\rho}{dp} \right)_s = \frac{1}{c^2}$$

**скорость  
звука**

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

**закон  
гидро-  
статики**

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

**N – действительная величина**

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

$$\frac{d\rho}{dz} - \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s < 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\rho}{dz} < \left( \frac{d\rho}{dz} \right)_s$$

**Устойчивая  
стратификация**

**N – мнимая величина**

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

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

**Неустойчивая  
стратификация**

# Критерий устойчивости стратификации:

**соотношение фактического и  
адиабатического градиентов плотности**

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

**Устойчивая  
стратификация**

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

**Неустойчивая  
стратификация**