

Введение в физику гидросферы

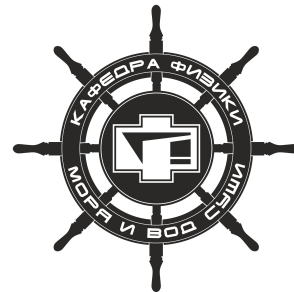
2024 Лекция №3

Носов Михаил Александрович

кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова



Элементы теории климата

- ❑ **Климатом** называется статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой «Океан-Суша-Атмосфера» за период в несколько десятилетий (~30 лет)
- ❑ **Погода** – мгновенное состояние атмосферы

Блоки климатической системы (проявление сезонных колебаний)

Атмосфера в целом

Малоинерционный блок, приспособляющийся к состоянию океана и суши

Масса=1

Теплоемкость = 1

+ ледяные щиты
⇒
высокая тепловая инерция

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

Самое инерционное звено

Масса = 16.4

Теплоемкость = 70

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

Масса=0.55

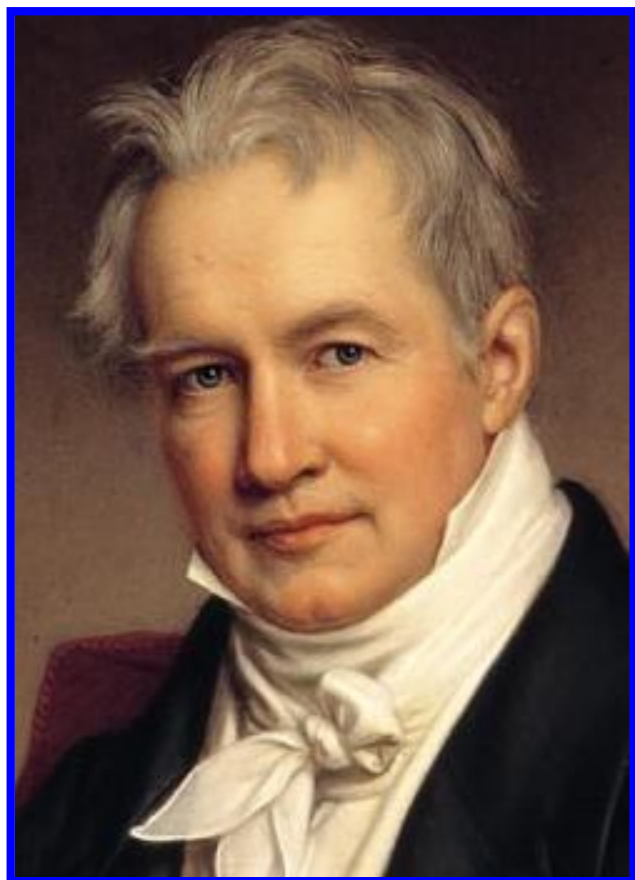
Теплоемкость = 0.46

- 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**



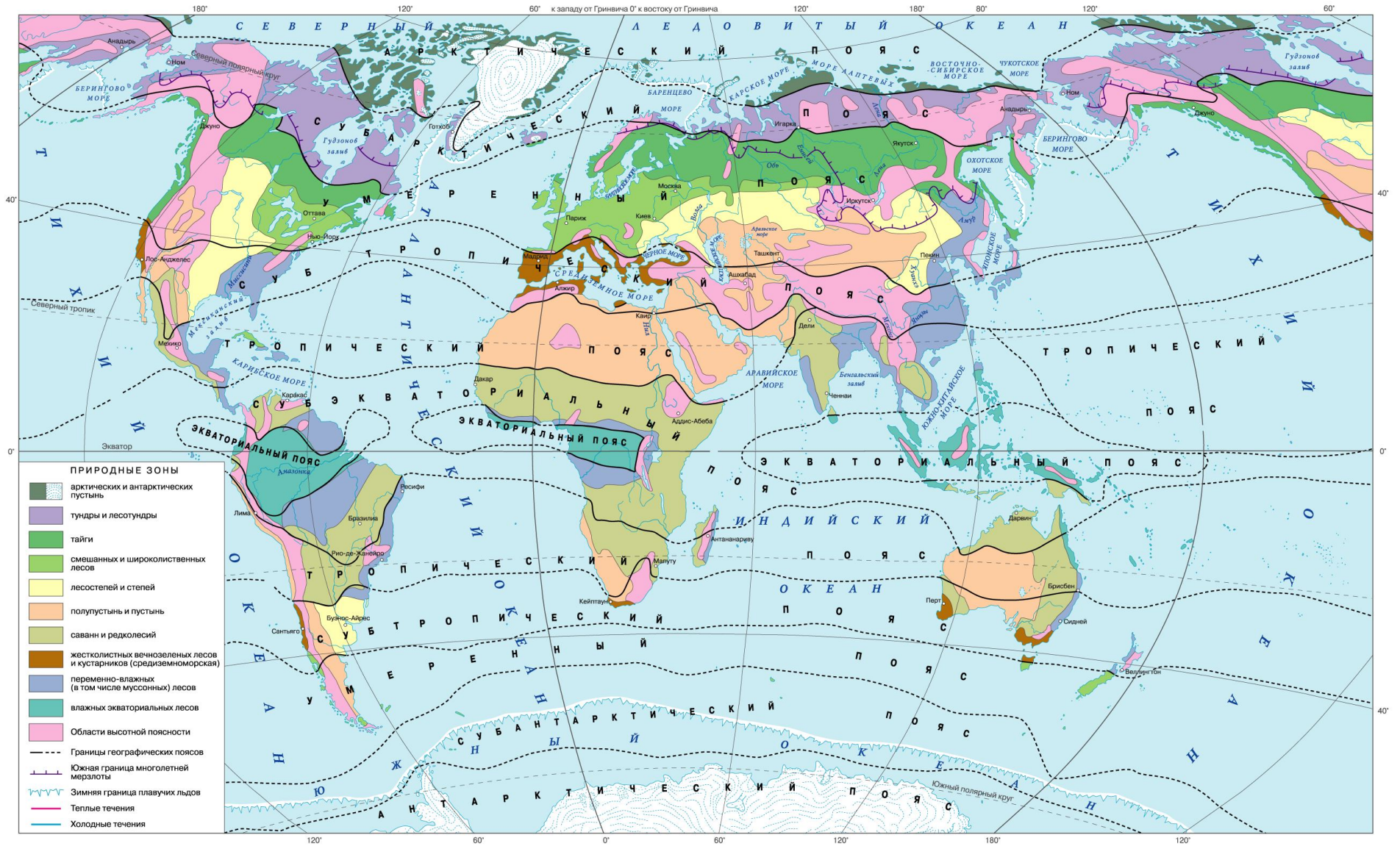
Александр фон Гумбольдт
(1769-1859 гг.)

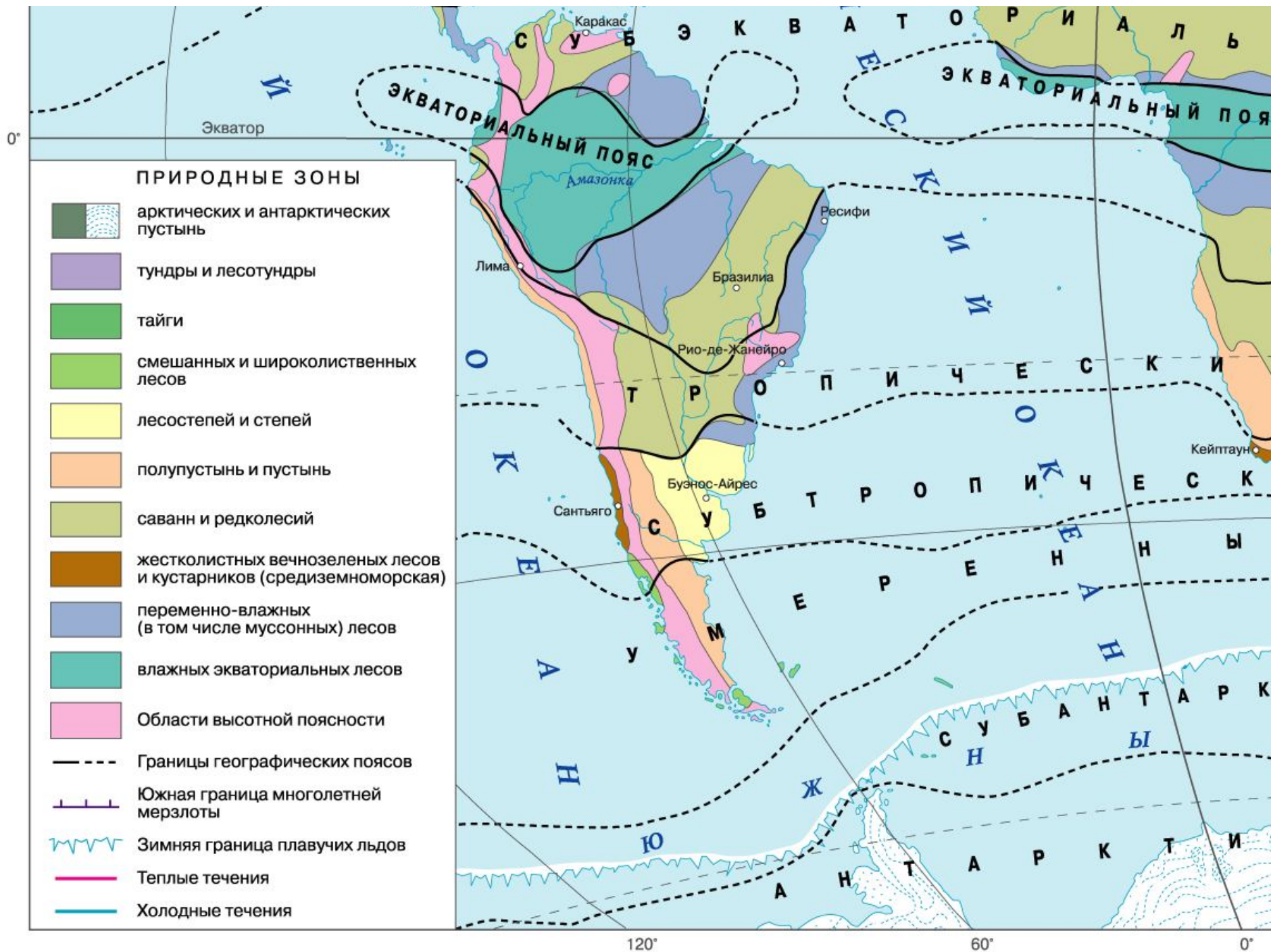
– немецкий учёный-
энциклопедист, физик,
метеоролог, географ,
ботаник, зоолог и
путешественник

- **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

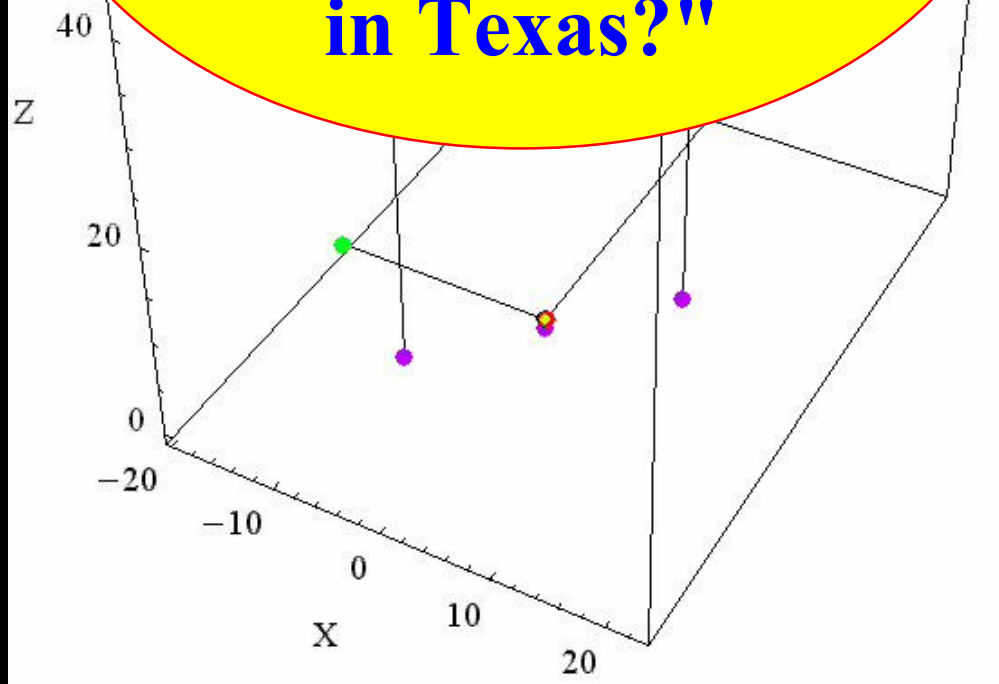




- ❑ **Климатом** называется статистический ансамбль состояний, проходимых климатической системой «Океан-Суша-Атмосфера» за период в несколько десятилетий (~30 лет)
- ❑ **Погода** – мгновенное состояние атмосферы
- ❑ Климат **НЕ ЯВЛЯЕТСЯ** некоторым устойчивым средним состоянием, флуктуации которого -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

