

Геофизика



2023 Лекция №7

Носов Михаил Александрович

отделение геофизики, физический факультет МГУ

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

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, приспособившийся 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: 2 полярные, 2 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 и вертикальной климатической зональности поверхности суши. Построены климатические карты – средние температуры, осадки, давление для различных сезонов и среднегодовые.

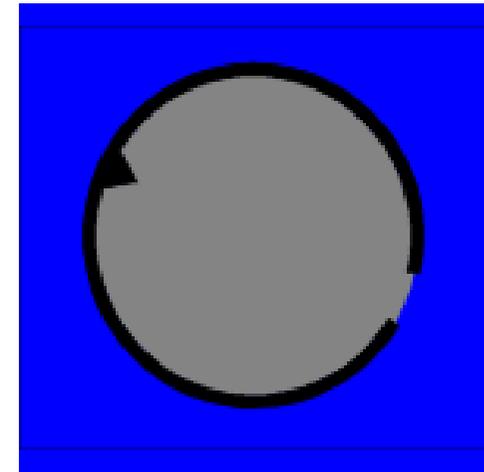


***Василий Васильевич
Докучаев (1846-1903 гг.)***
– русский ученый,
основатель современного
научного почвоведения и
комплексного
исследования природы

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

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

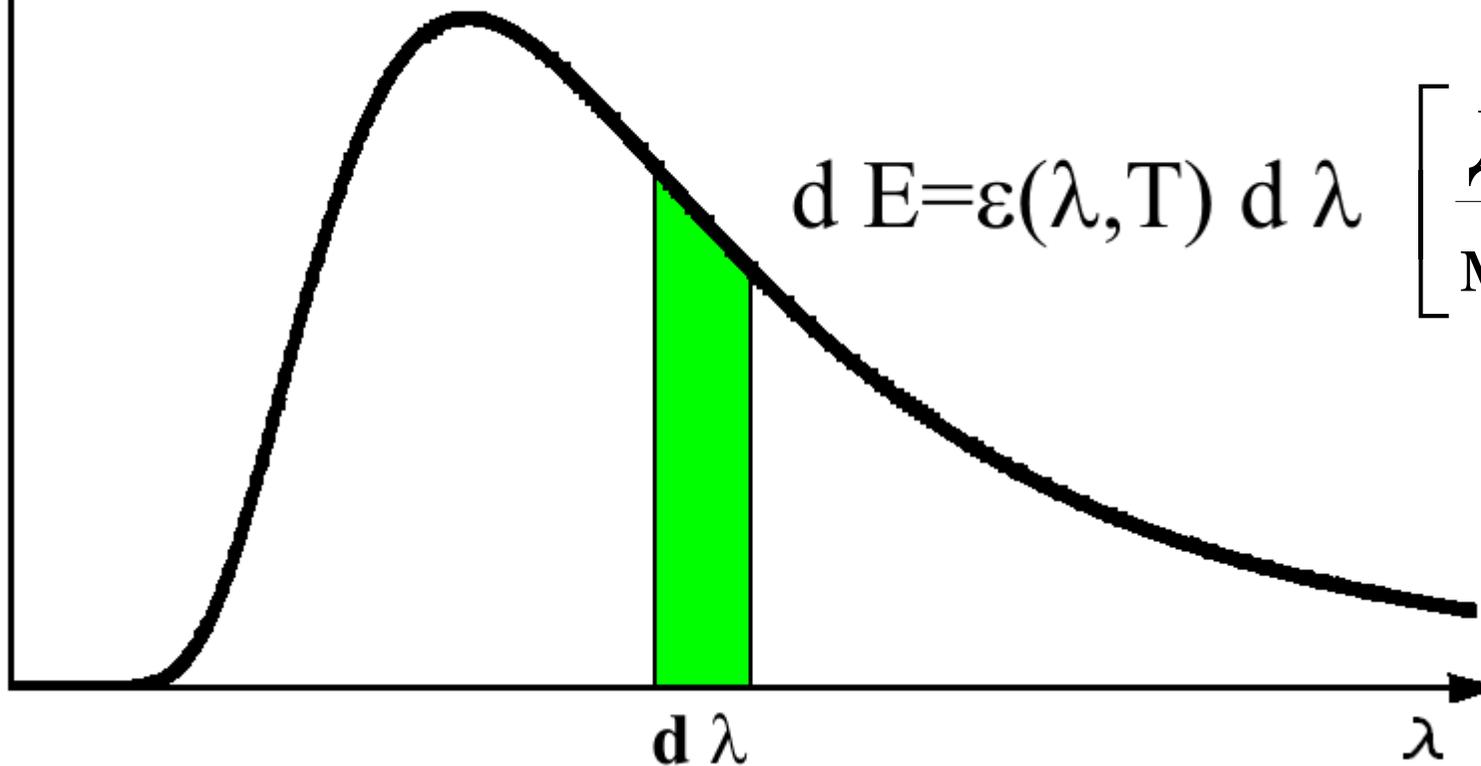
$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ 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

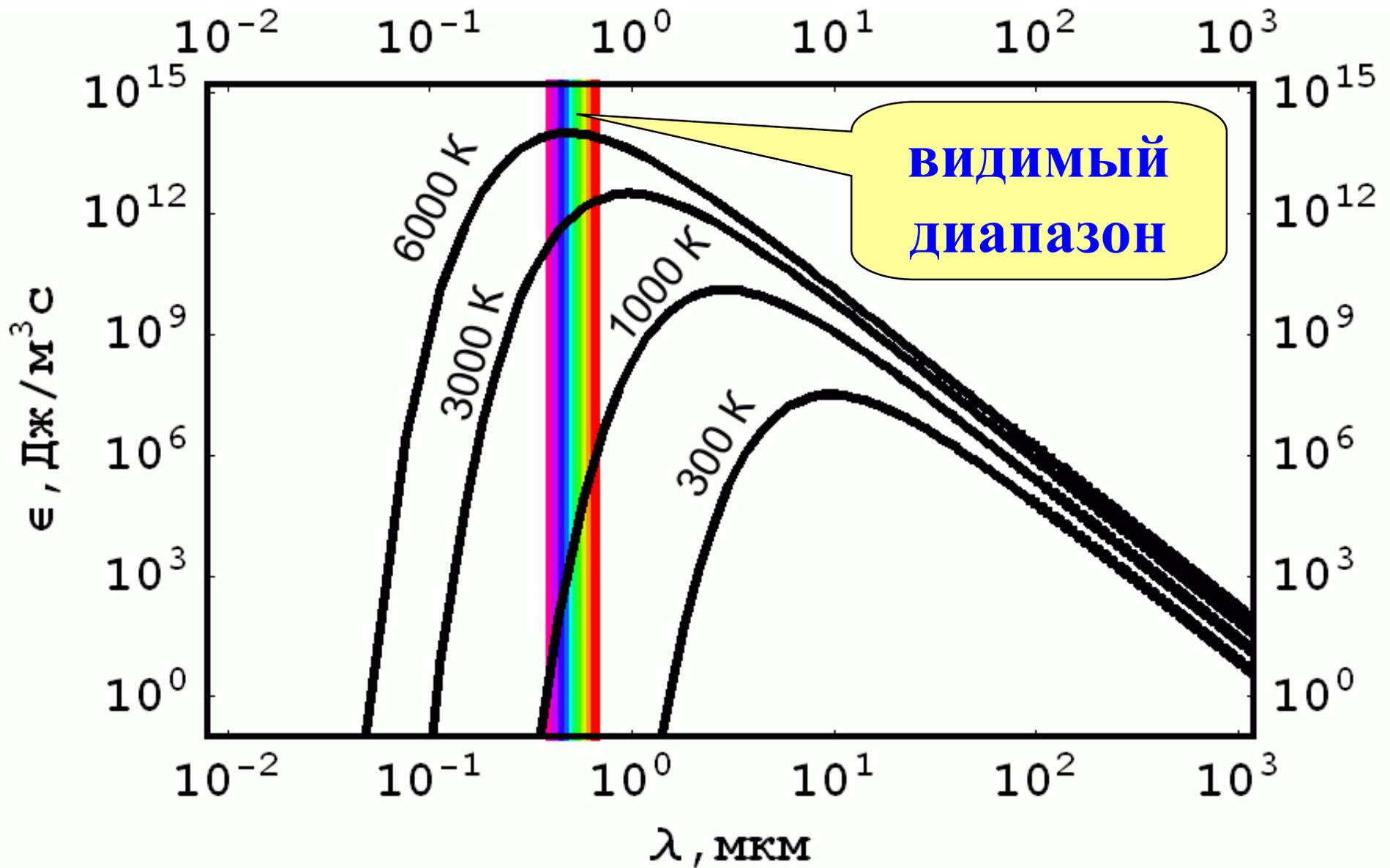


$$dE = \varepsilon(\lambda, T) d\lambda \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} \right]$$

$d\lambda$

λ

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



800-1200 °C

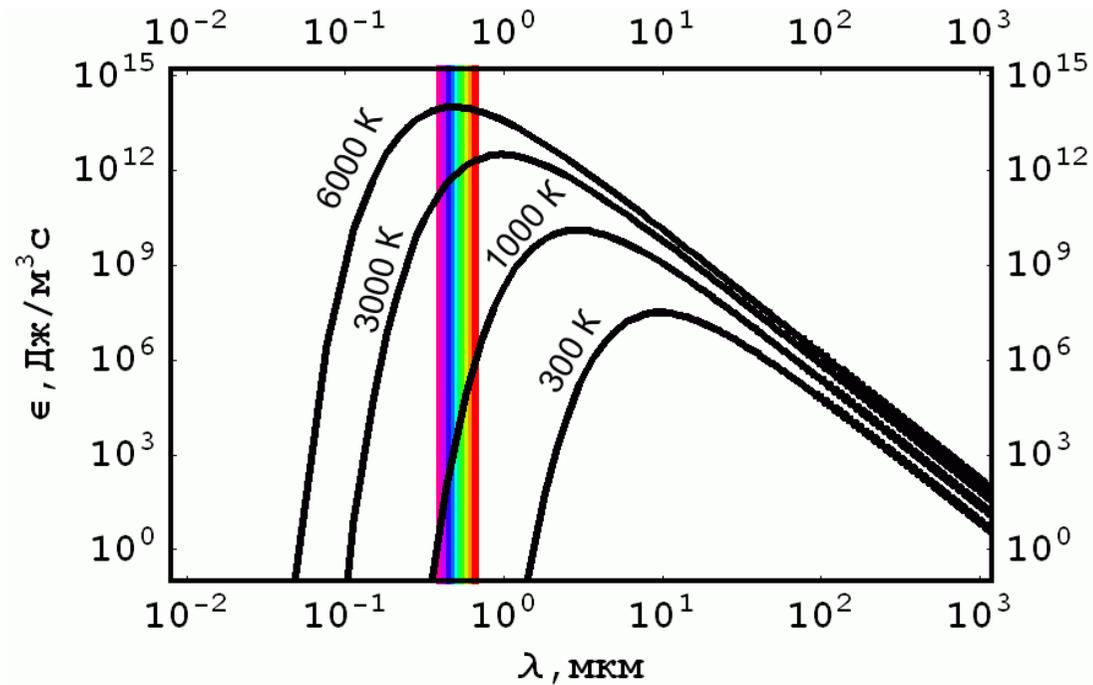
2000-3000 °C



Следствия закона Планка

закон
смещения Вина

закон
Стефана-Больцмана



Закон смещения Вина [W. Wien, 1893]

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

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

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

транscендентное уравнение

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

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

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).