$\text{Sigma}=10$ $b=2.66667$ $r=30$

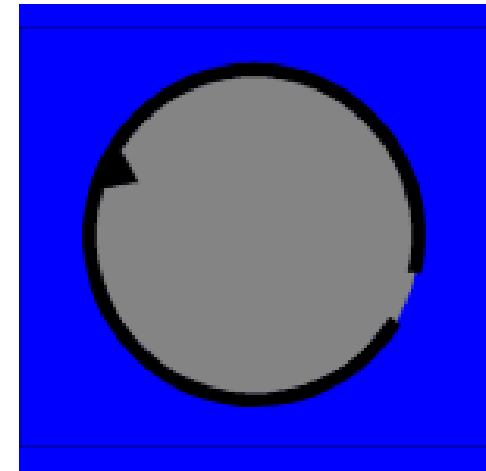
**"Does the Flap of
a Butterfly's
Wings in Brazil
Set Off a Tornado
in Texas?"**



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

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])

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

**спектральная
плотность**

T – температура

λ – длина волны

c – скорость света

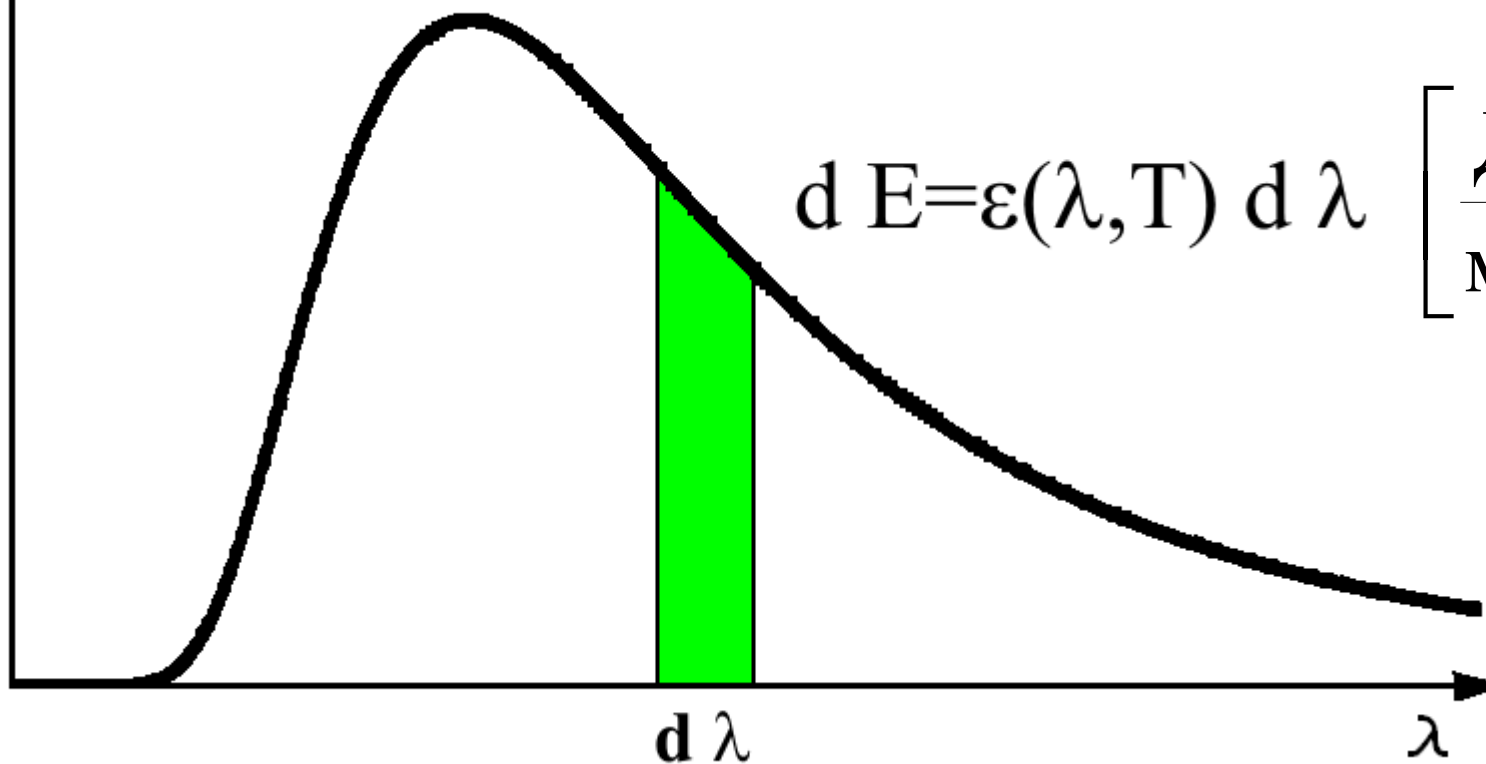
$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка

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

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

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

ε

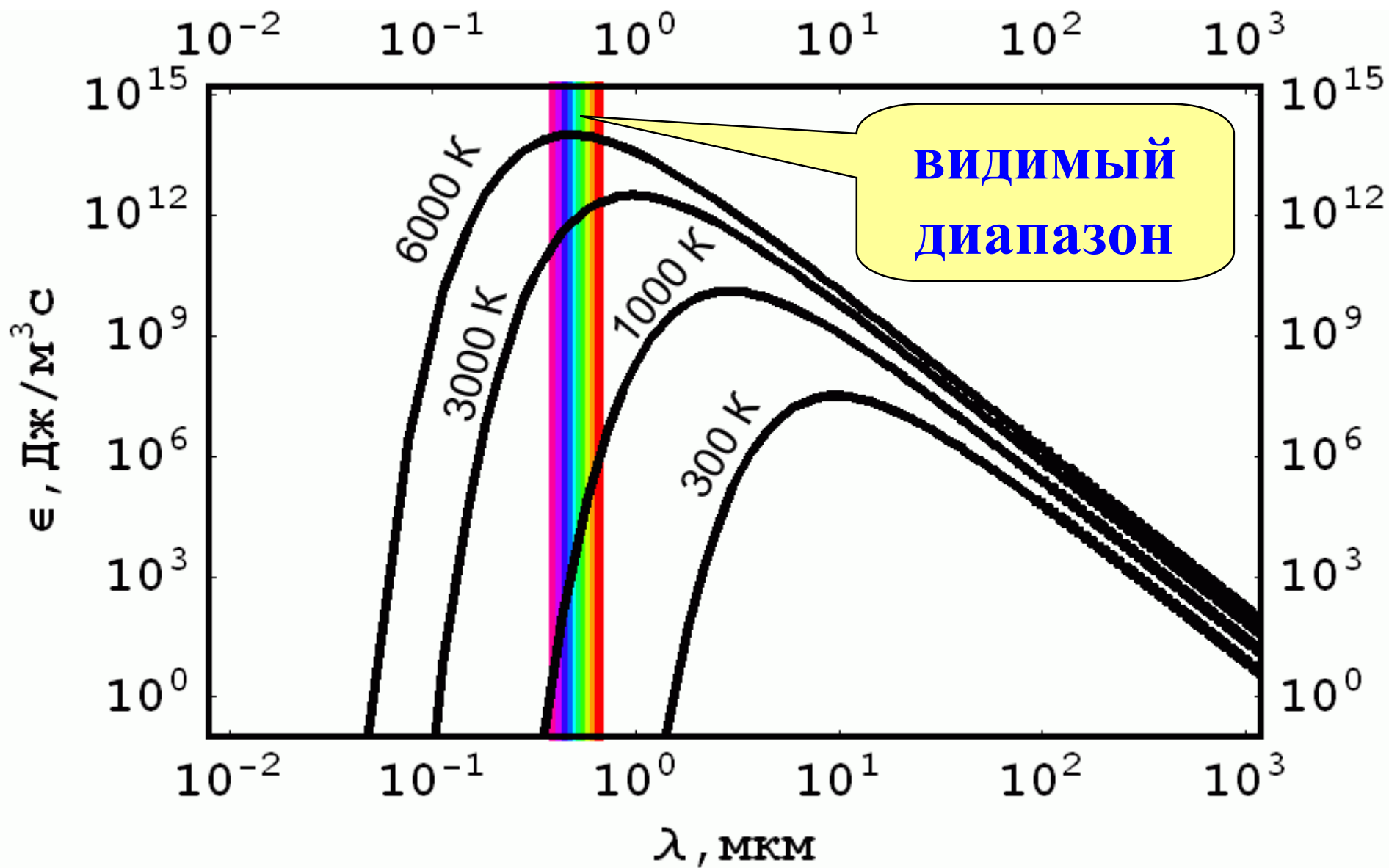


$$dE = \varepsilon(\lambda, T) d\lambda \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} \right]$$

$d\lambda$

λ

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



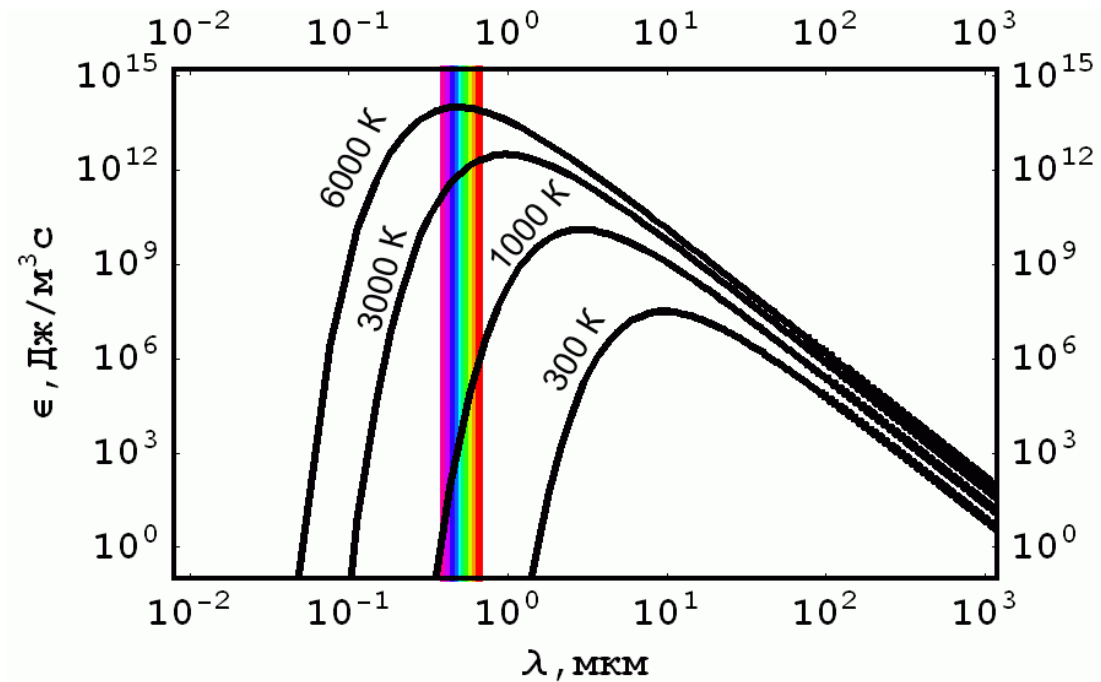
800-1200 °C



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]

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

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

постоянная
Стефана-Больцмана

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

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 β :

Каменный уголь

0.8

Сажа

0.94 - 0.96

Платиновая и висмутовая черни

0.93 - 0.99

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

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).

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).

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

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

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

АЧТ при $T=5770 \text{ К}$

Доля энергии, получаемая Землей

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

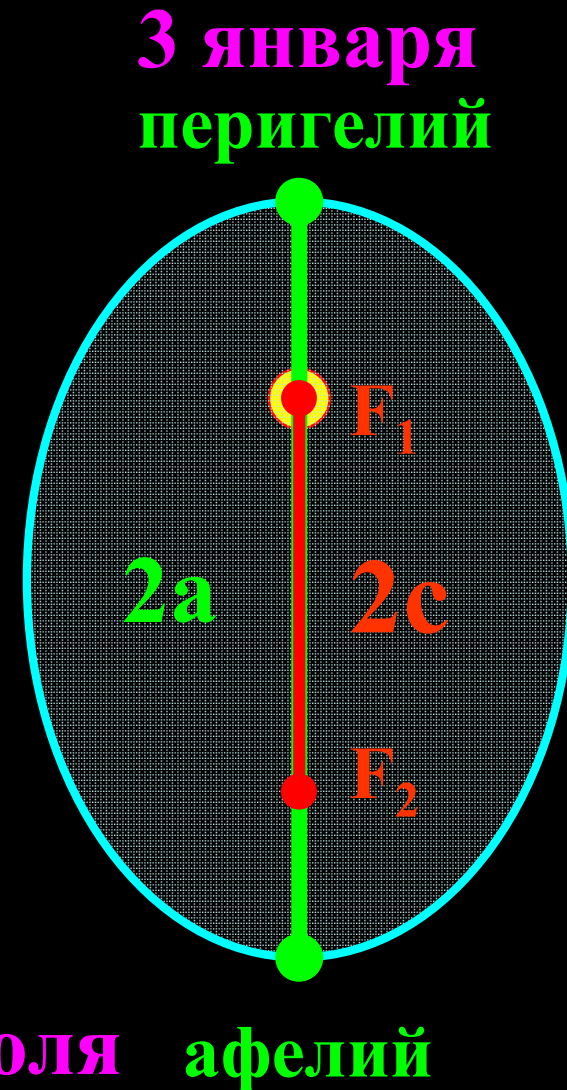
$$L_{\oplus} / L_{\odot} = \pi R_{\oplus}^2 / 4\pi r^2 \approx 4.4 \cdot 10^{-10}$$

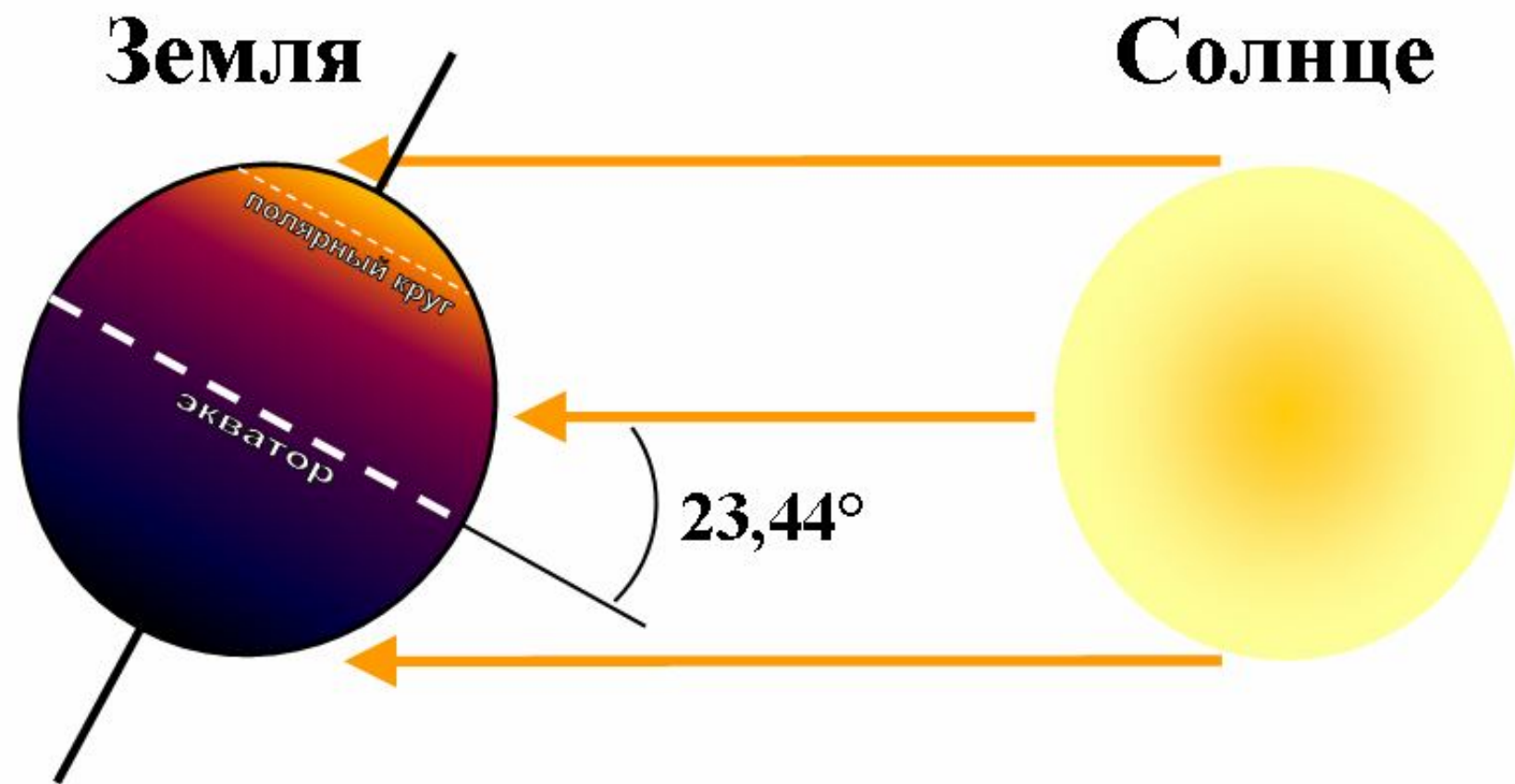
Сезонные вариации солнечной радиации (но не солнечной постоянной!)

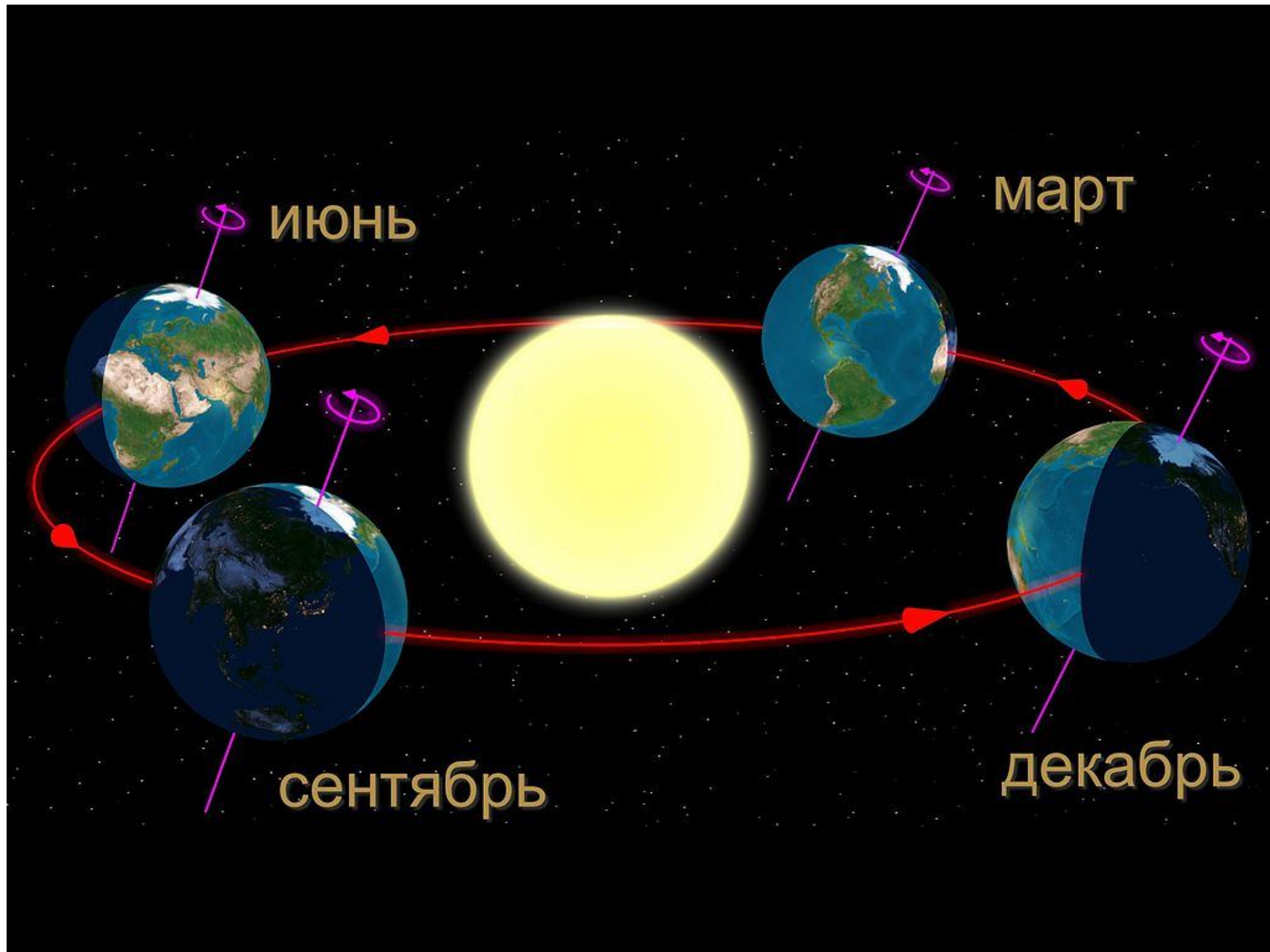
$$\Phi \sim \frac{1}{r^2} \Rightarrow \frac{\Phi_{\text{перигелий}}}{\Phi_{\text{афелий}}} = \left(\frac{r_{\text{афелий}}}{r_{\text{перигелий}}} \right)^2$$

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

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







ИЮНЬ

март

сентябрь

декабрь

В спектре планет
всегда присутствуют
два максимума:

1. отраженное
солнечное излучение

2. тепловое излучение

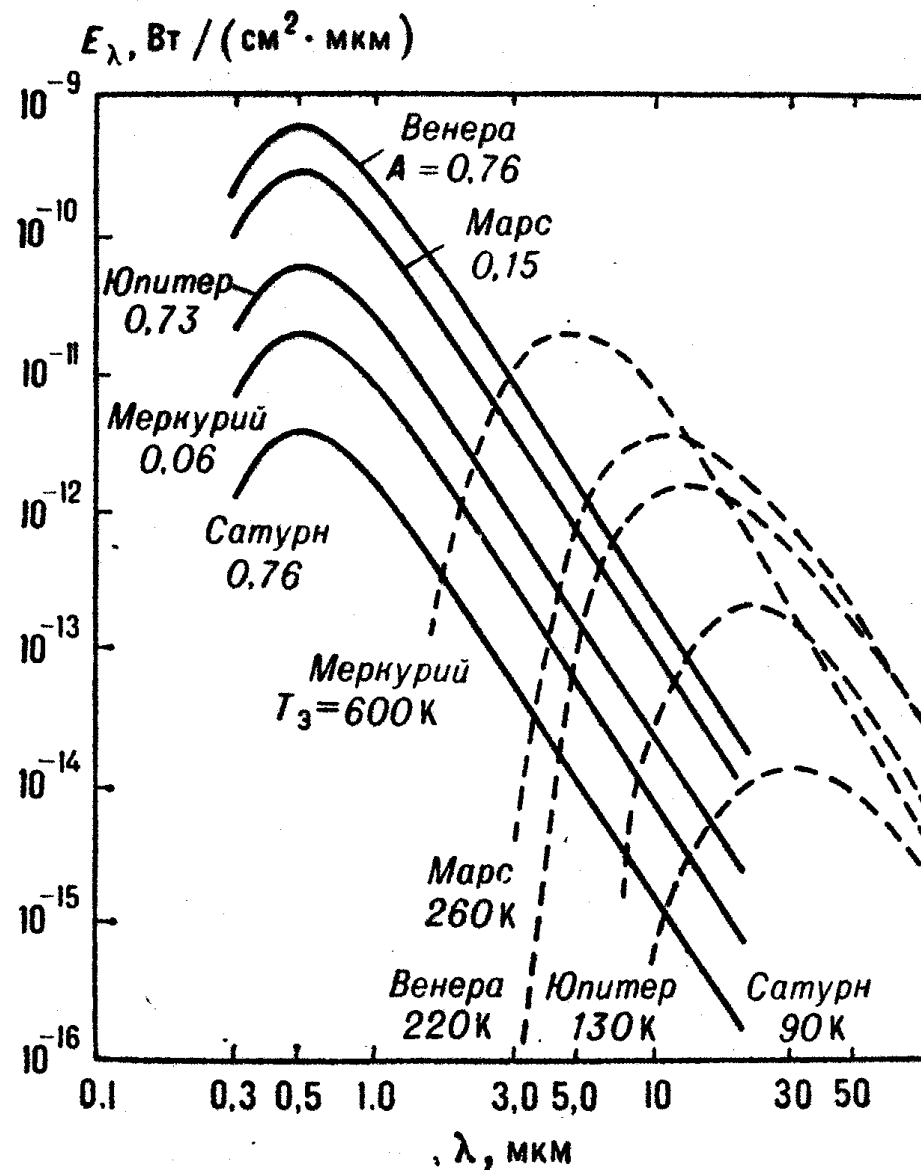


Рис. 3. Схема распределения энергии в спектре излучения планет. Сплошные кривые соответствуют отраженному солнечному излучению, прерывистые — тепловому излучению планет (рядом указаны значения альbedo A планет и эффективной температуры T_s их поверхности).

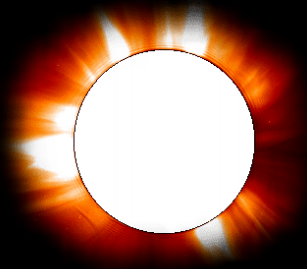
Альбедо – доля солнечной энергии, отраженной от планеты

$$A = \Phi / \Phi_0$$

Φ_0 - падающий поток солнечного излучения;