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

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

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

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

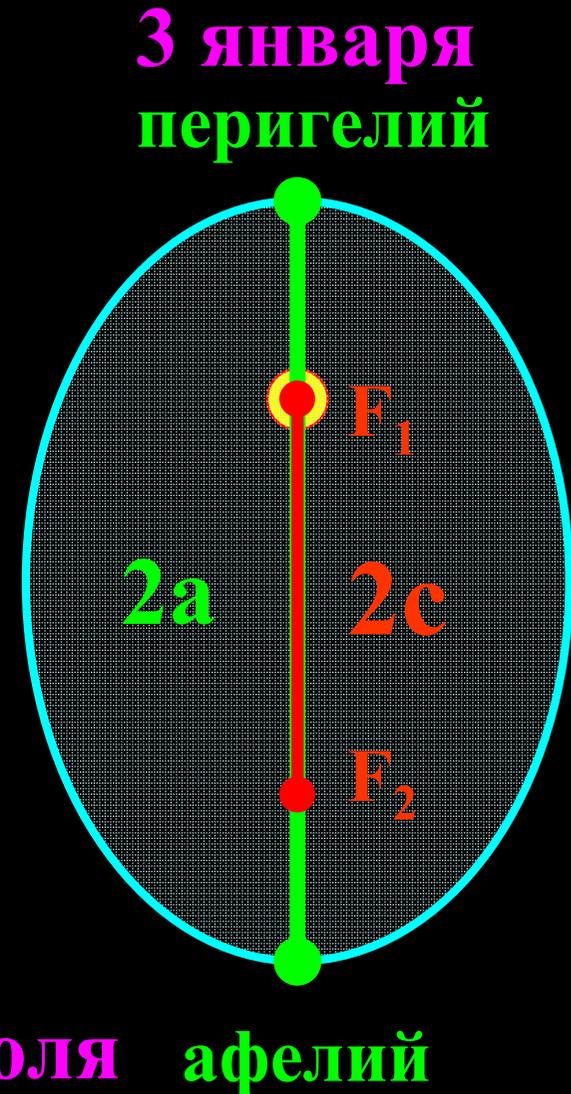
Сезонные вариации солнечной радиации (но не солнечной постоянной!)

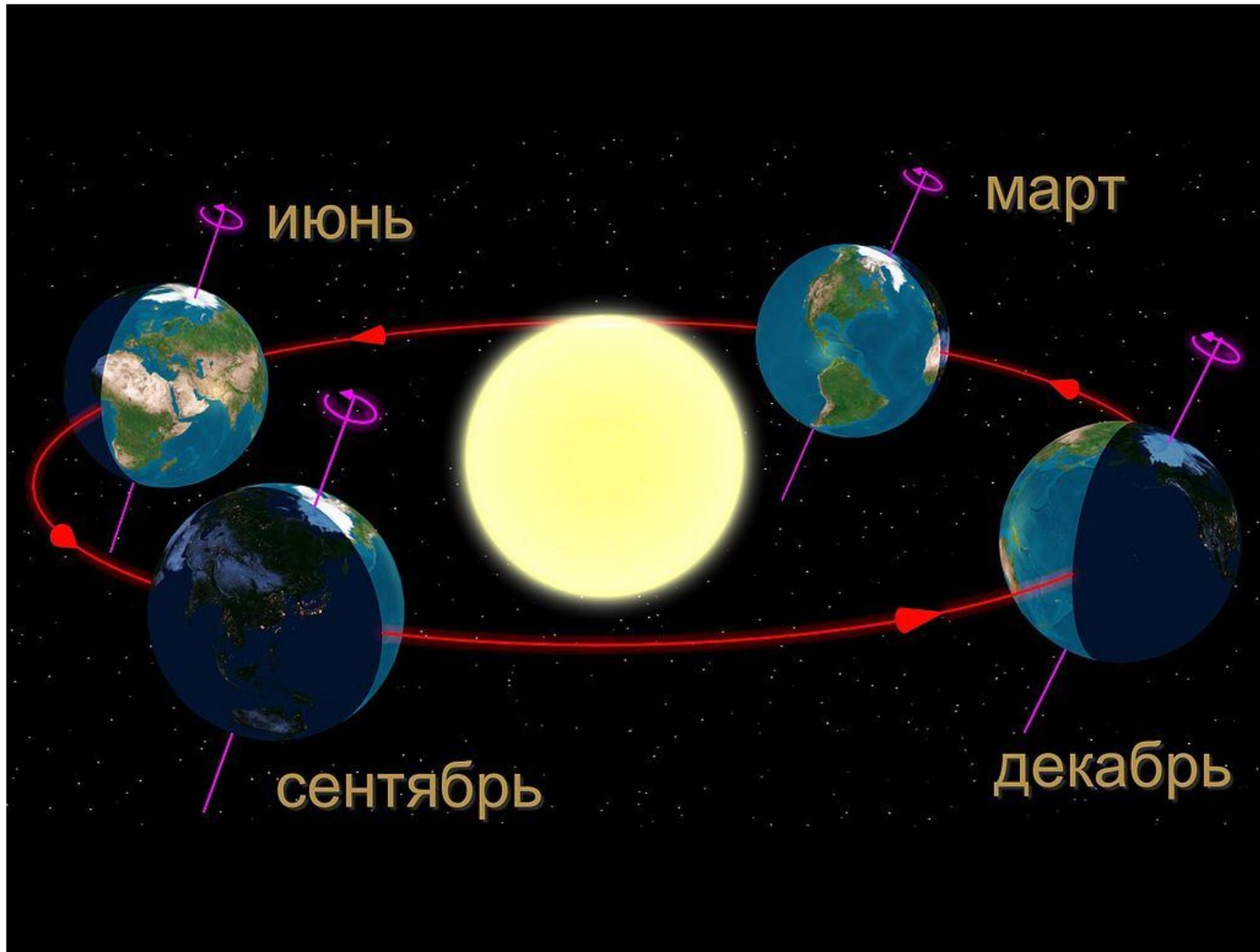
$$\Phi \sim \frac{1}{r^2} \Rightarrow \frac{\Phi_{\text{перигелий}}}{\Phi_{\text{афелий}}} = \left(\frac{r_{\text{афелий}}}{r_{\text{перигелий}}} \right)^2$$

Земля ближе к Солнцу зимой, но не летом!!!

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

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





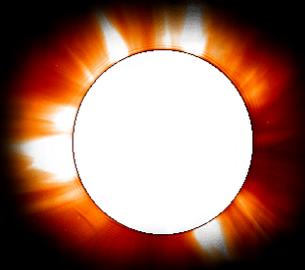
ИЮНЬ

март

сентябрь

декабрь

Оценка радиационной температуры Земли



В спектре планет
всегда присутствуют
два максимума:

1. отраженное
солнечное излучение

2. тепловое излучение

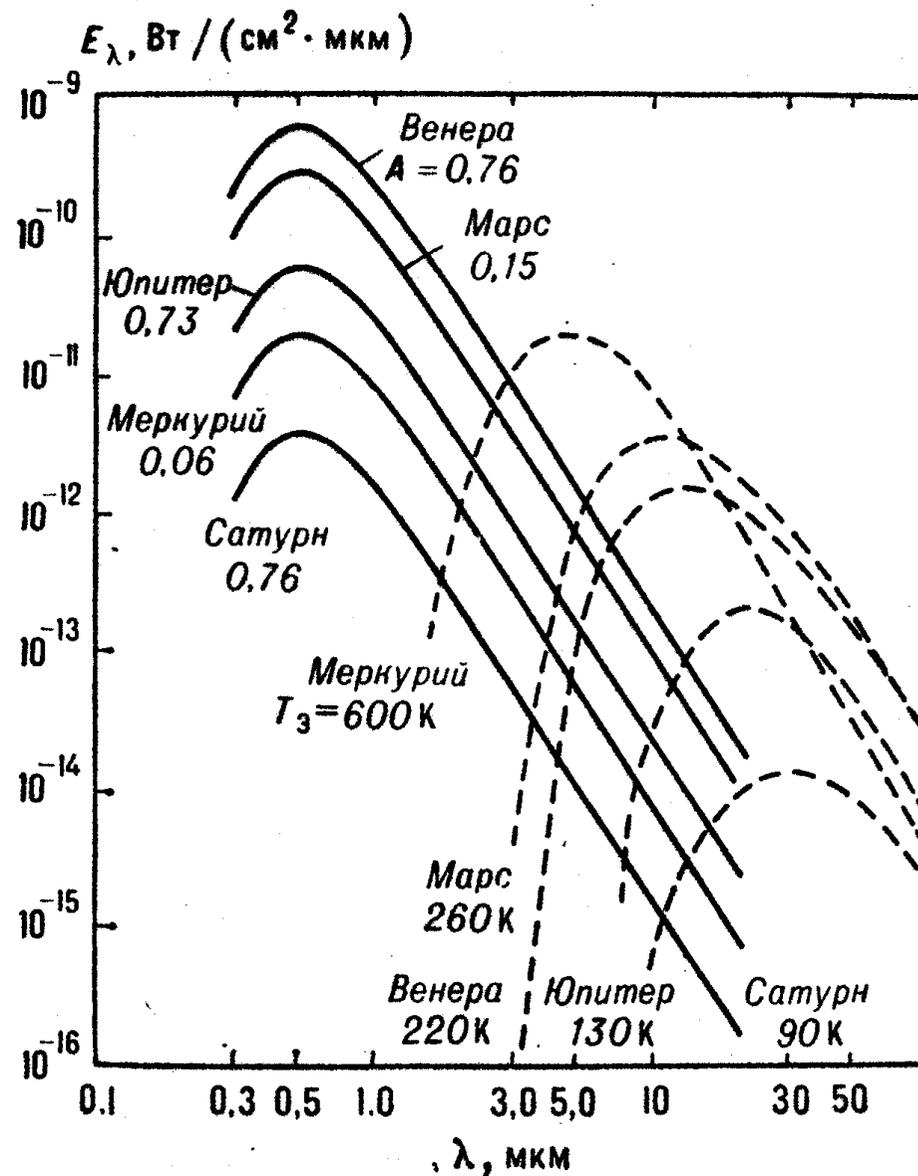


Рис. 3. Схема распределения энергии в спектре излучения планет. Сплошные кривые соответствуют отраженному солнечному излучению, прерывистые — тепловому излучению планет (рядом указаны значения альbedo A планет и эффективной температуры T_s их поверхности).