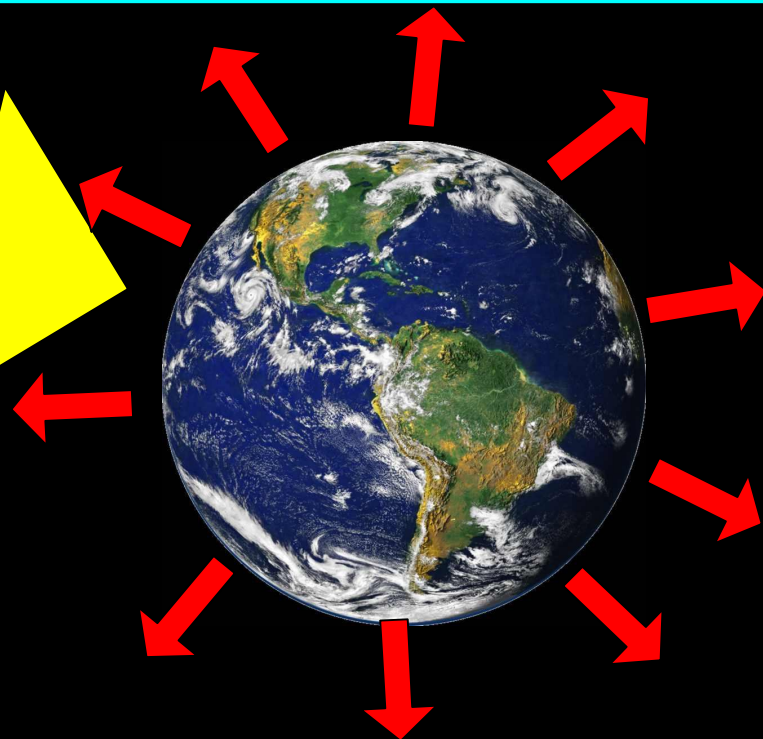
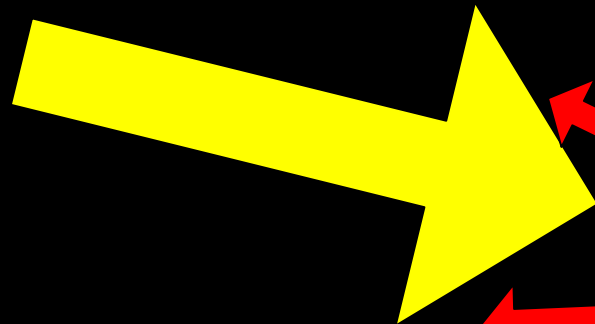
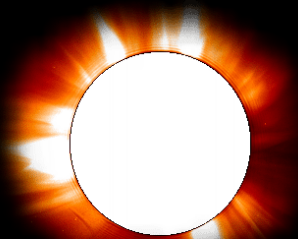
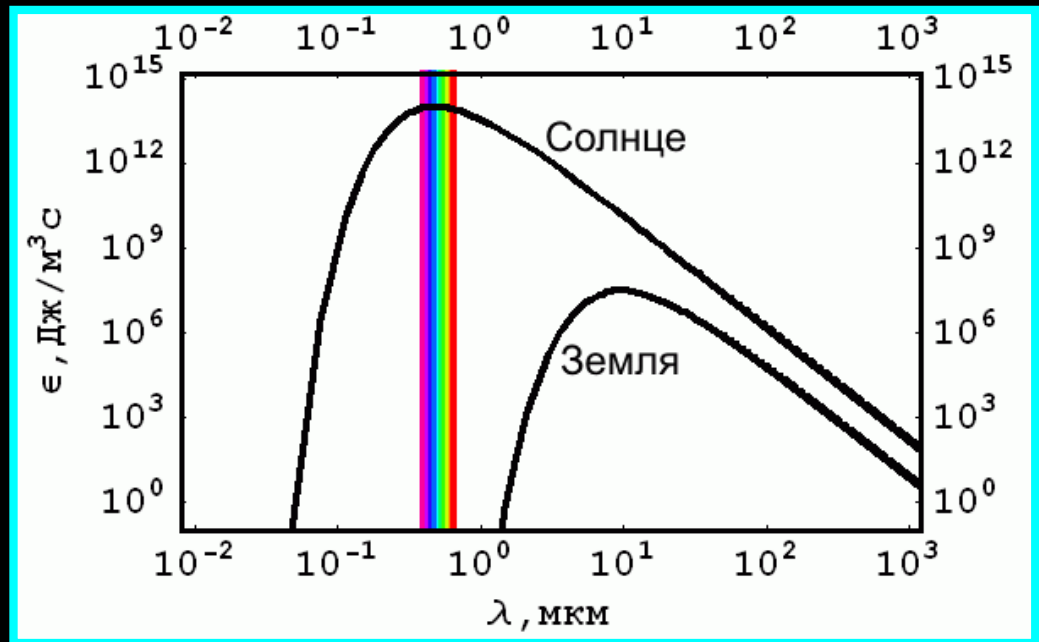
Φ - поток, рассеянный планетой во все стороны.

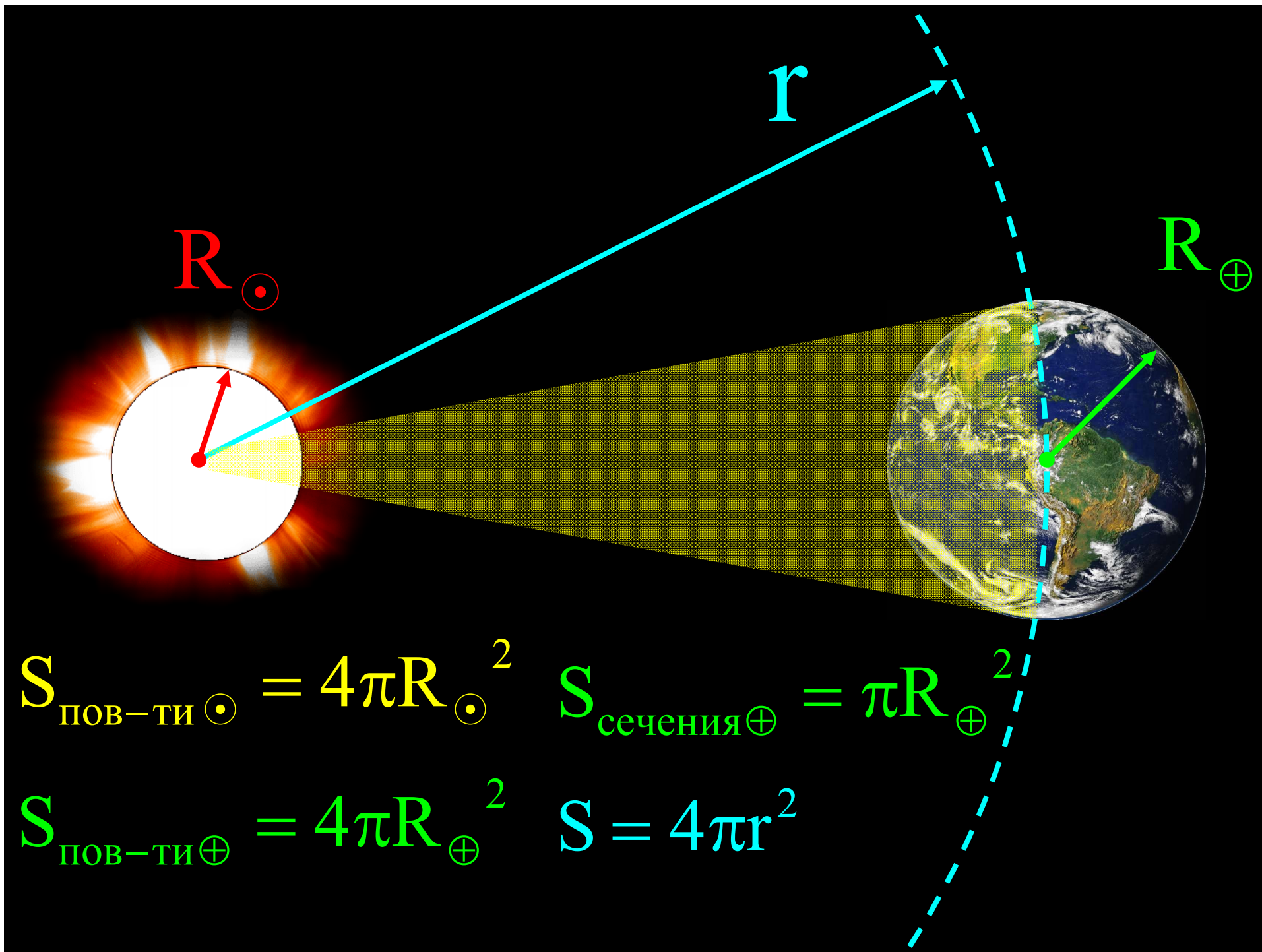
Оценка радиационной температуры Земли



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

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





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

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

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

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

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

$$A \approx 0.3$$

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.

Закон Стефана-Больцмана

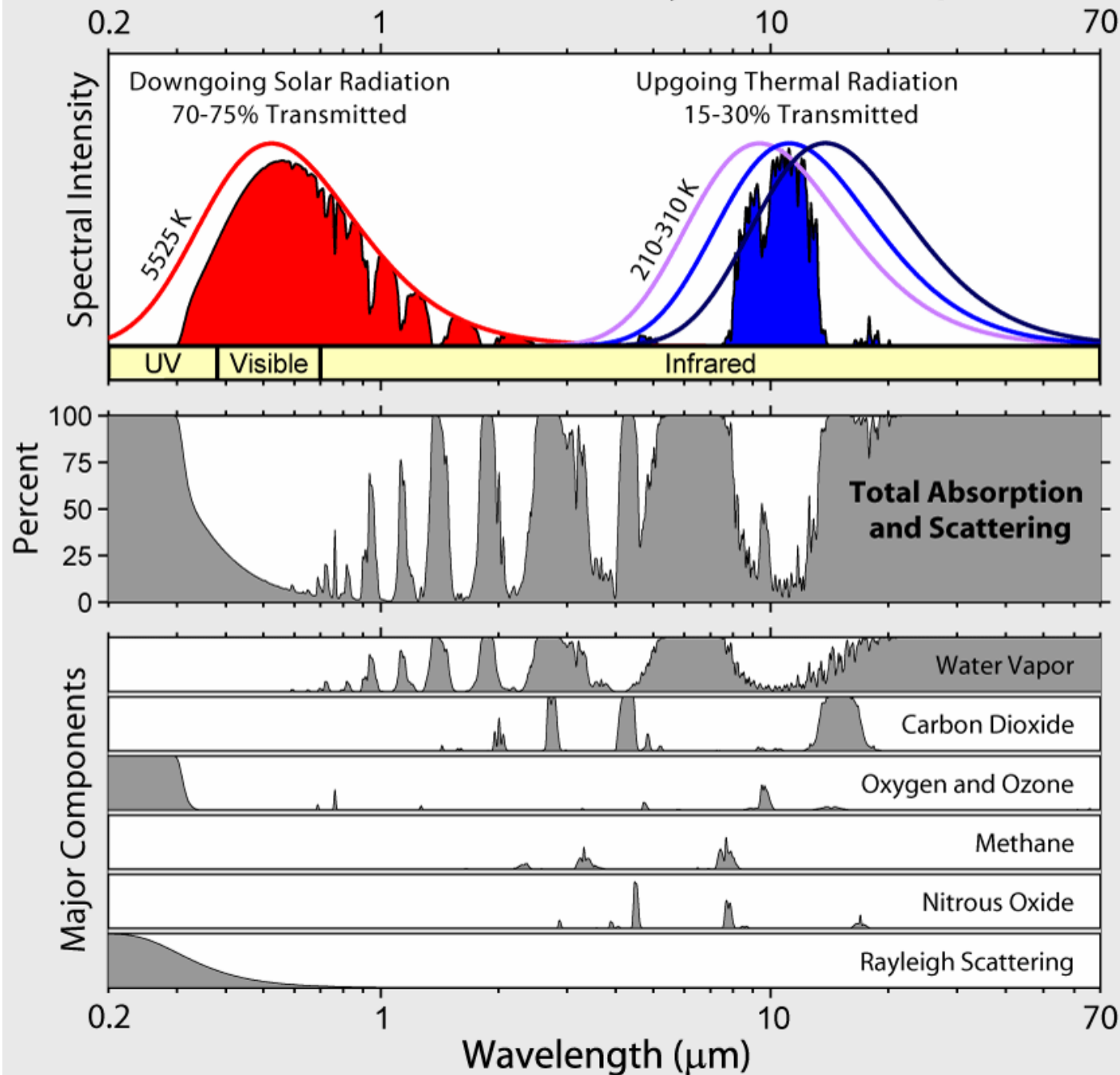
[J.Stefan, 1879; L.Boltzmann, 1884]

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

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

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

Radiation Transmitted by the Atmosphere



Нормированные
спектры
излучения
Солнца и Земли

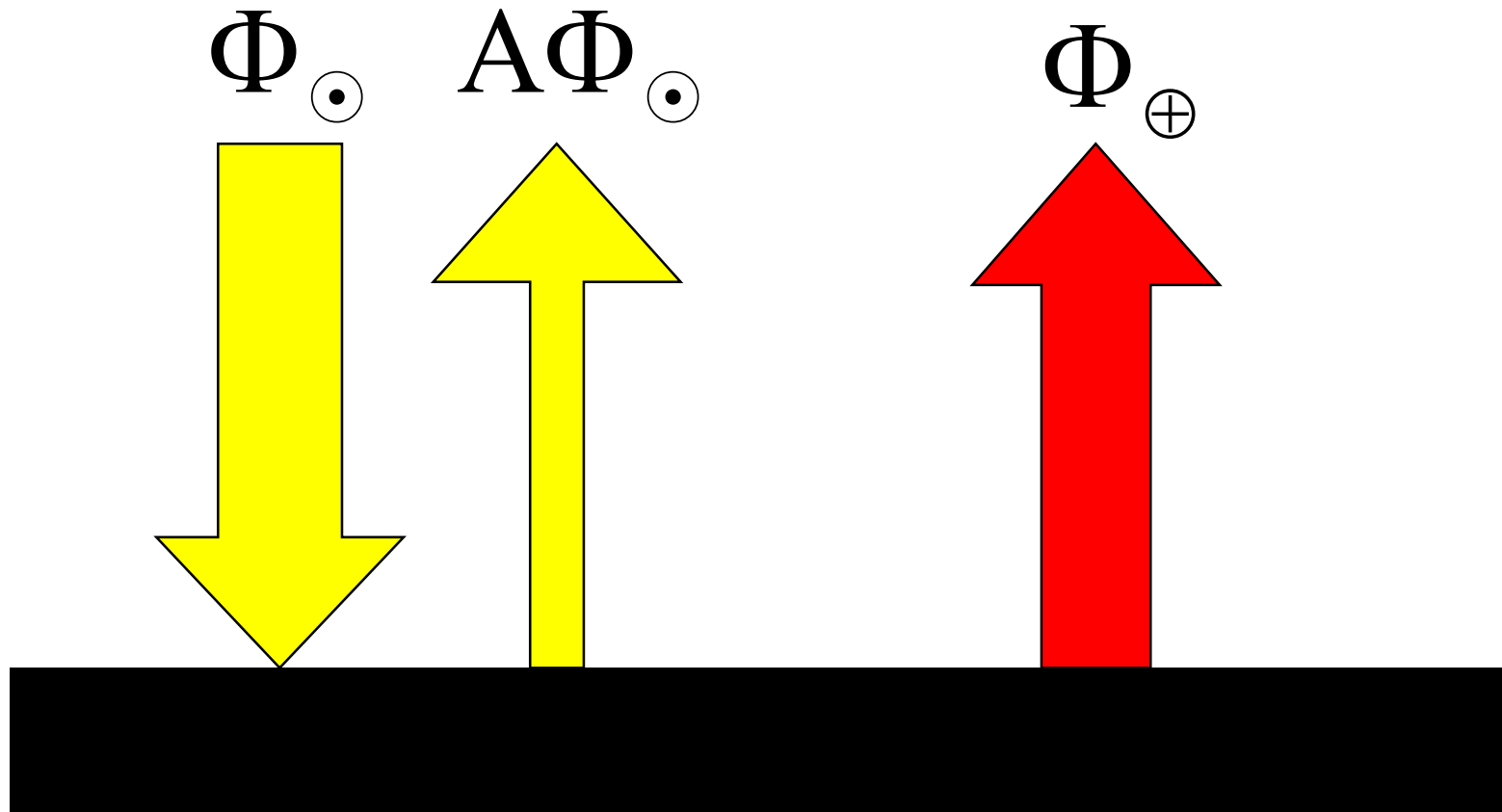
Спектр
поглощения
атмосферы

водяной пар
углекислый газ
кислород и озон
метан
закись азота

Модель без учета атмосферы

$\sim 0.5 \text{ мкм}$

$\sim 10 \text{ мкм}$

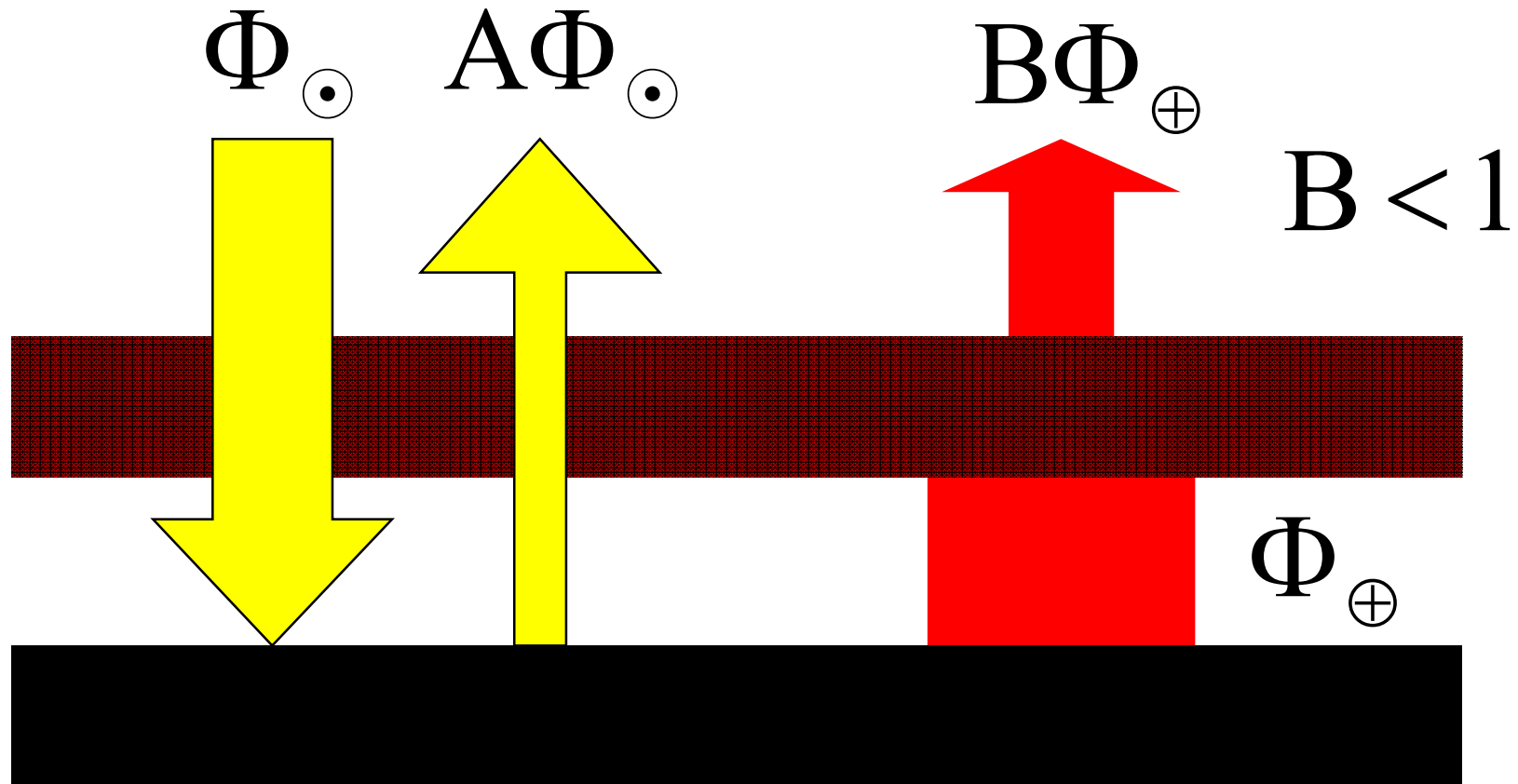


$$\Phi_{\odot} - A\Phi_{\odot} = \Phi_{\oplus}$$

Модель с учетом атмосферы

$\sim 0.5 \text{ мкм}$

$\sim 10 \text{ мкм}$



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

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

$$B < 1$$

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

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

$$B \approx 0.6$$

$$A \approx 0.3$$

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

$$r = 149.6 \cdot 10^9 \text{ м}$$

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

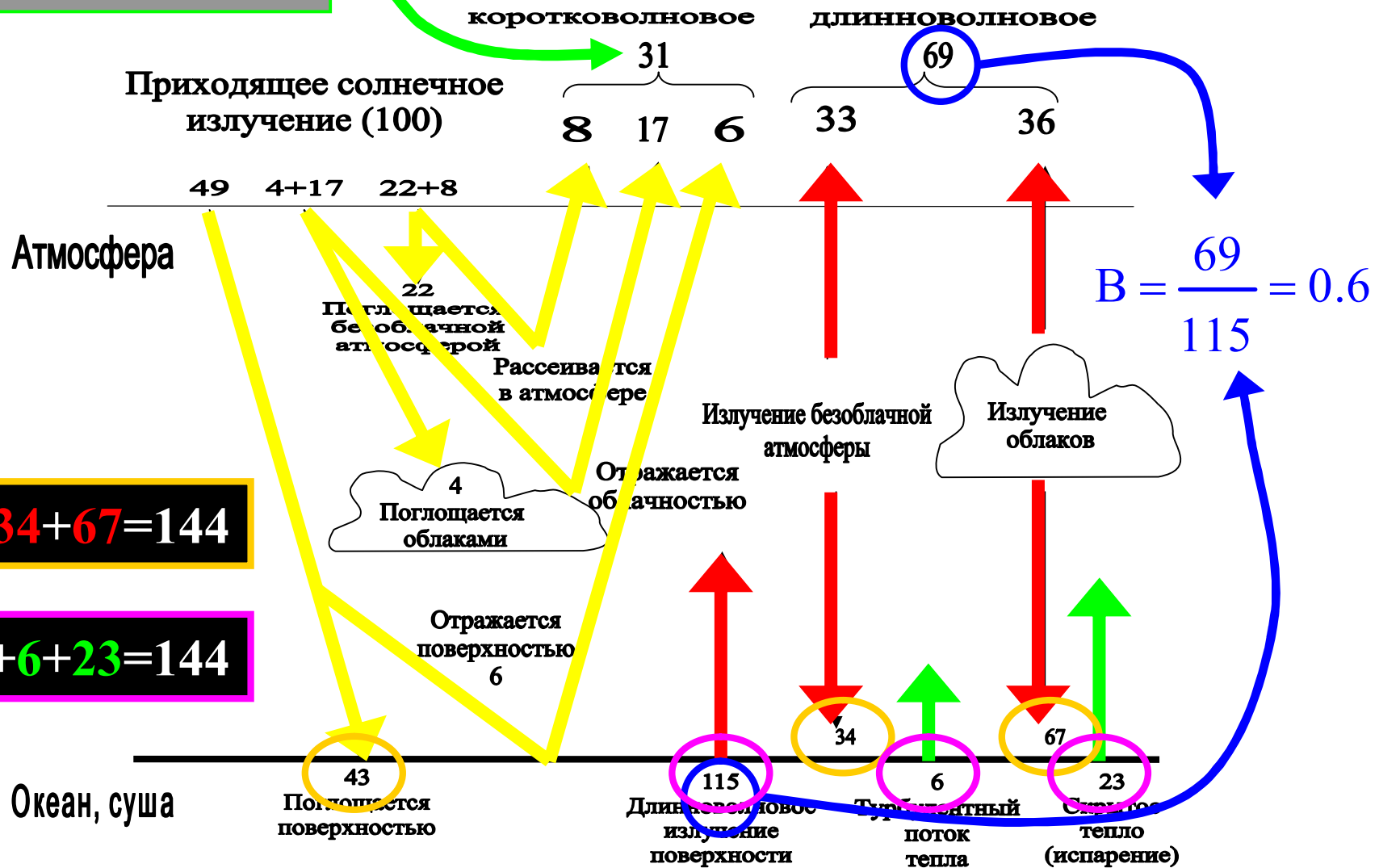
**ВОЗМОЖНОСТЬ ГЛОБАЛЬНОГО
ОЛЕДЕНЕНИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ**

Радиационно-тепловой баланс атмосферы

Космос

альбеде $A \sim 0.3$

Уходящее излучение (100)