Альбедо – доля солнечной энергии, отраженной от планеты

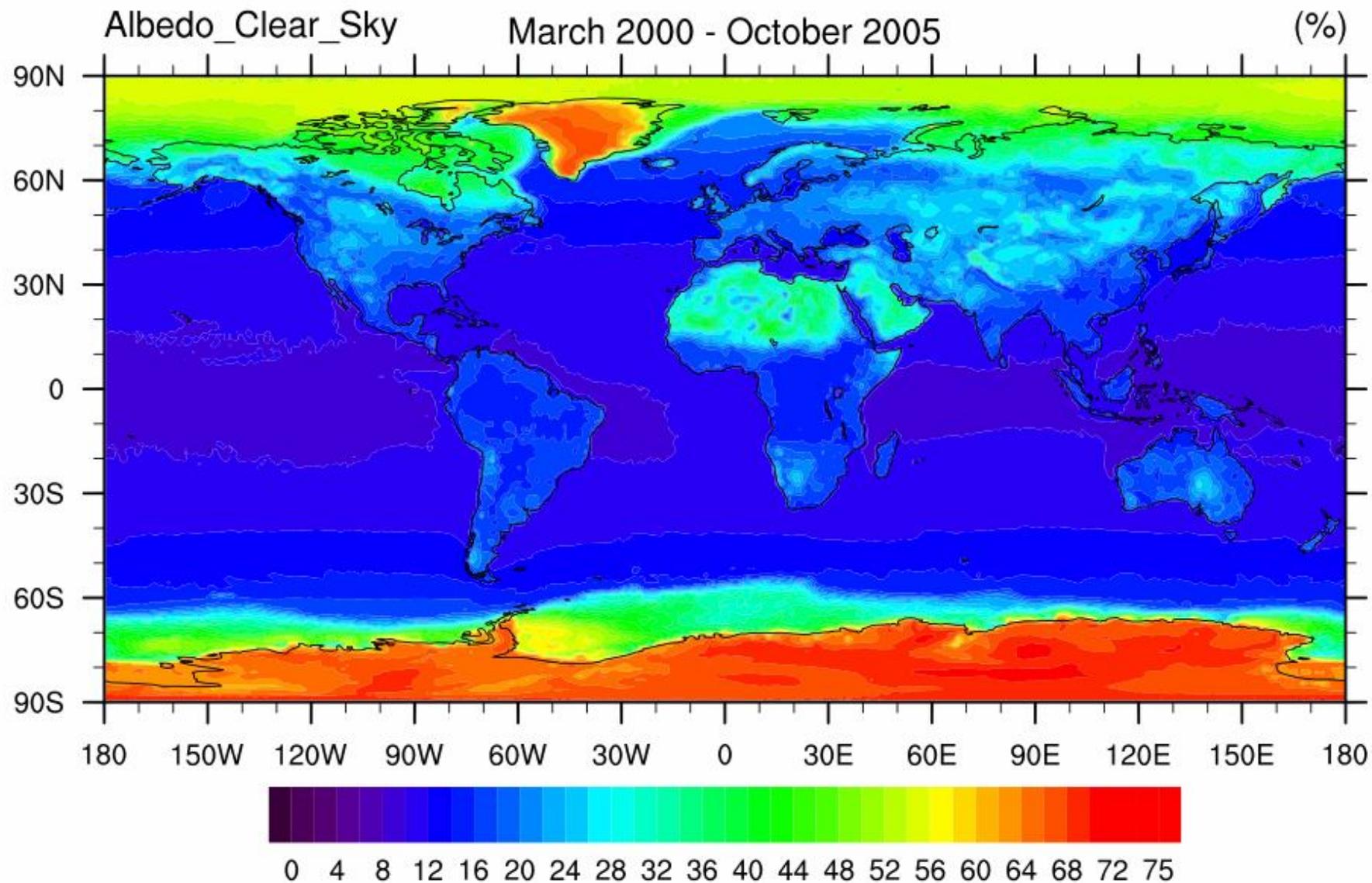
$$A = \Phi / \Phi_0$$

Φ_0 - падающий поток солнечного излучения;

Φ - поток, рассеянный планетой во все стороны.

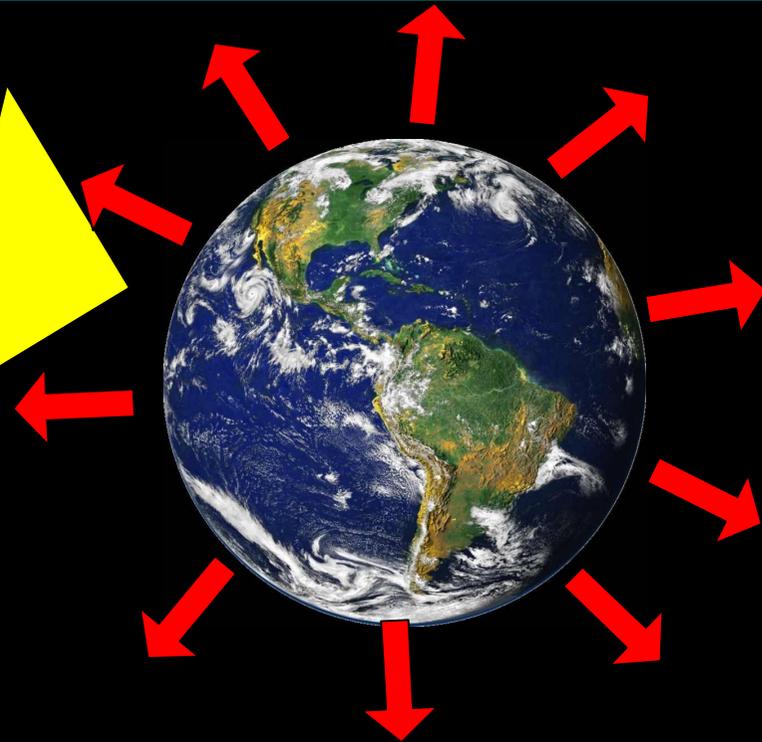
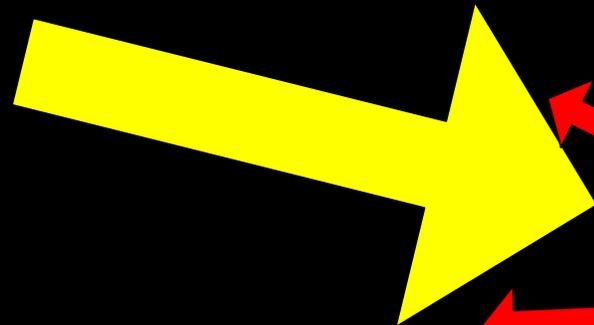
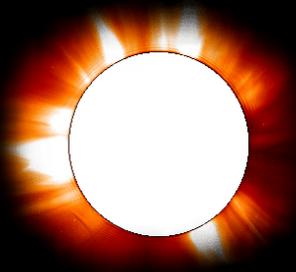
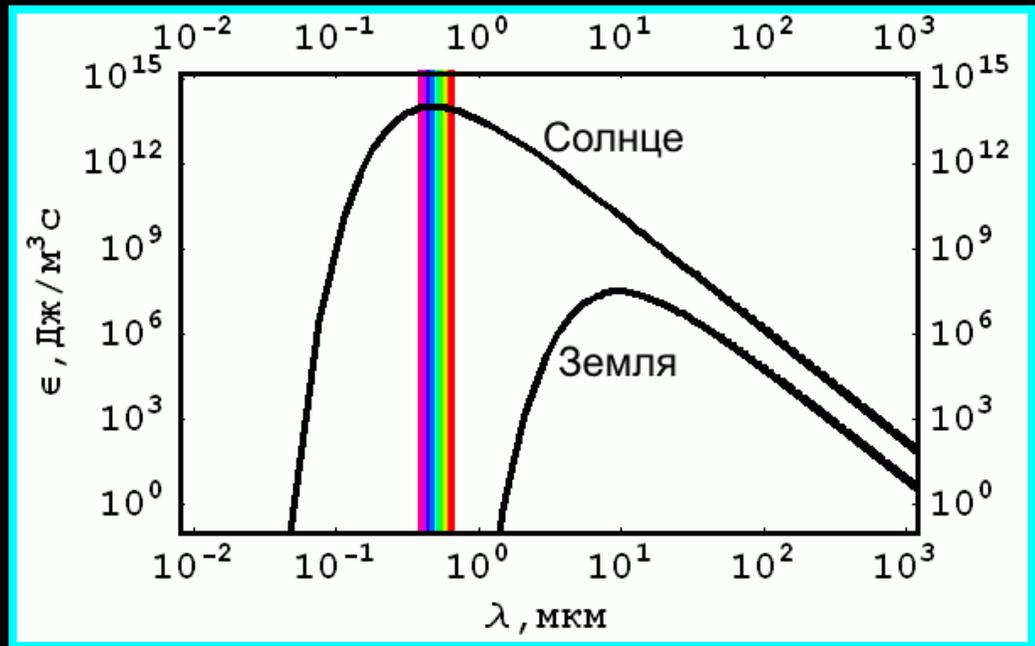
Альbedo различных поверхностей (%)

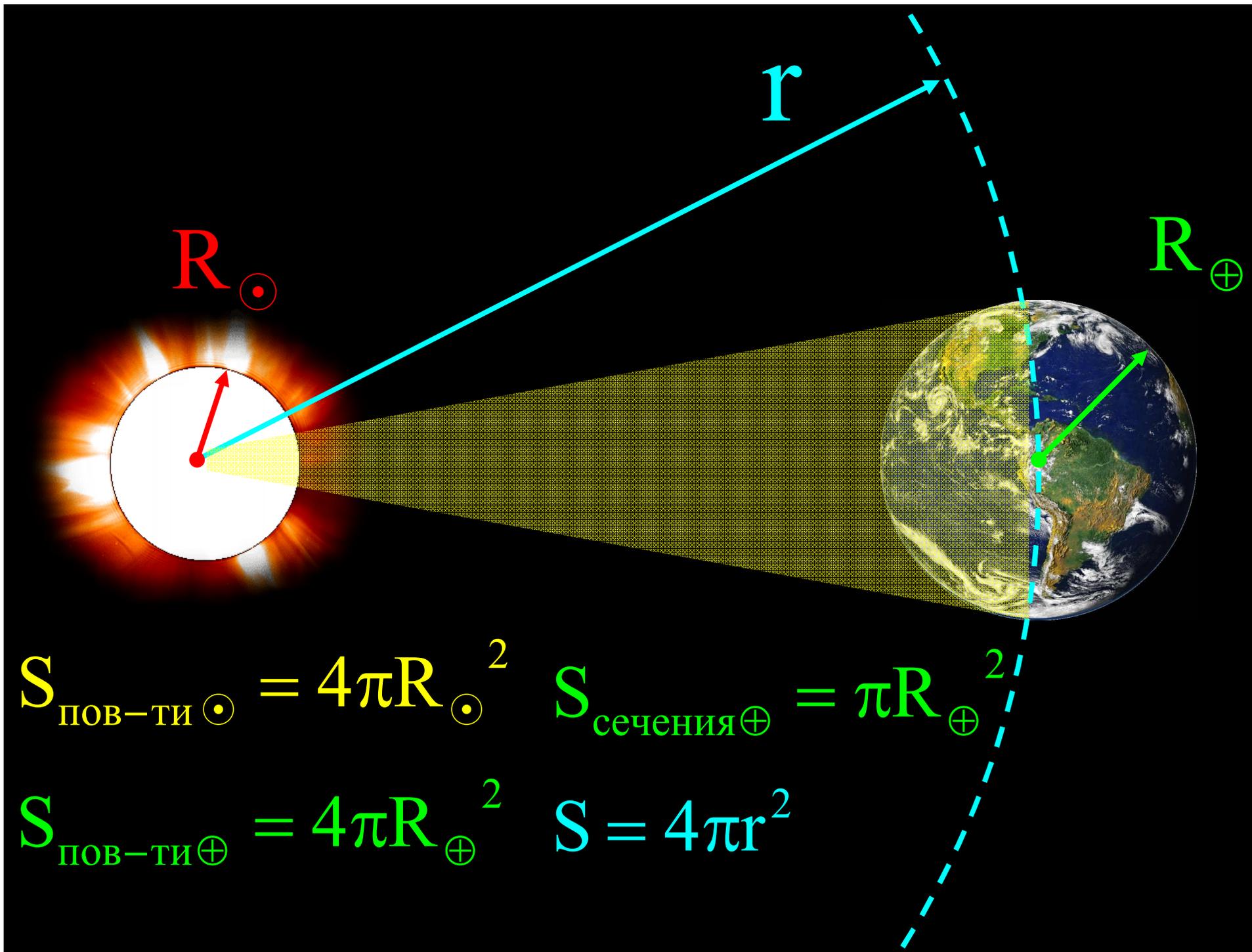
Океан	2-10
Леса	6-18
Города	14-18
Трава	7-25
Почва	10-20
Пустыня (песок)	35-45
Лед	20-70
Облака	30-70
Снег (старый)	40-60
Снег (свежий)	75-95



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

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





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

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

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

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

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

$$A \approx 0.3$$

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)



???