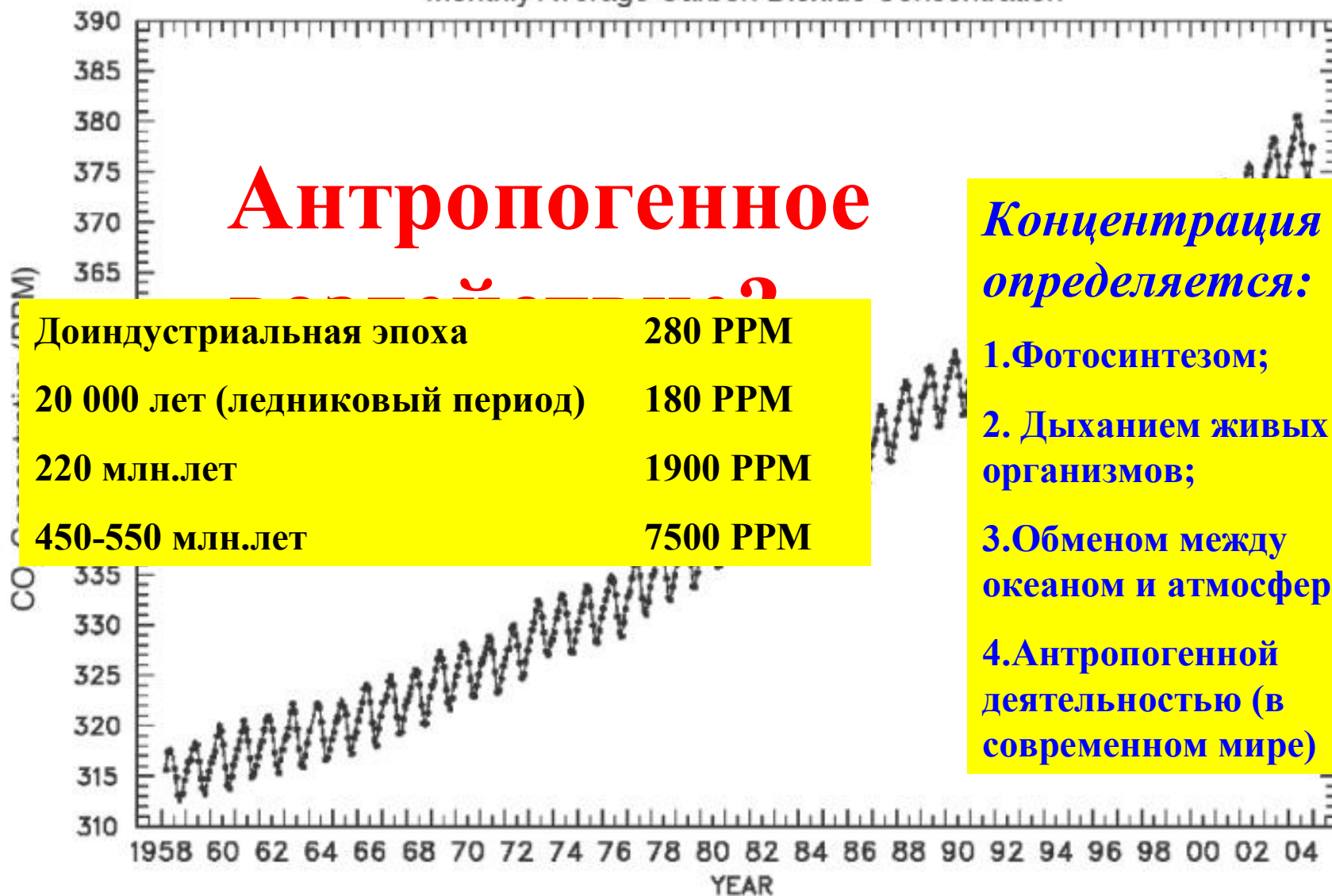


Mauna Loa Observatory, Hawaii
Monthly Average Carbon Dioxide Concentration

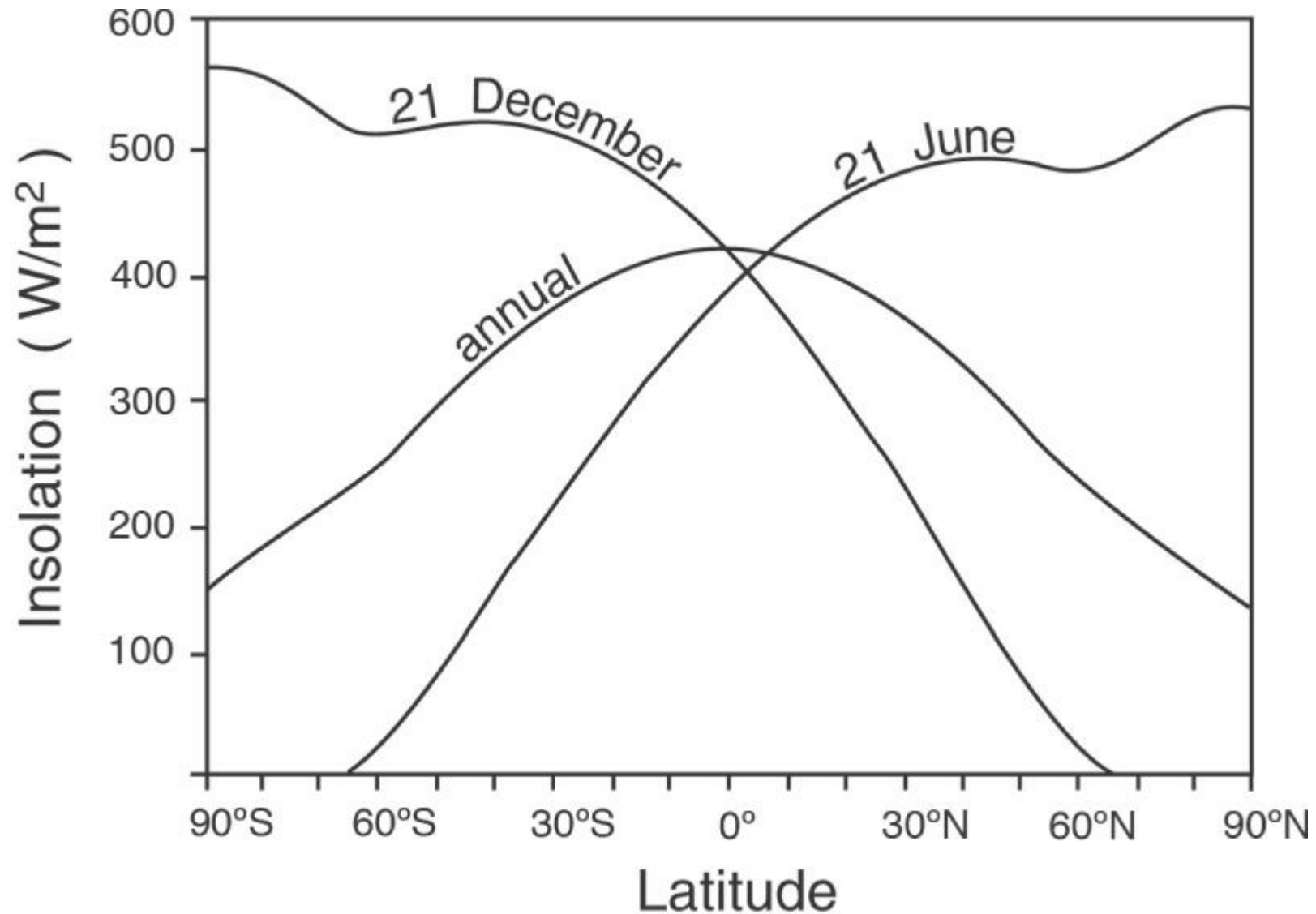


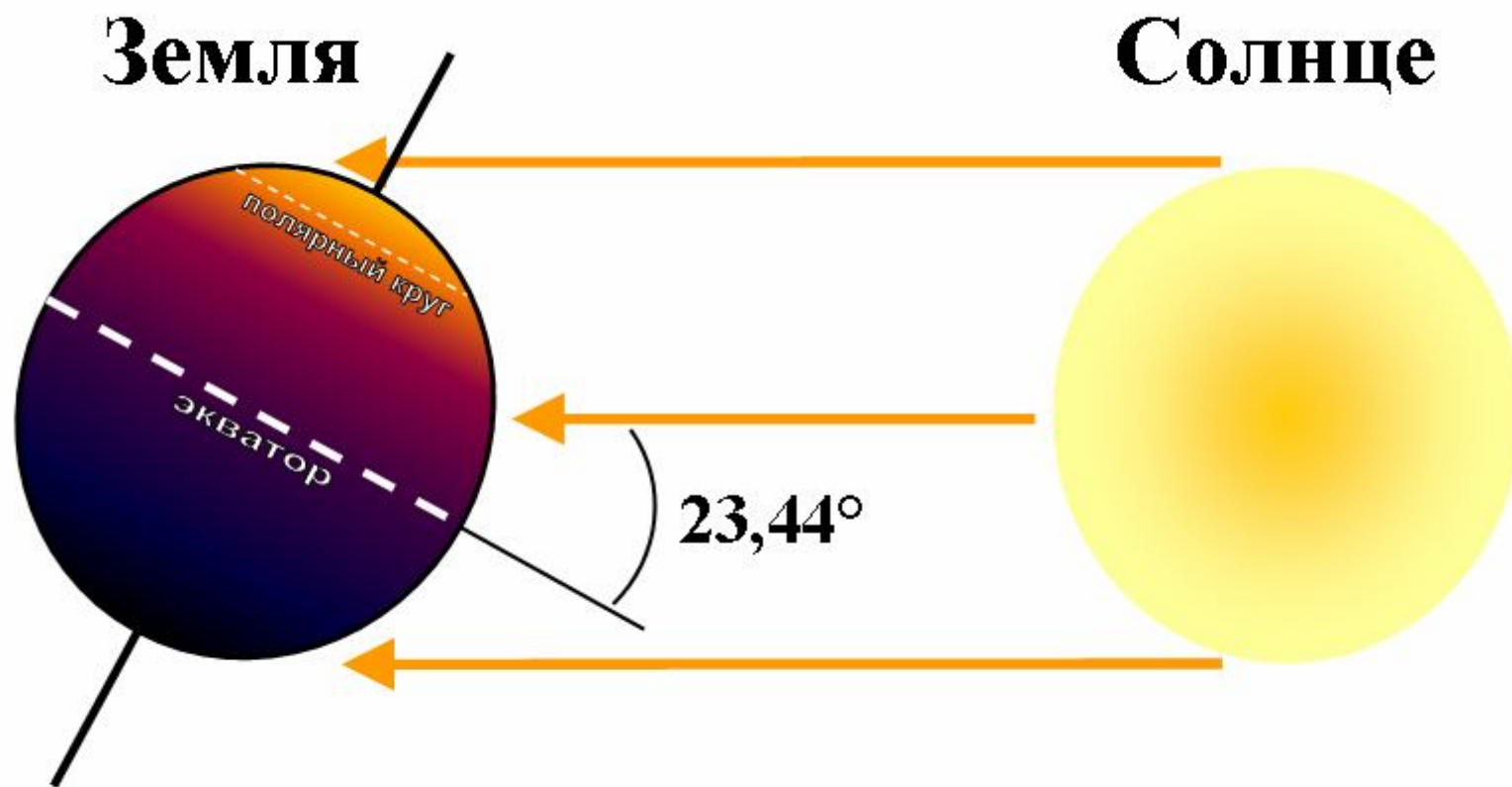
**Антропогенное
воздействие?**

Mauna Loa Observatory, Hawaii
Monthly Average Carbon Dioxide Concentration

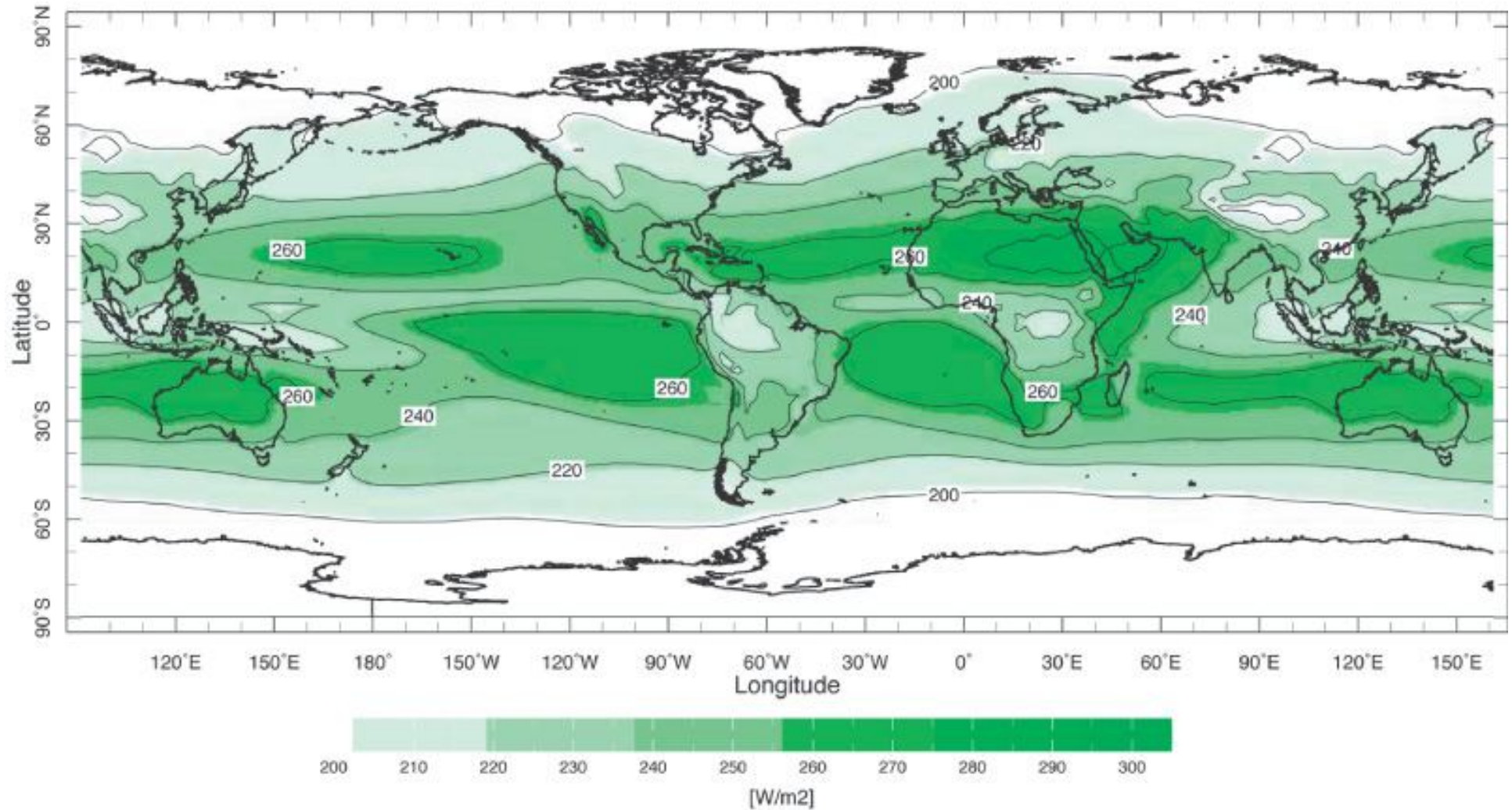


Широтное распределение инсоляции ($\text{Вт}/\text{м}^2$) поверхности Земли





Outgoing Longwave Radiation (Wm^{-2})

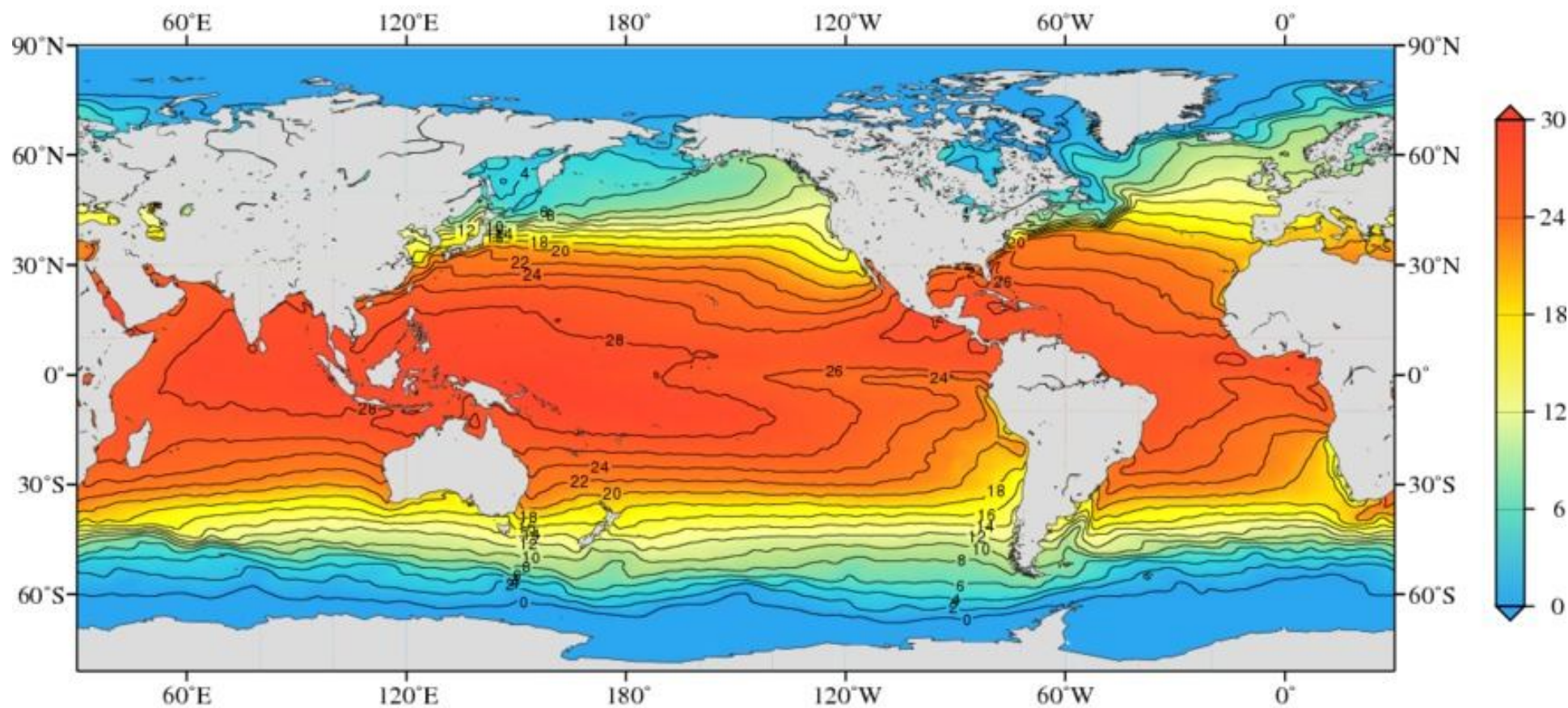


Среднегодовая температура поверхности Мирового океана

World Ocean Atlas Climatology

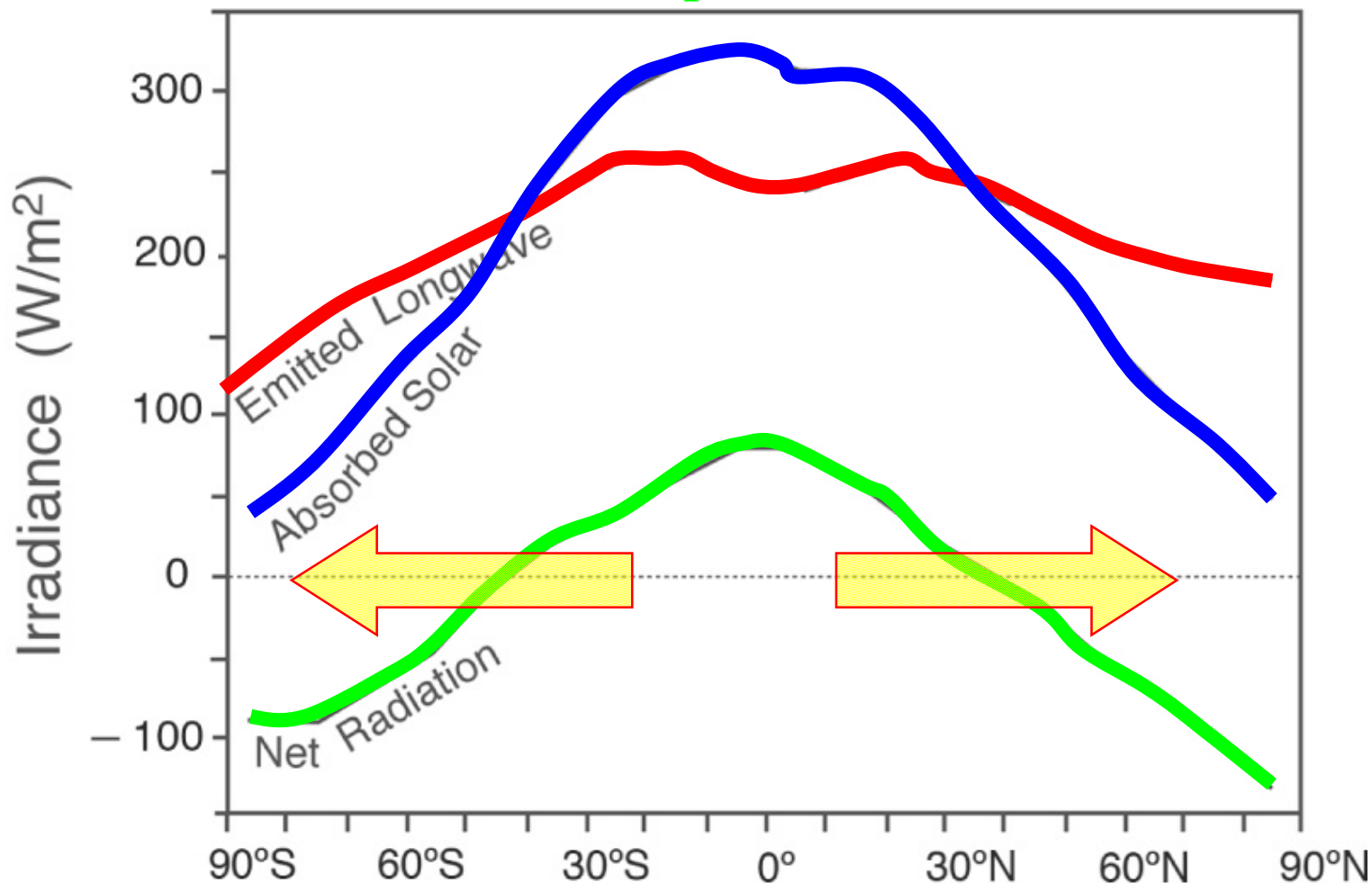
Decadal Average: 1955 - 2012

Contour Interval=2



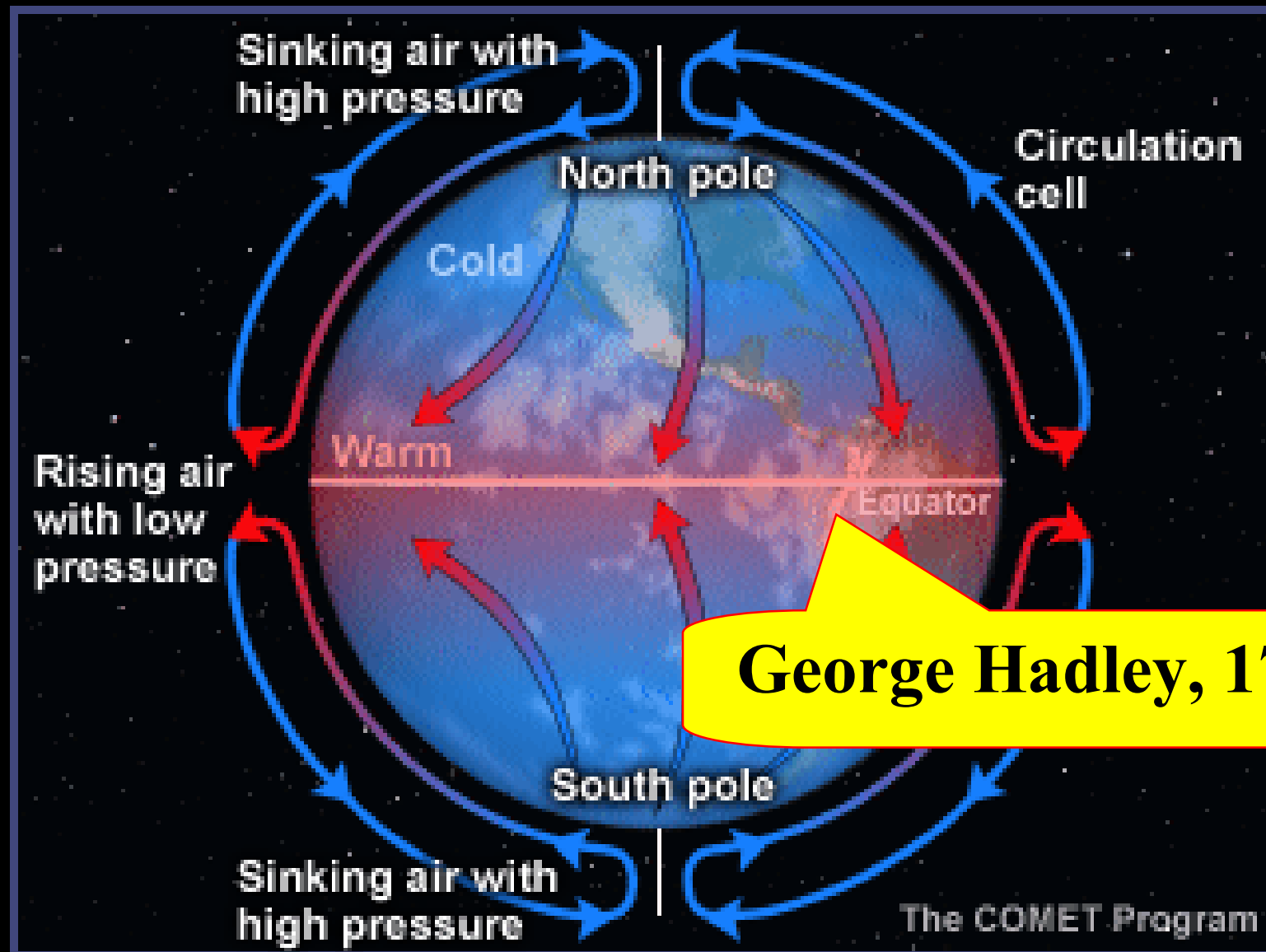
Annual temperature [°C] at the surface (quarter-degree grid)

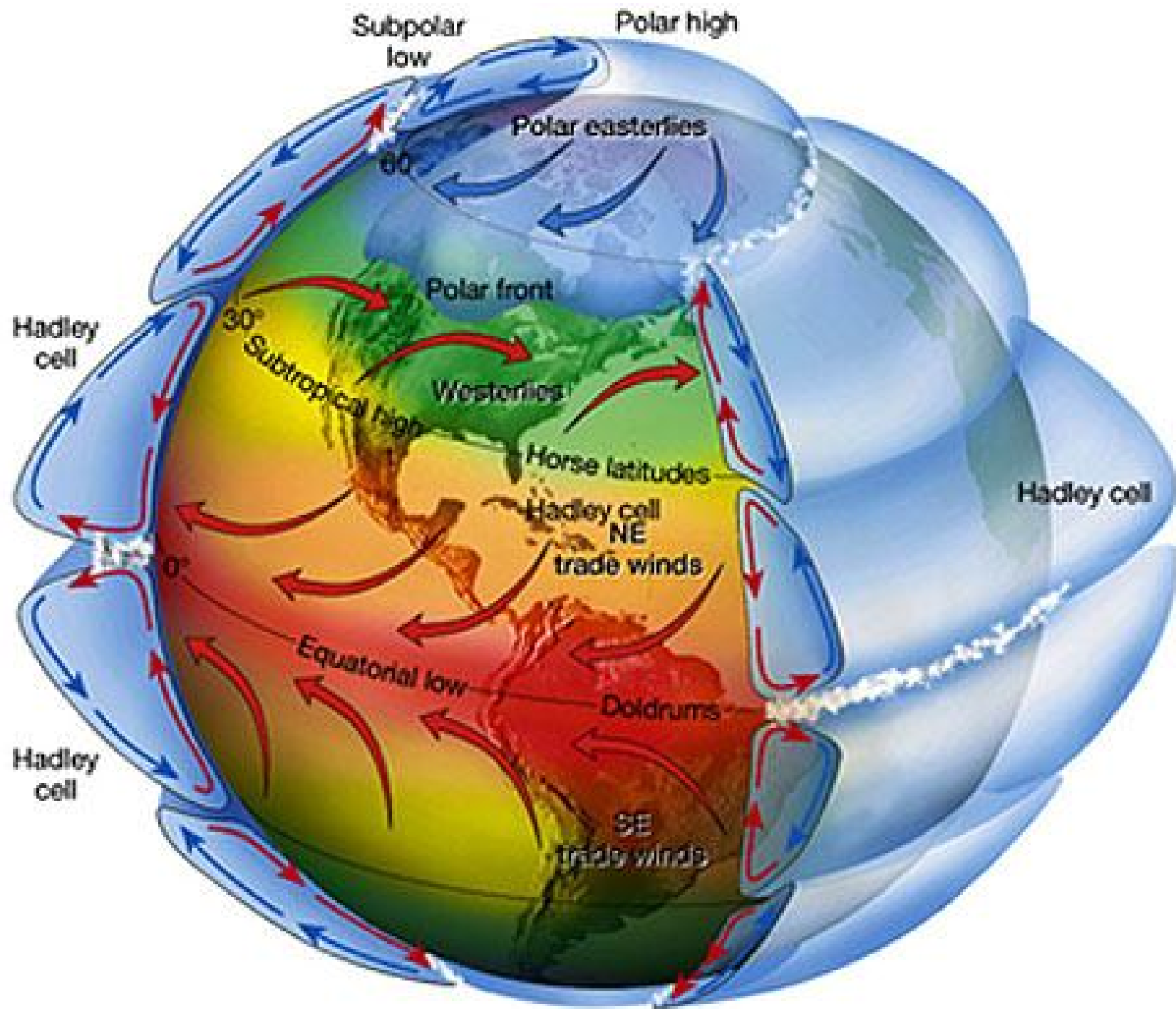
Среднегодовые широтные распределения радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$):
поглощенной солнечной, излученной длинноволновой
и их разница