Joseph Fourier

1768 – 1830

**French mathematician and
physicist**



Svante Arrhenius

1859 – 1927

**Swedish scientist, the Nobel Prize for
Chemistry in 1903**

Не учтено влияние атмосферы! (парниковый эффект)

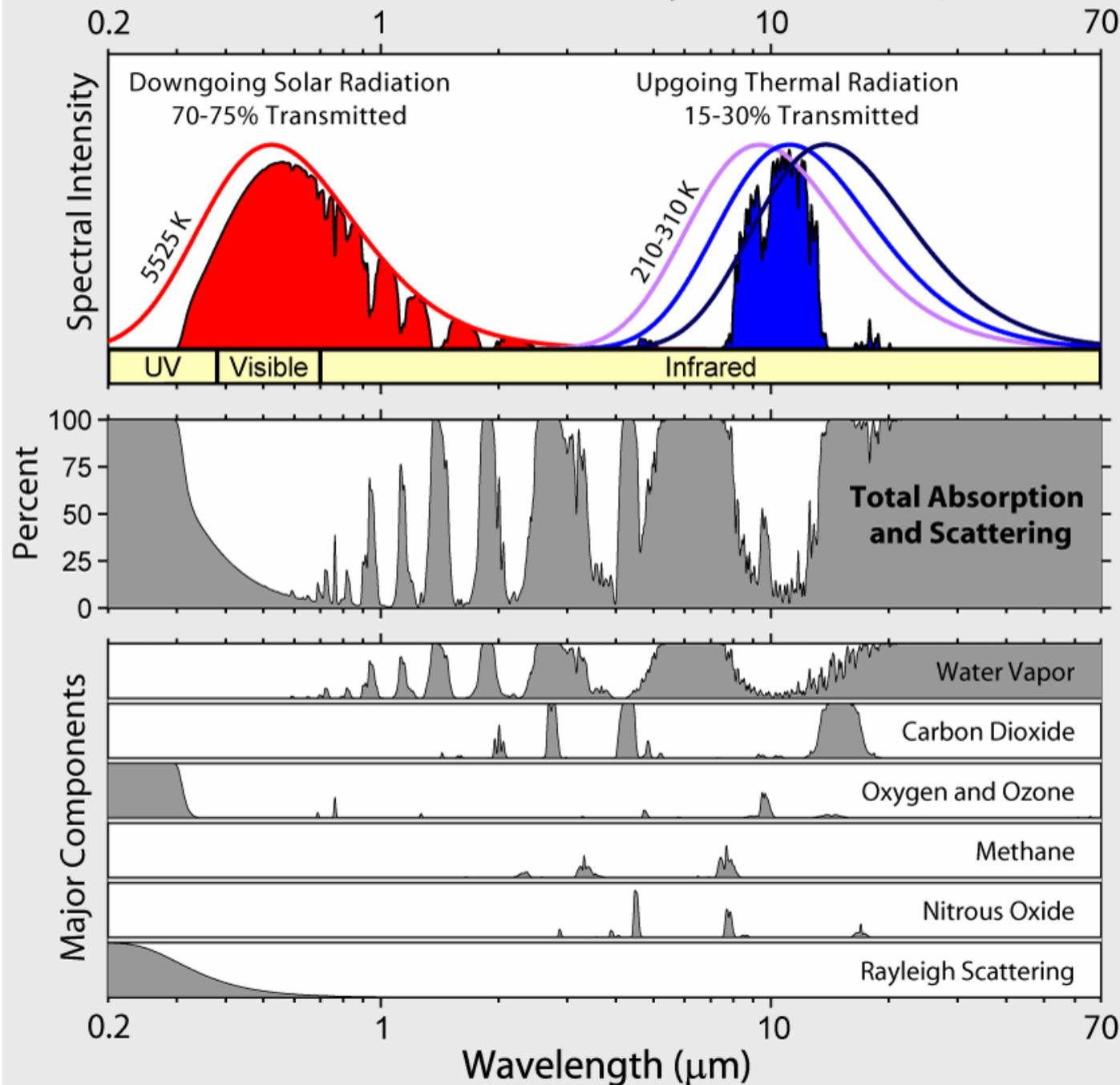


Fourier J. B., Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 7 (1827), pp. 569–604.