Существует поток тепла от экватора к полюсам

Упрощенная модель циркуляции атмосферы



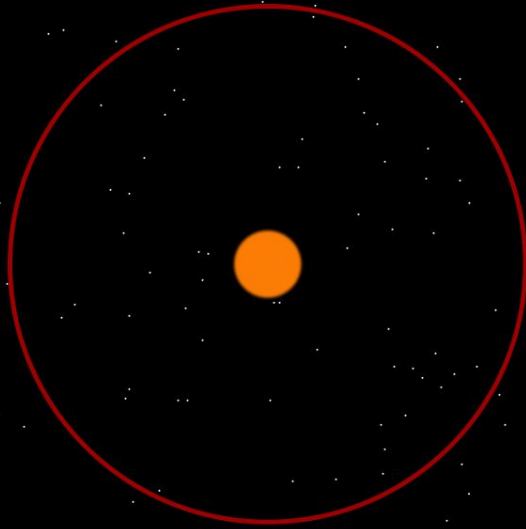




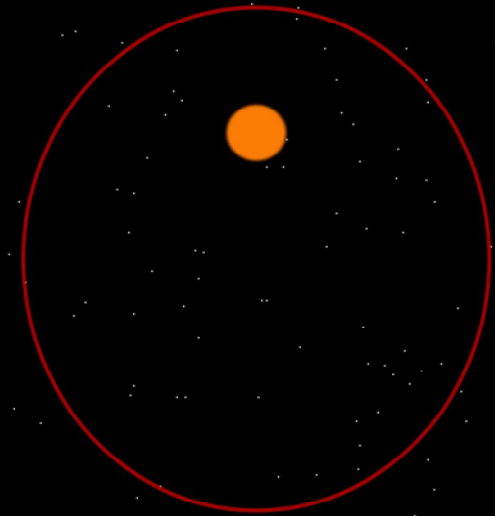
Милутин Миланкович
(1879-1958 гг.)
сербский математик,
создавший
математическую
теорию климата

Циклы Миланковича

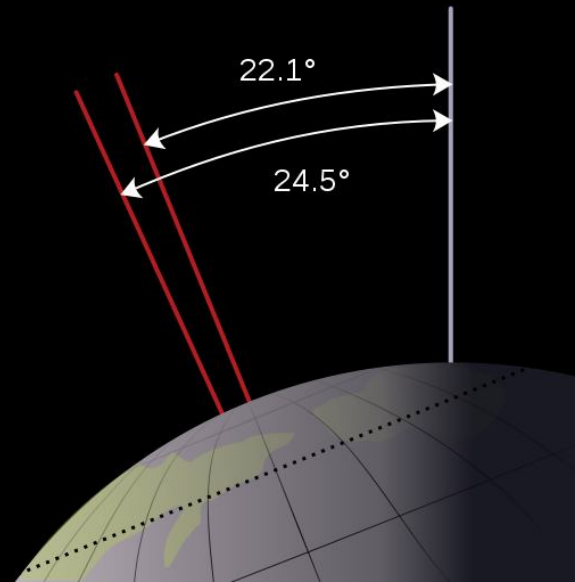
1. Эксцентриситет орбиты:
0.0007-0.0658 с периодом
100 тыс. лет
2. Наклон земной оси: 22.07°-
24.57° с периодом 41 тыс. лет
3. Прецессия: 19 и 23 тыс. лет
(климатическая прецессия –
вариации направления оси
вращения Земли относительно
плоскости орбиты)



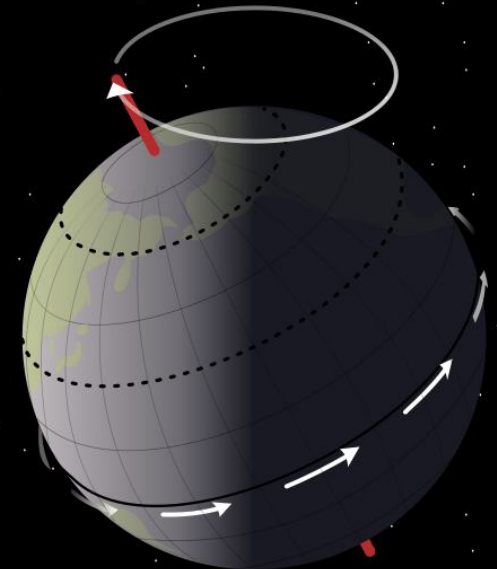
**Эксцентриситет орбиты:
0.0007-0.0658 с периодом
~100 тыс. лет**



**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)**



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

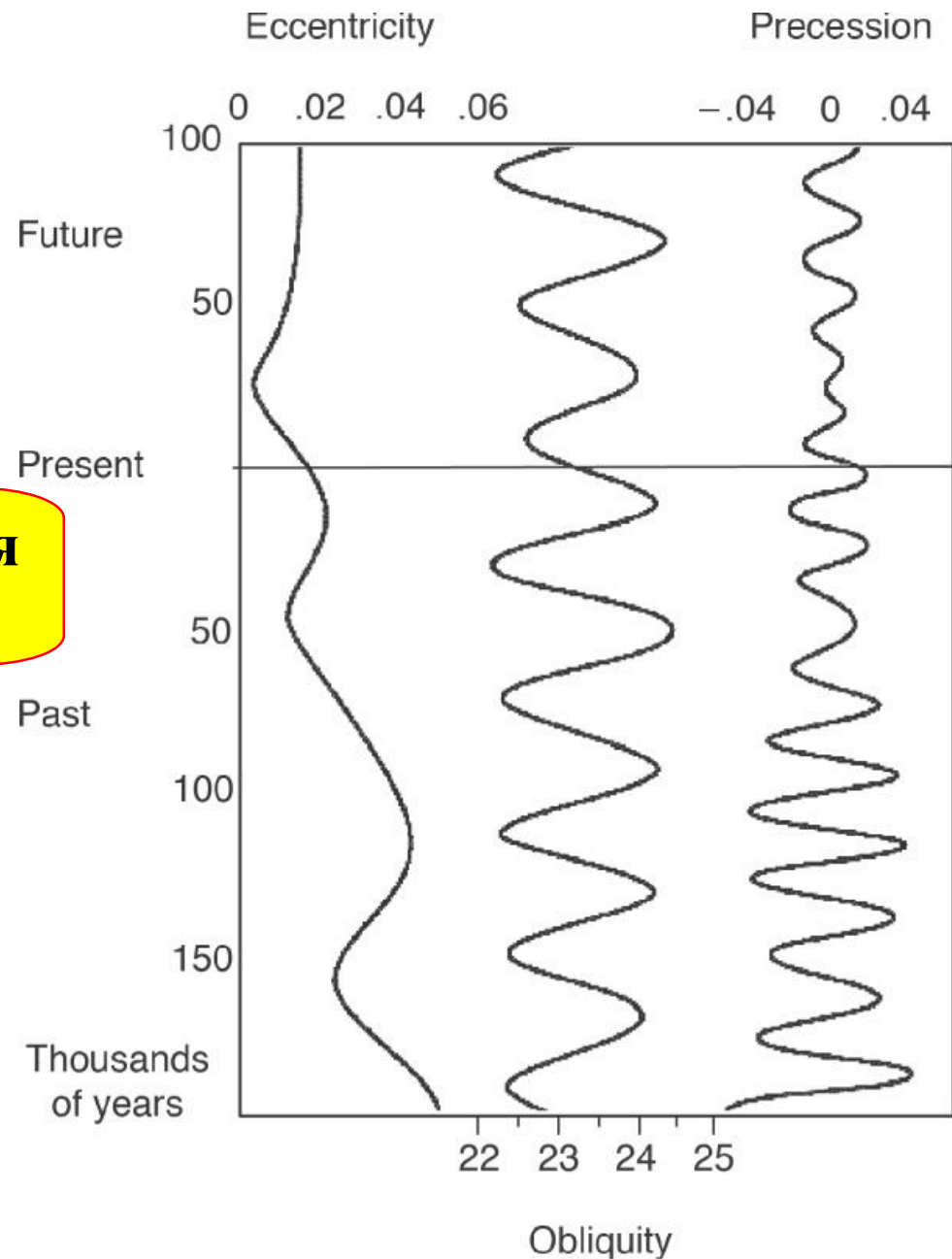
**средняя
инсоляция на
широте φ**

$\varphi_1(t)$

**эквивалентная
широта**

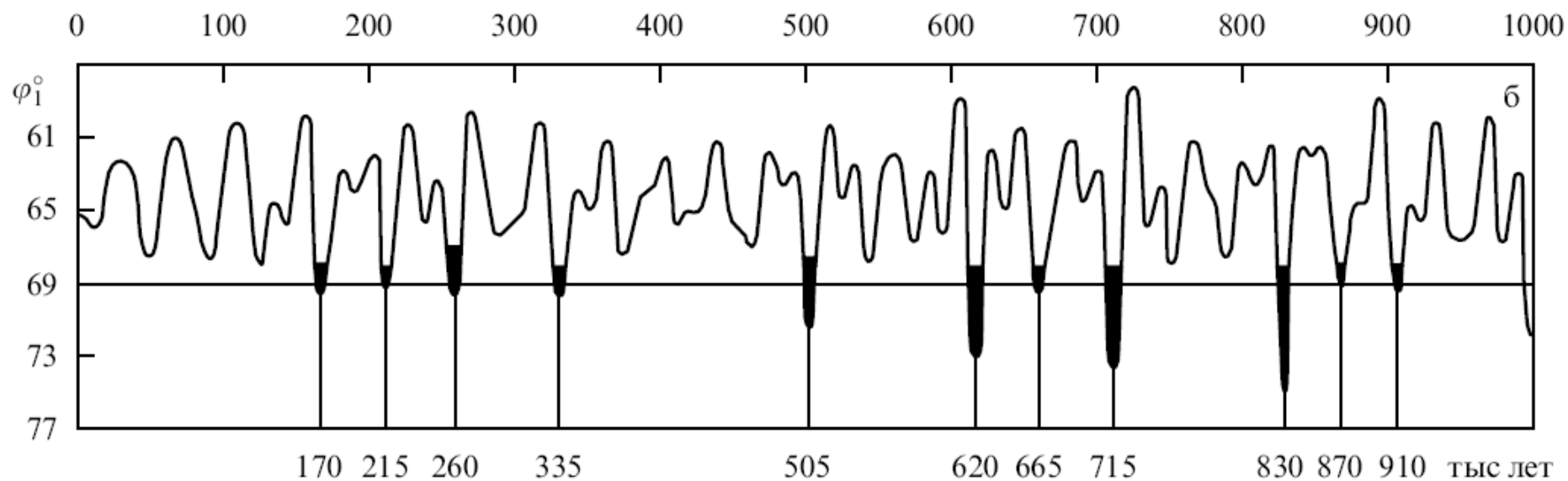
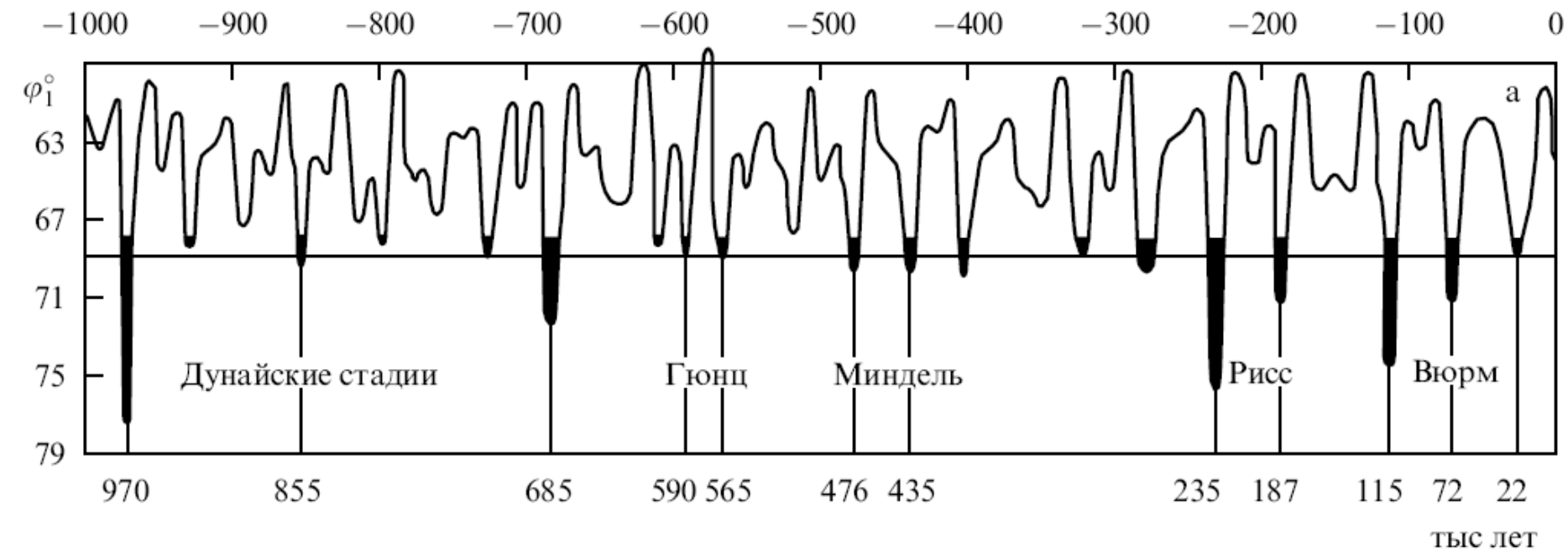
**астрономическая
эпоха**

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



(From Berger and Loutre, (1992).)

Расчет вариаций «эквивалентной широты» (65°N) за 1 млн. лет



**никак не связано с
циклами Миланковича!**

Малый ледниковый период (XIV—XIX века)



**Питер Брейгель
(1565 г.)**