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

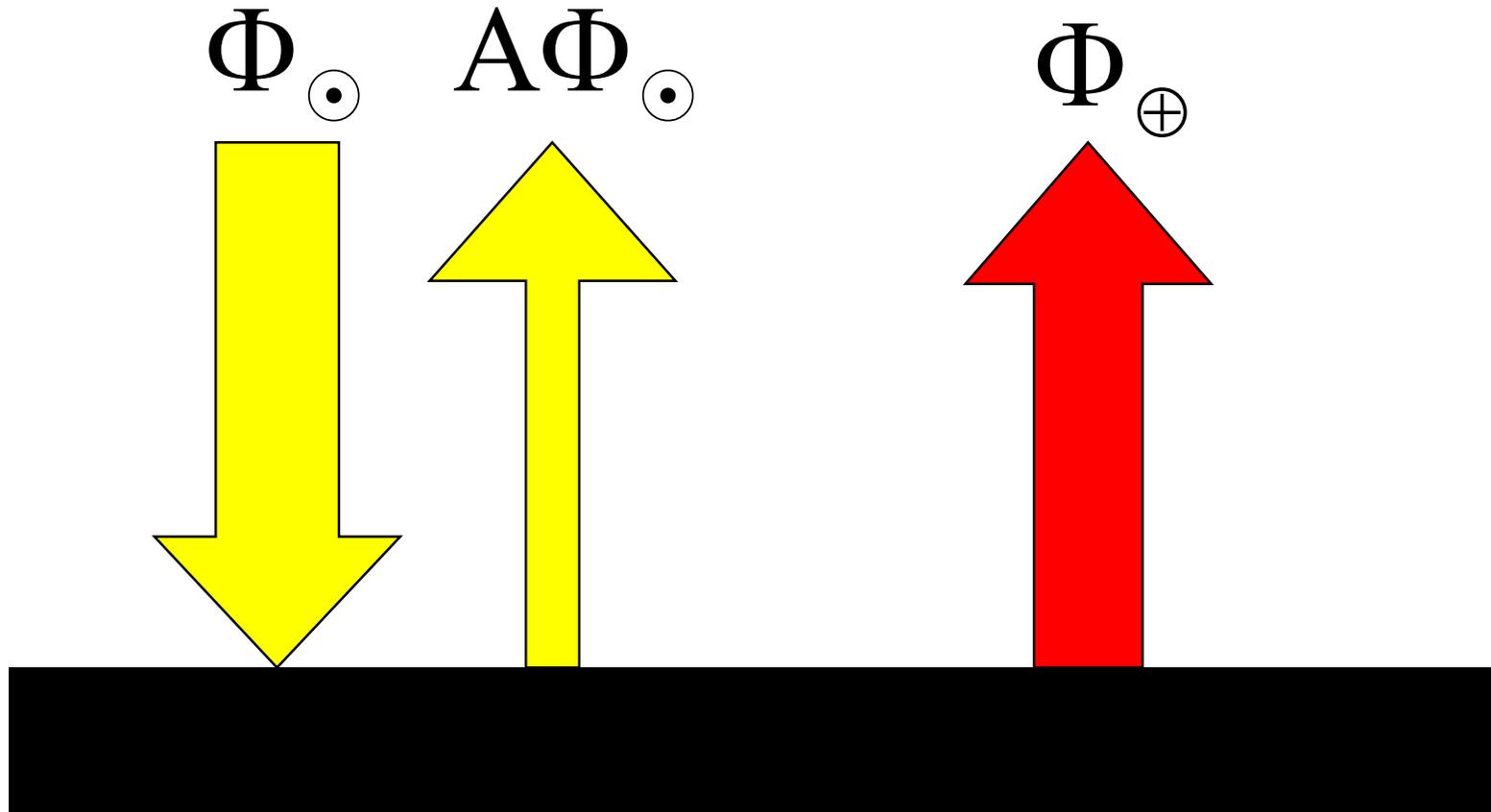
Спектр
поглощения
атмосферы

водяной пар
углекислый газ
кислород и озон
метан
закись азота

Модель без учета атмосферы

$\sim 0.5 \text{ мкм}$

$\sim 10 \text{ мкм}$

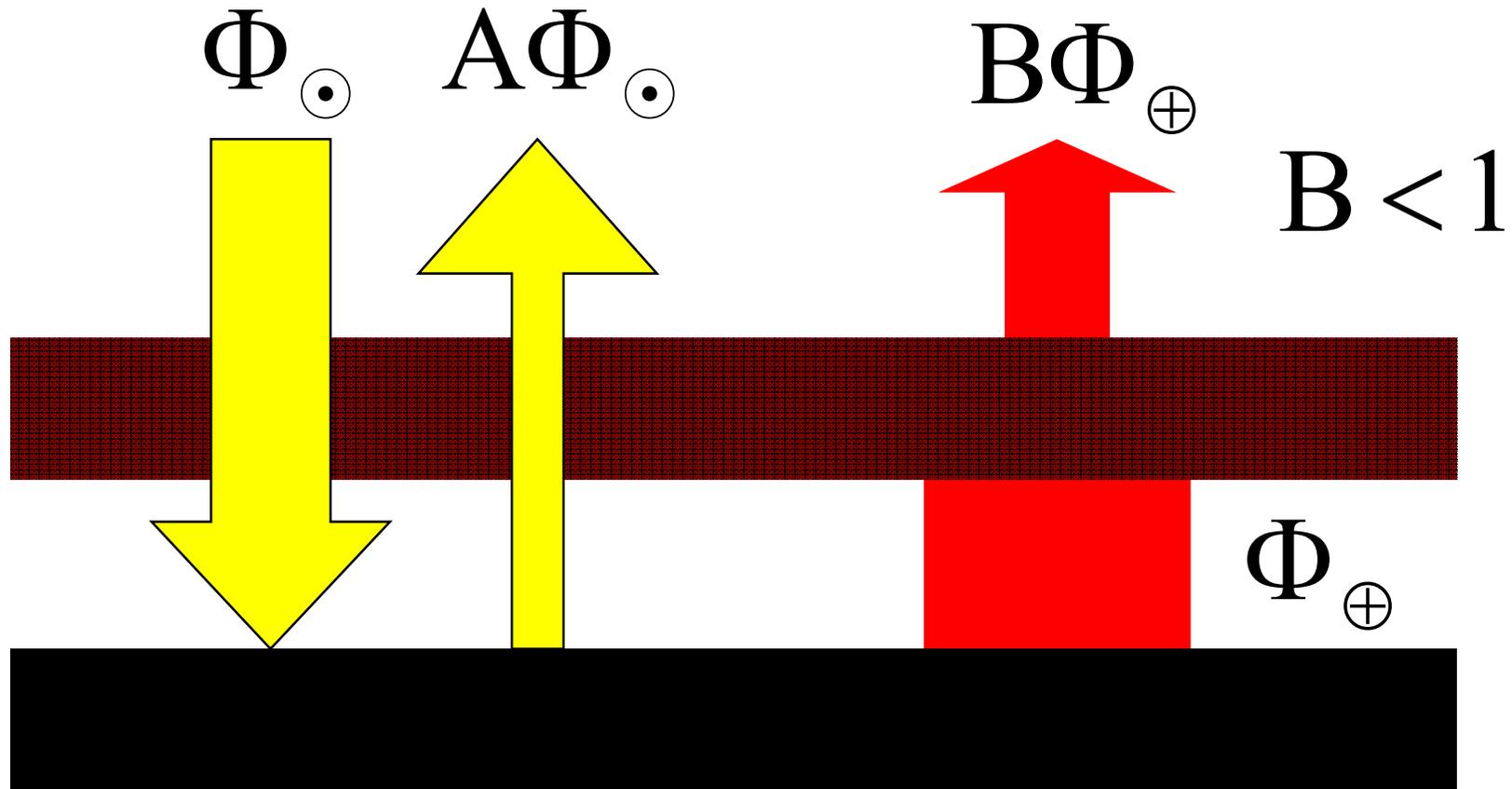


$$\Phi_{\odot} - A\Phi_{\odot} = \Phi_{\oplus}$$

Модель с учетом атмосферы

$\sim 0.5 \text{ мкм}$

$\sim 10 \text{ мкм}$



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

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

$$B < 1$$

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

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

$$B \approx 0.6$$

$$A \approx 0.3$$

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

$$r = 149.6 \cdot 10^9 \text{ м}$$

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

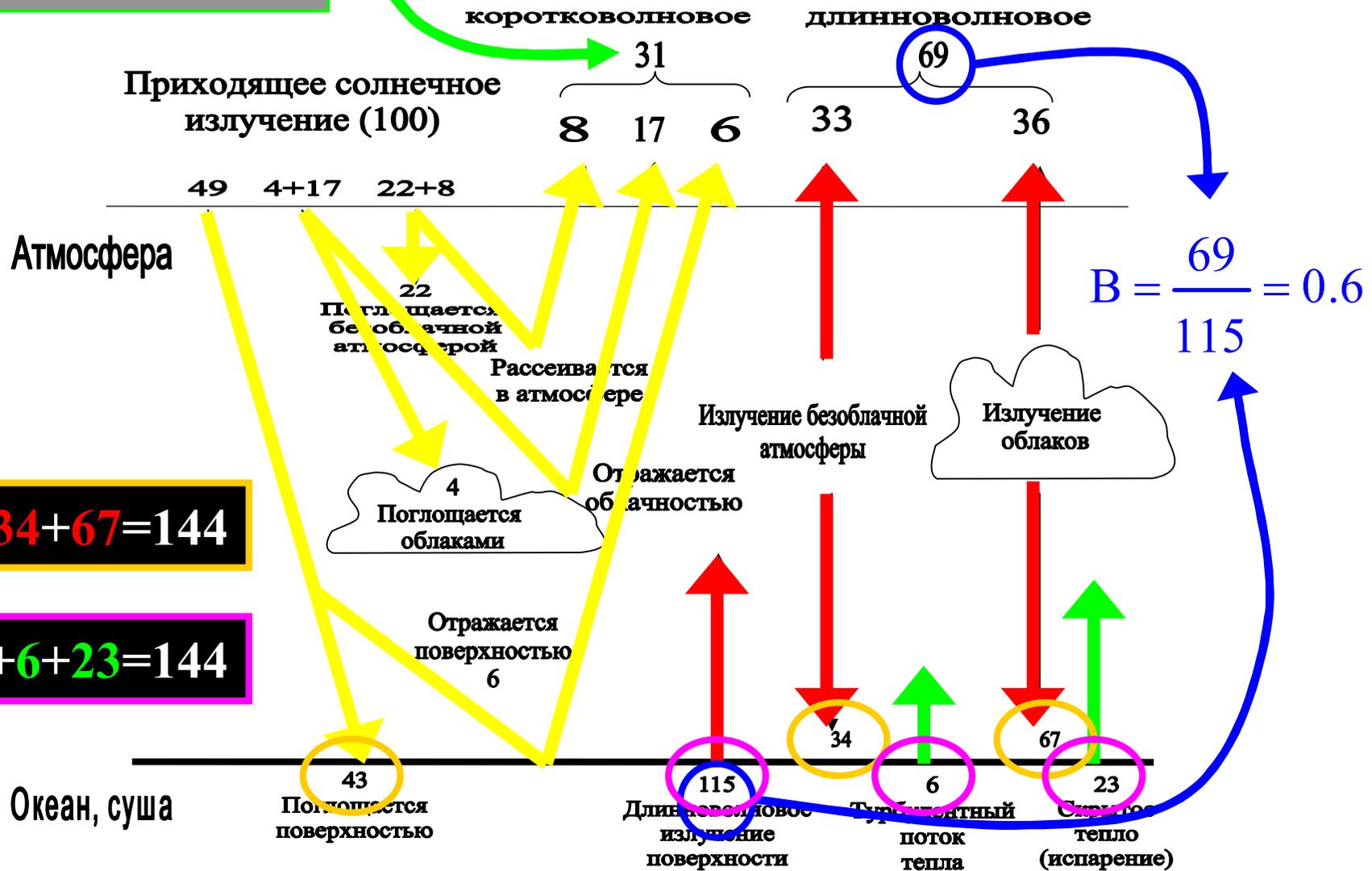
**ВОЗМОЖНОСТЬ ГЛОБАЛЬНОГО
ОЛЕДЕНЕНИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ**

Радиационно-тепловой баланс атмосферы

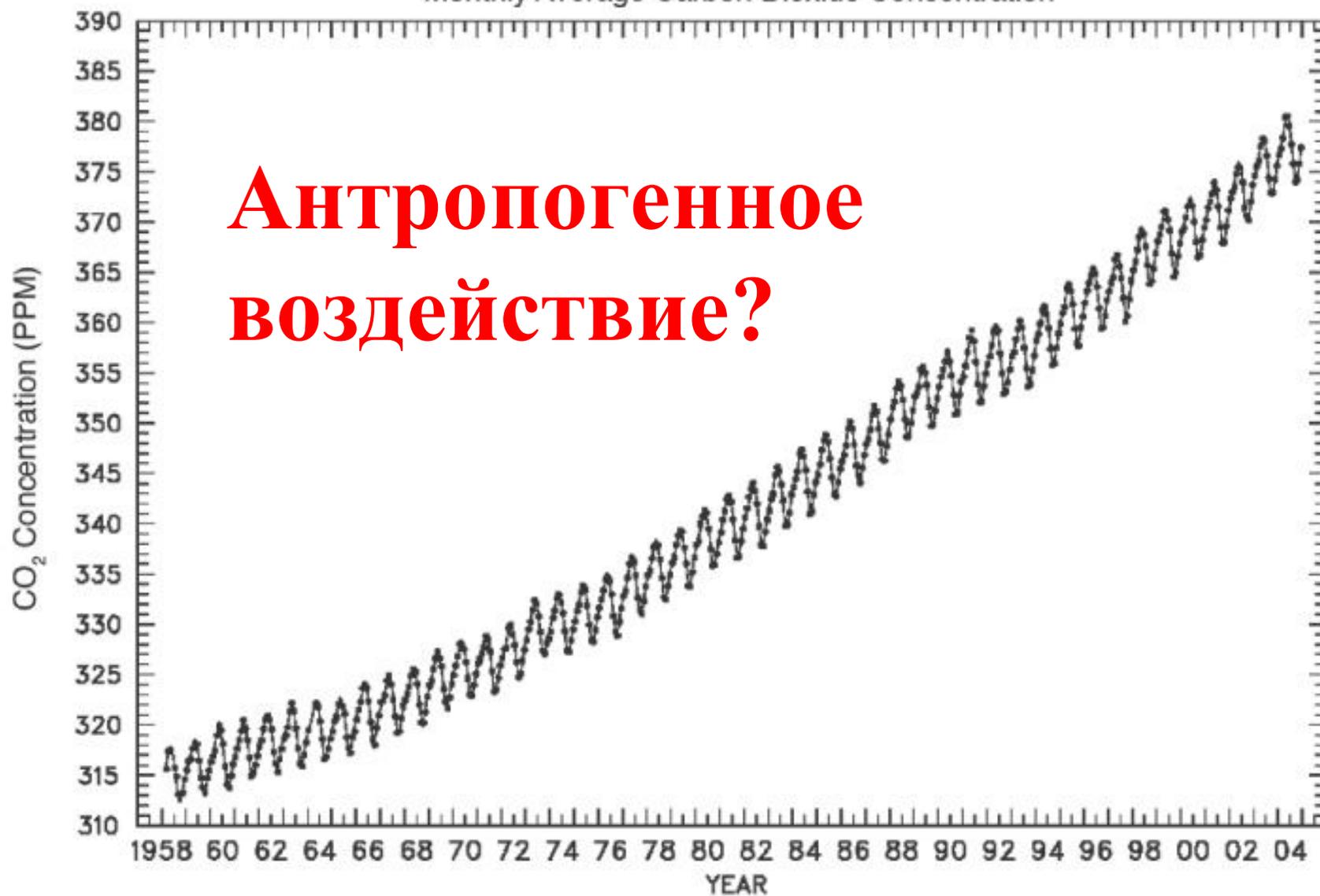
Космос

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



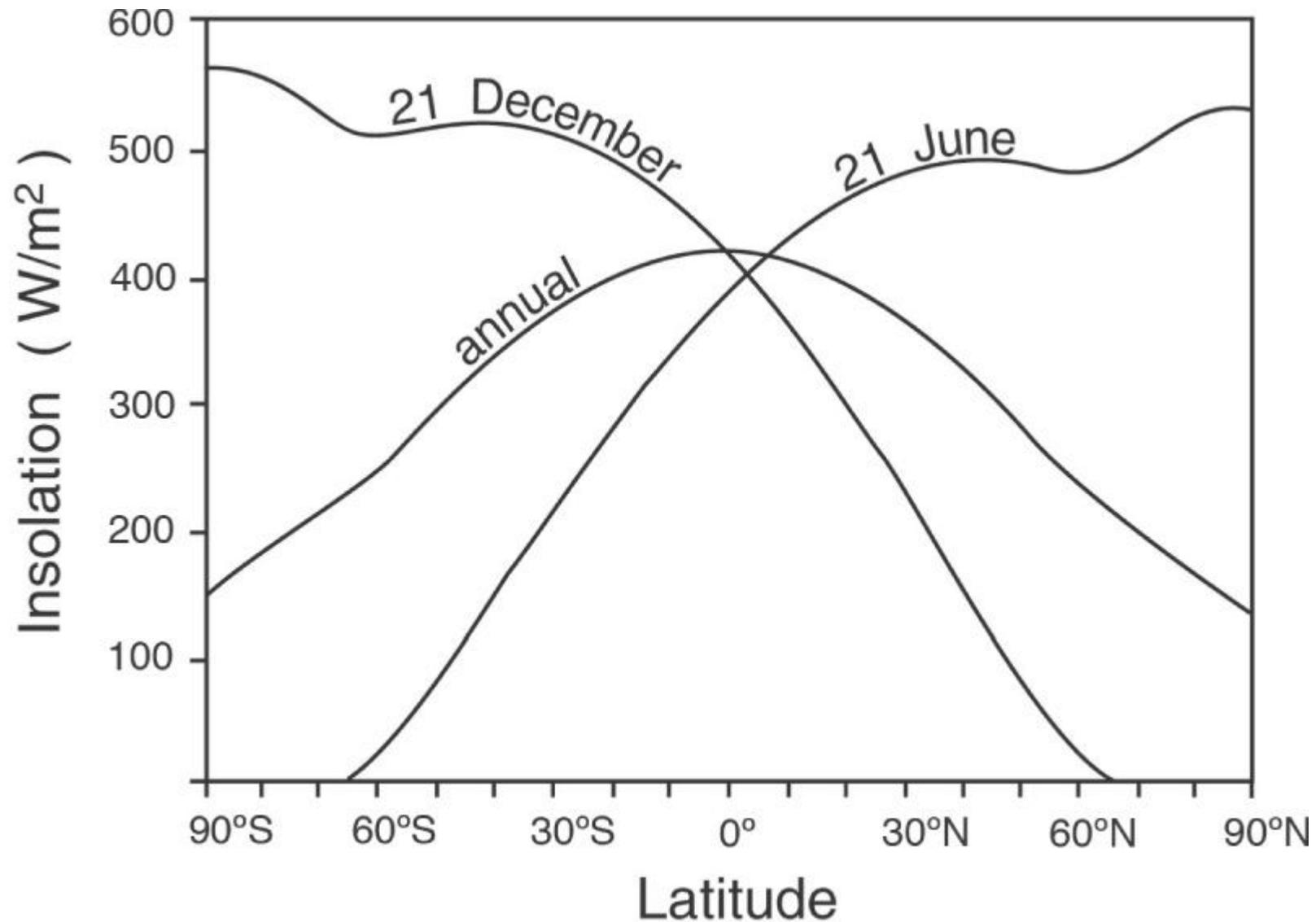
Концентрация CO₂ определяется:

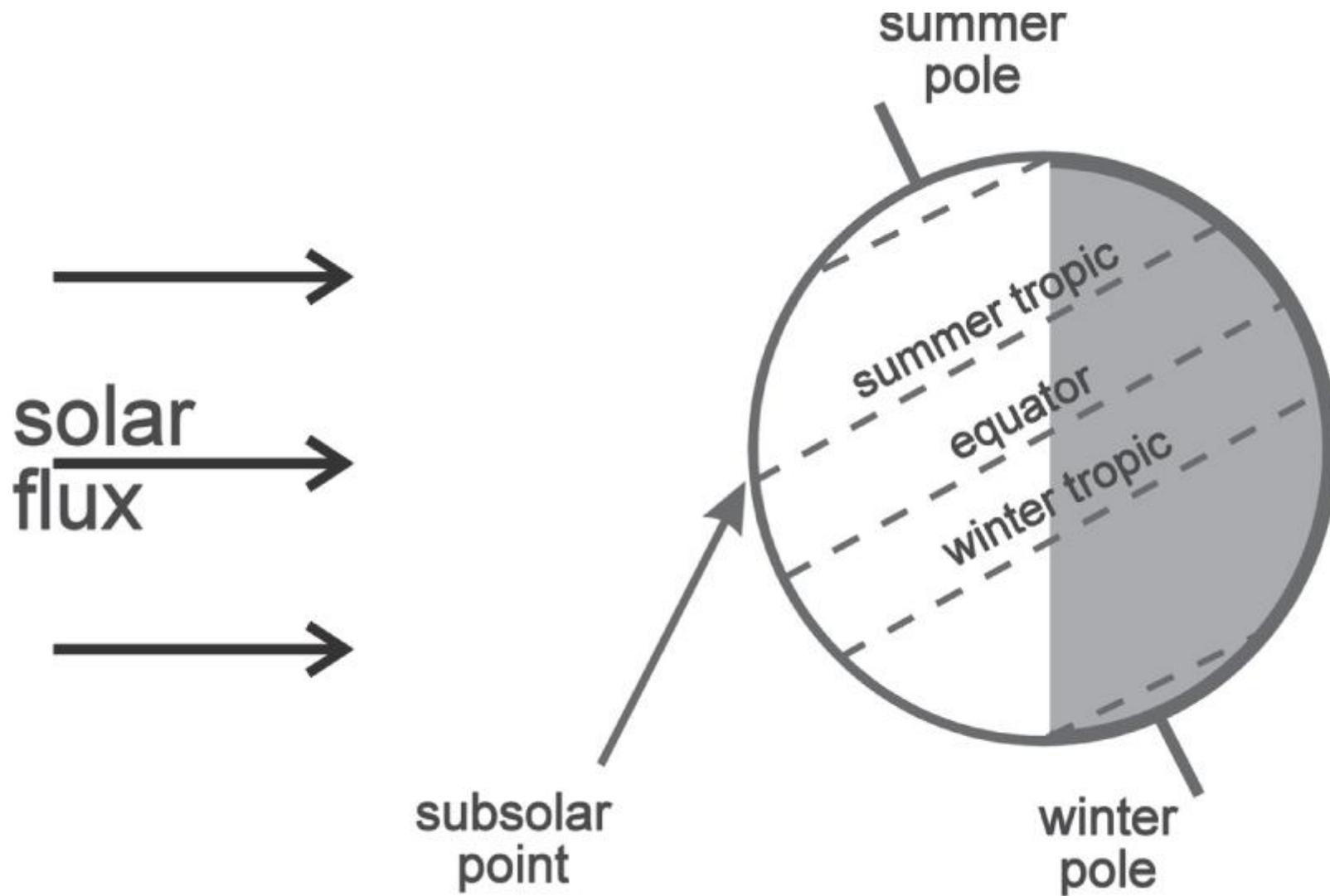
- 1. Фотосинтезом;**
- 2. Дыханием живых организмов;**
- 3. Обменом между океаном и атмосферой;**
- 4. Антропогенной деятельностью (в современном мире)**

Mauna Loa Observatory, Hawaii
Monthly Average Carbon Dioxide Concentration

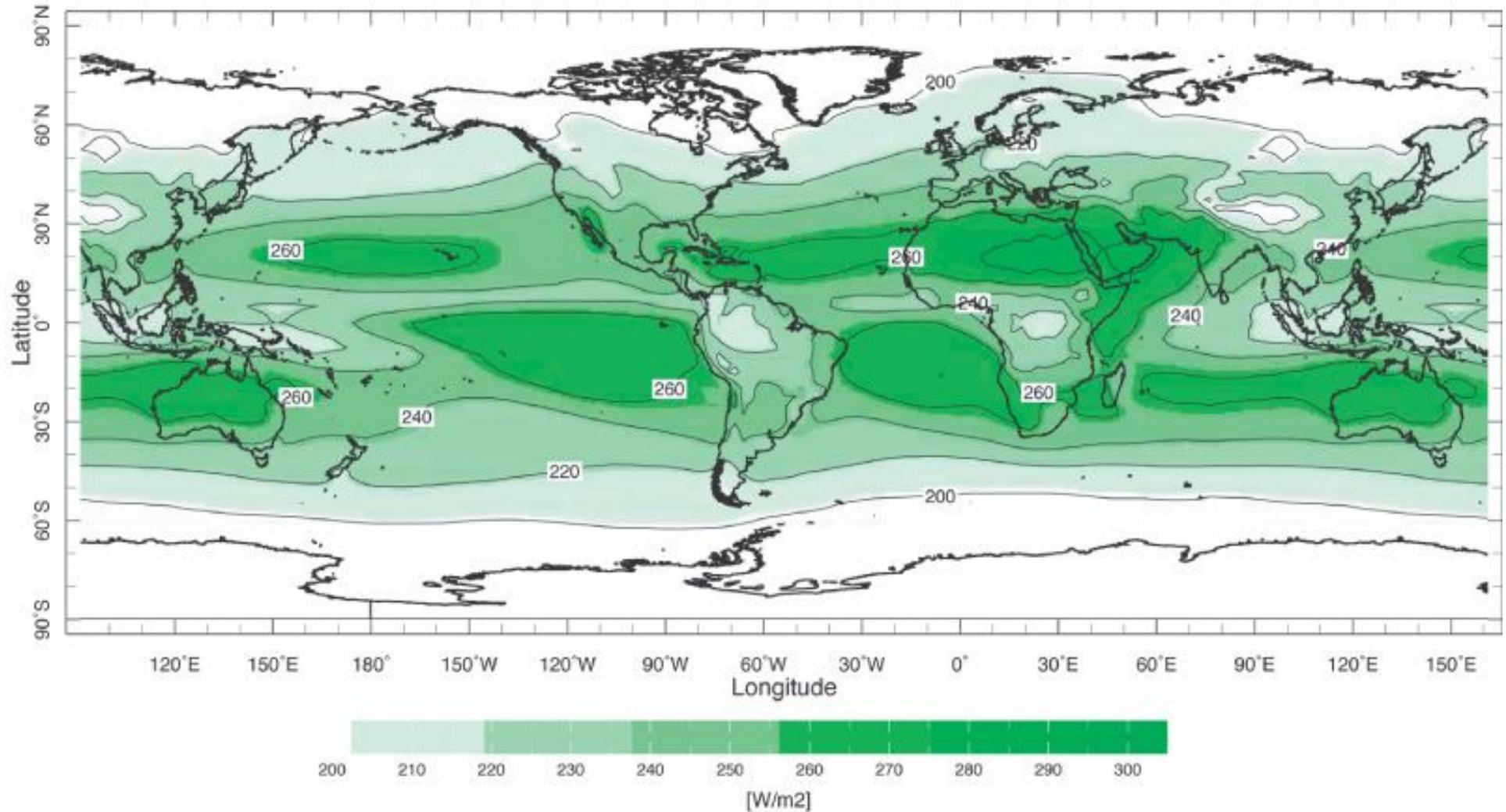


Широтное распределение инсоляции ($\text{Вт}/\text{м}^2$) поверхности Земли

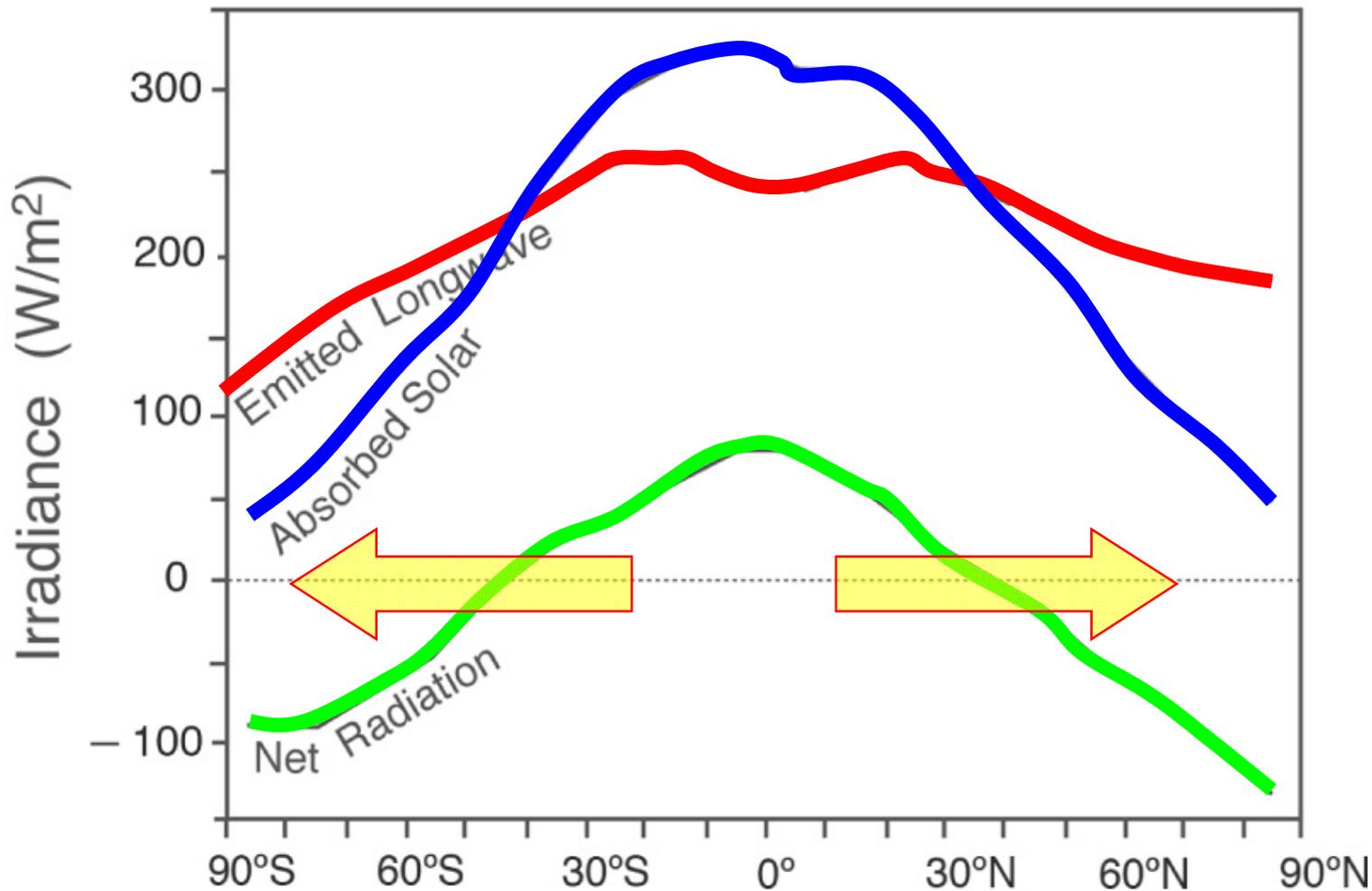




Outgoing Longwave Radiation (Wm^{-2})

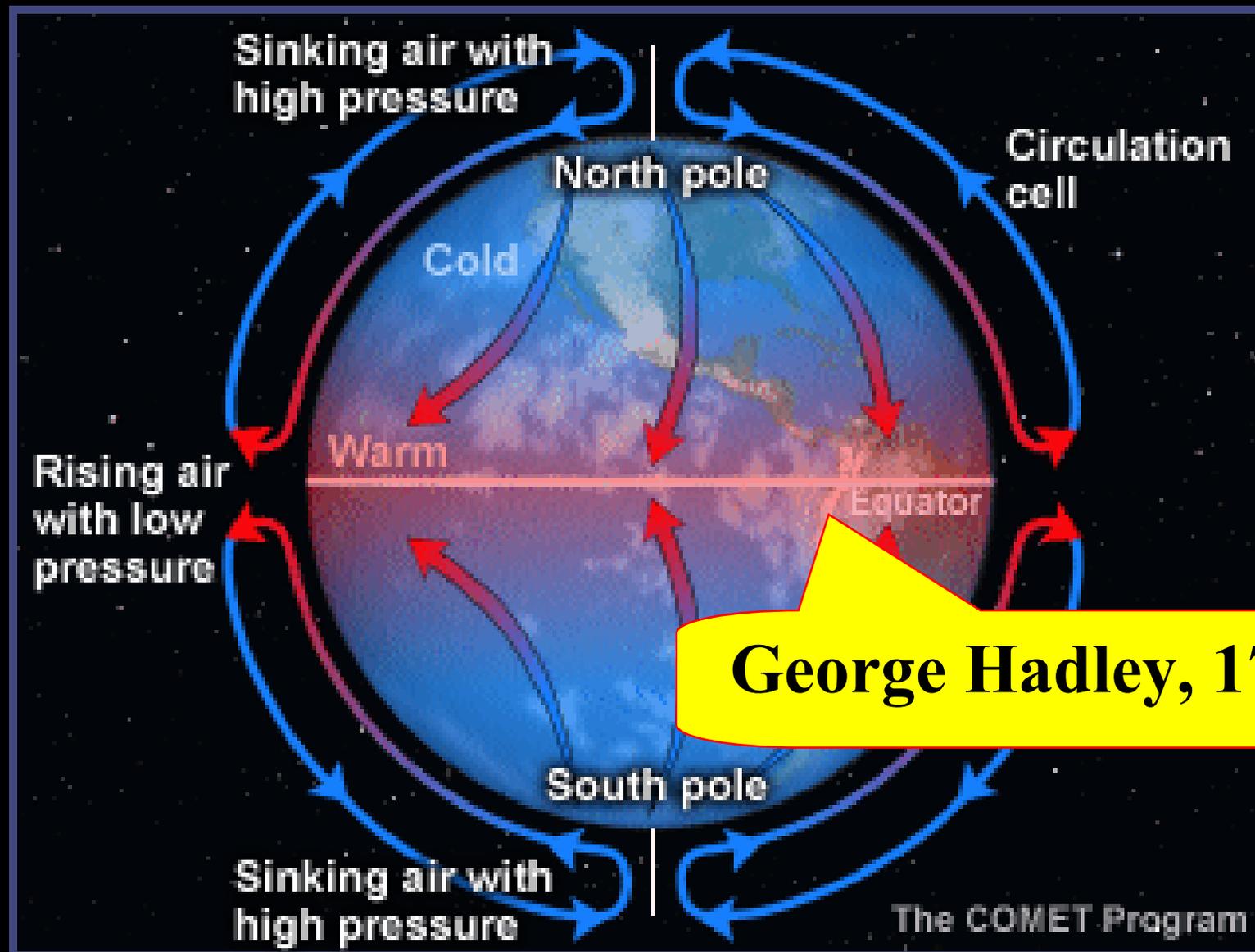


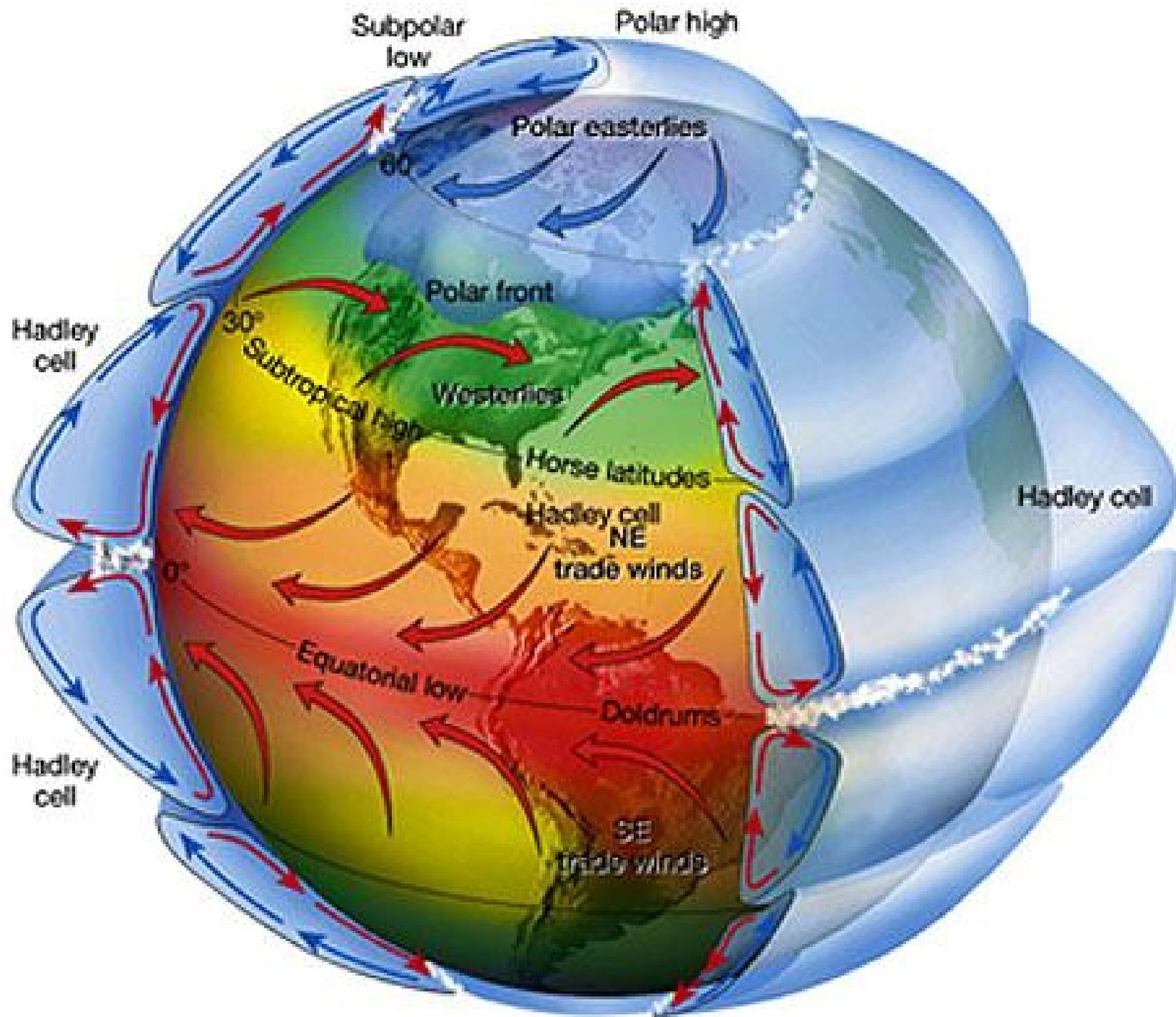
Среднегодовые широтные распределения радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$):
поглощенной солнечной, излученной длинноволновой
и их разница



Существует поток тепла от экватора к полюсам

Упрощенная модель циркуляции атмосферы



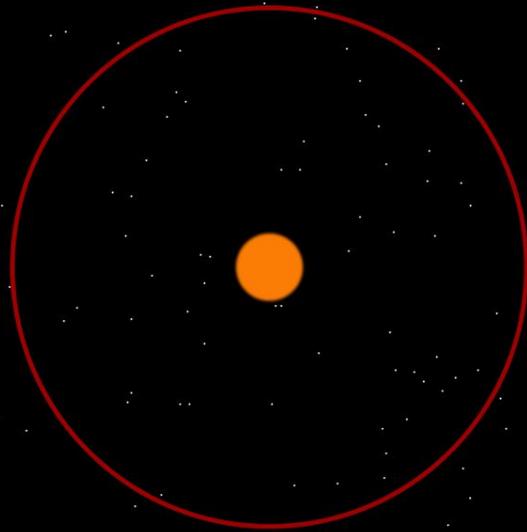




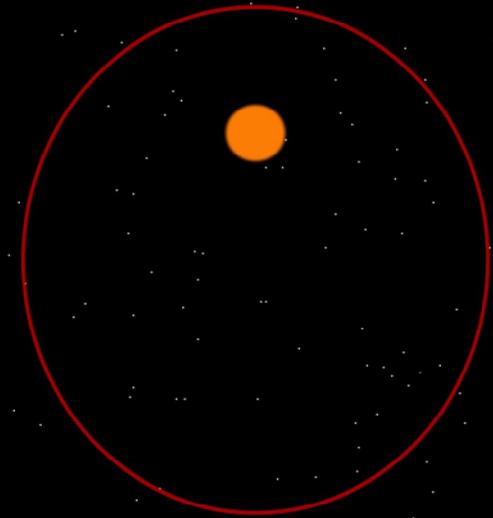
Милутин Миланкович
(1879-1958 гг.)
сербский математик,
создавший
математическую
теорию климата

Циклы Миланковича

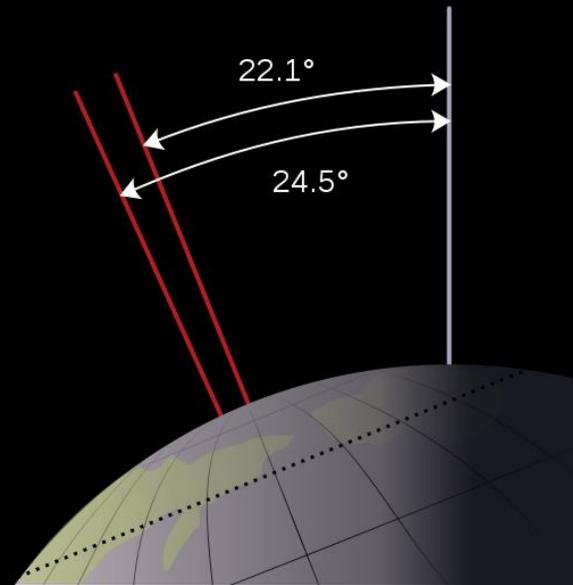
1. Эксцентриситет орбиты:
0.0007-0.0658 с периодом
100 тыс. лет
2. Наклон земной оси: 22.07°-
24.57° с периодом 41 тыс. лет
3. Прецессия: 19 и 23 тыс. лет
(климатическая прецессия –
вариации направления оси
вращения Земли относительно
плоскости орбиты)



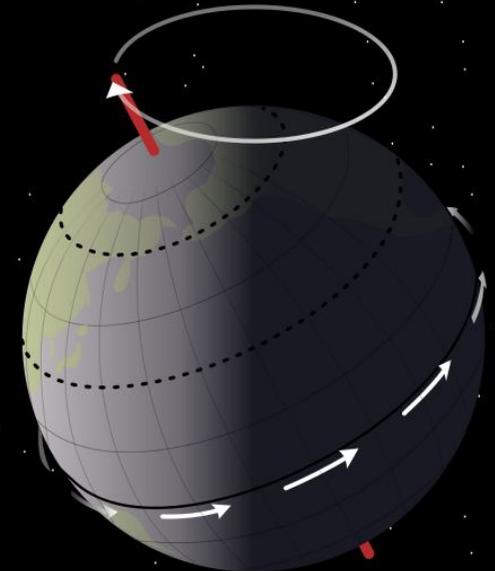
**Эксцентриситет орбиты:
0.0007-0.0658 с периодом
~100 тыс. лет**



**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)**



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

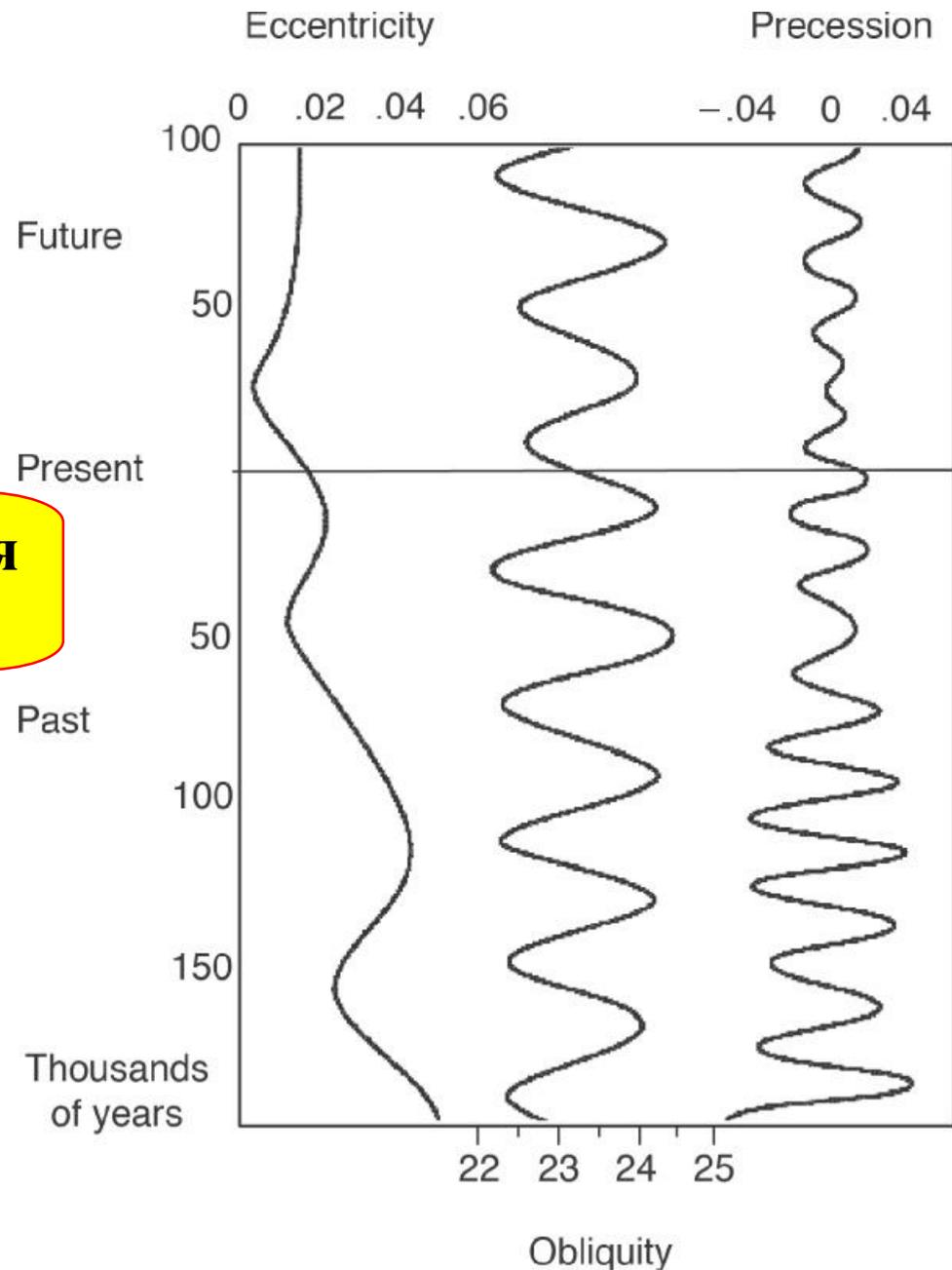
**средняя
инсоляция на
широте φ**

$\varphi_1(t)$

**эквивалентная
широта**

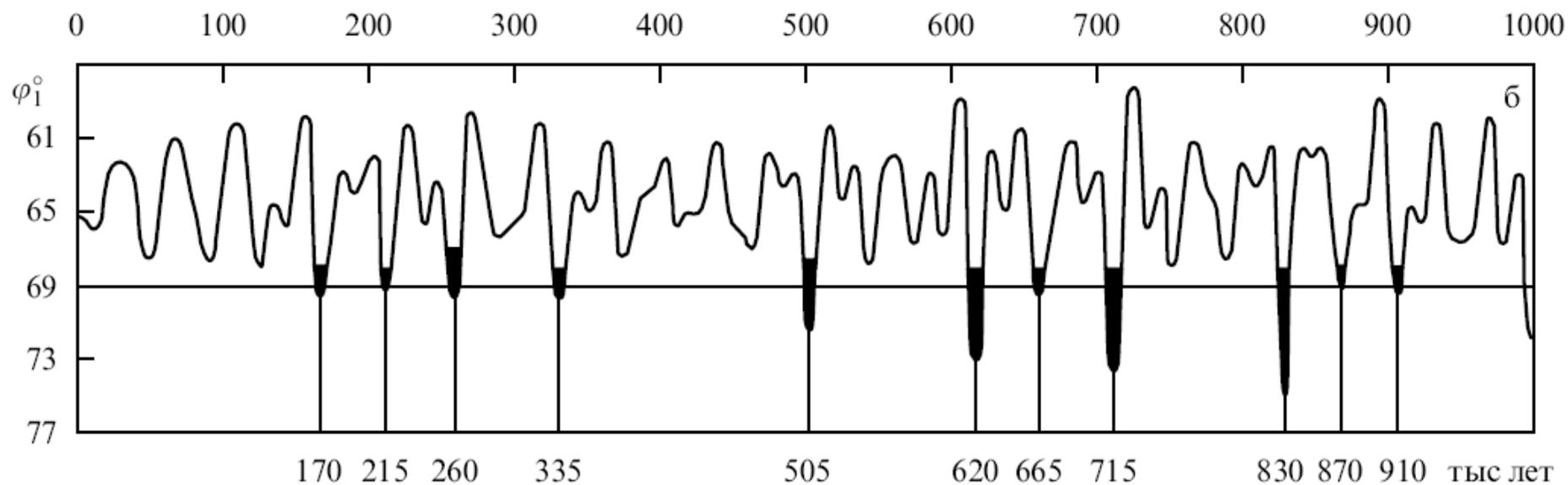
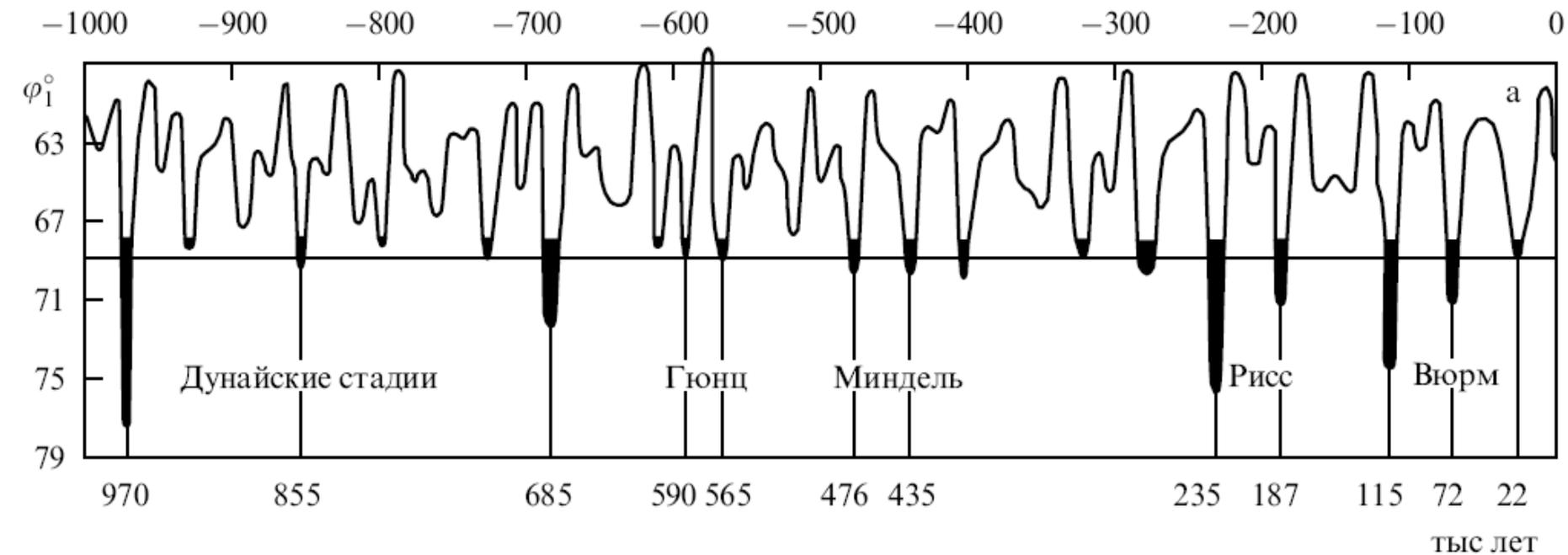
**астрономическая
эпоха**

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



(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.)**