

Физическое и математическое  
моделирование процессов в геосредах  
(Введение в физику моря и вод суши)

---

---

2021 Лекция №3

---

---

Носов Михаил Александрович  
*отделение геофизики, физический факультет МГУ*

---

---

# 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,  
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.

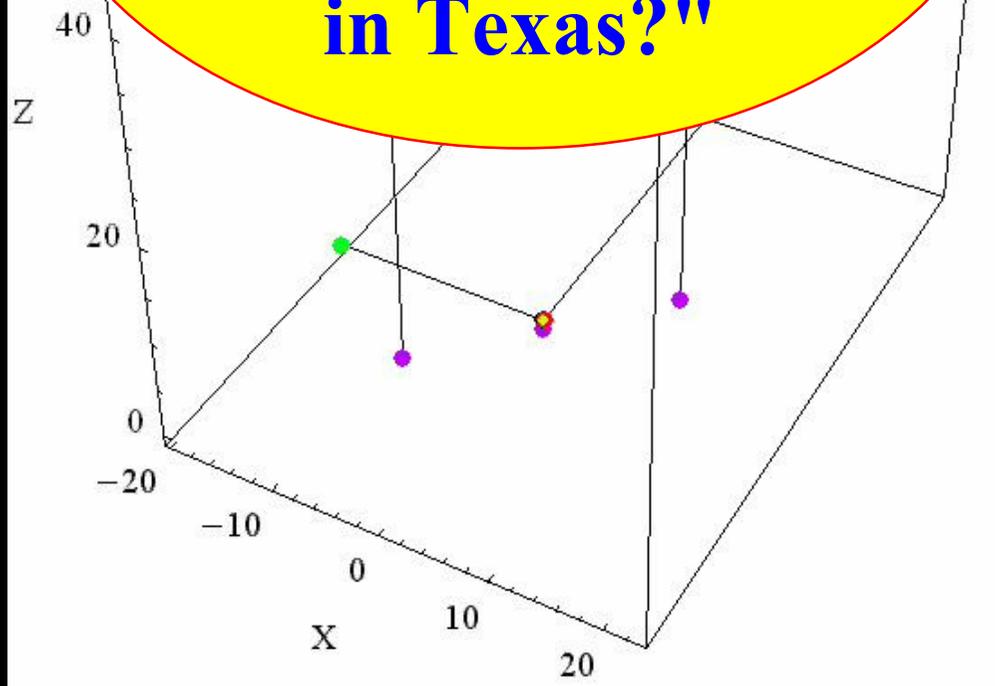


***Василий Васильевич  
Докучаев (1846-1903 гг.)***  
– русский ученый,  
основатель современного  
научного почвоведения и  
комплексного  
исследования природы

- ❑ **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

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

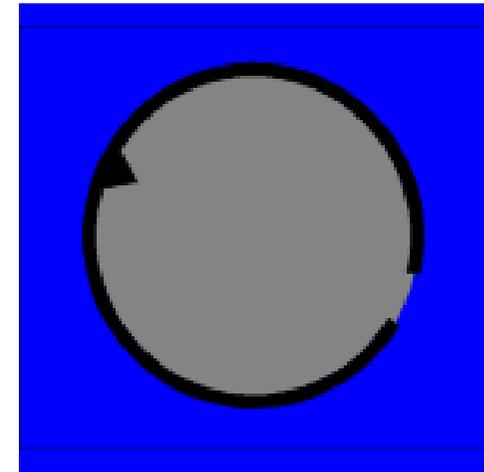
**"Does the Flap of  
a Butterfly's  
Wings in Brazil  
Set Off a Tornado  
in Texas?"**



***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

$\lambda$  – длина волны

$c$  – скорость света

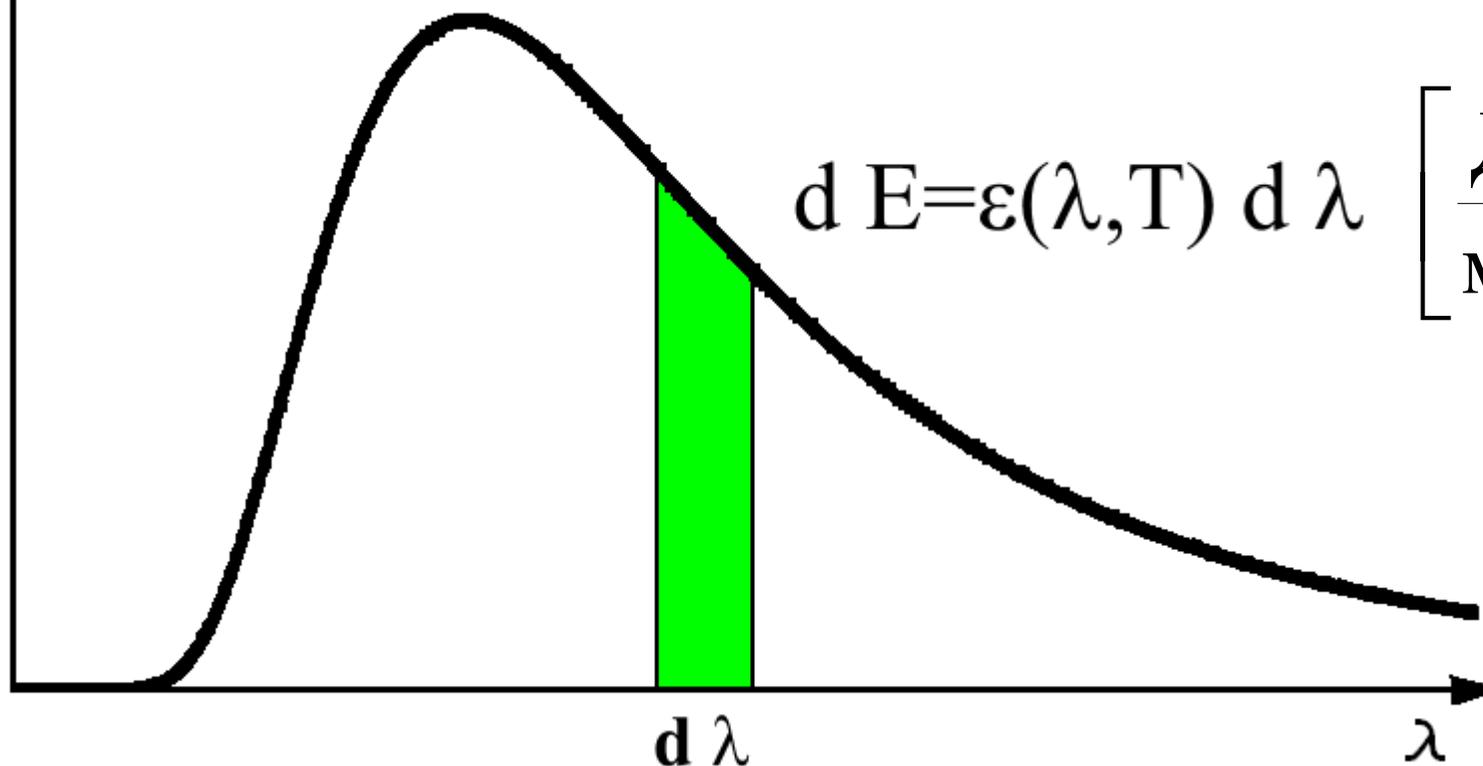
$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка

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

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

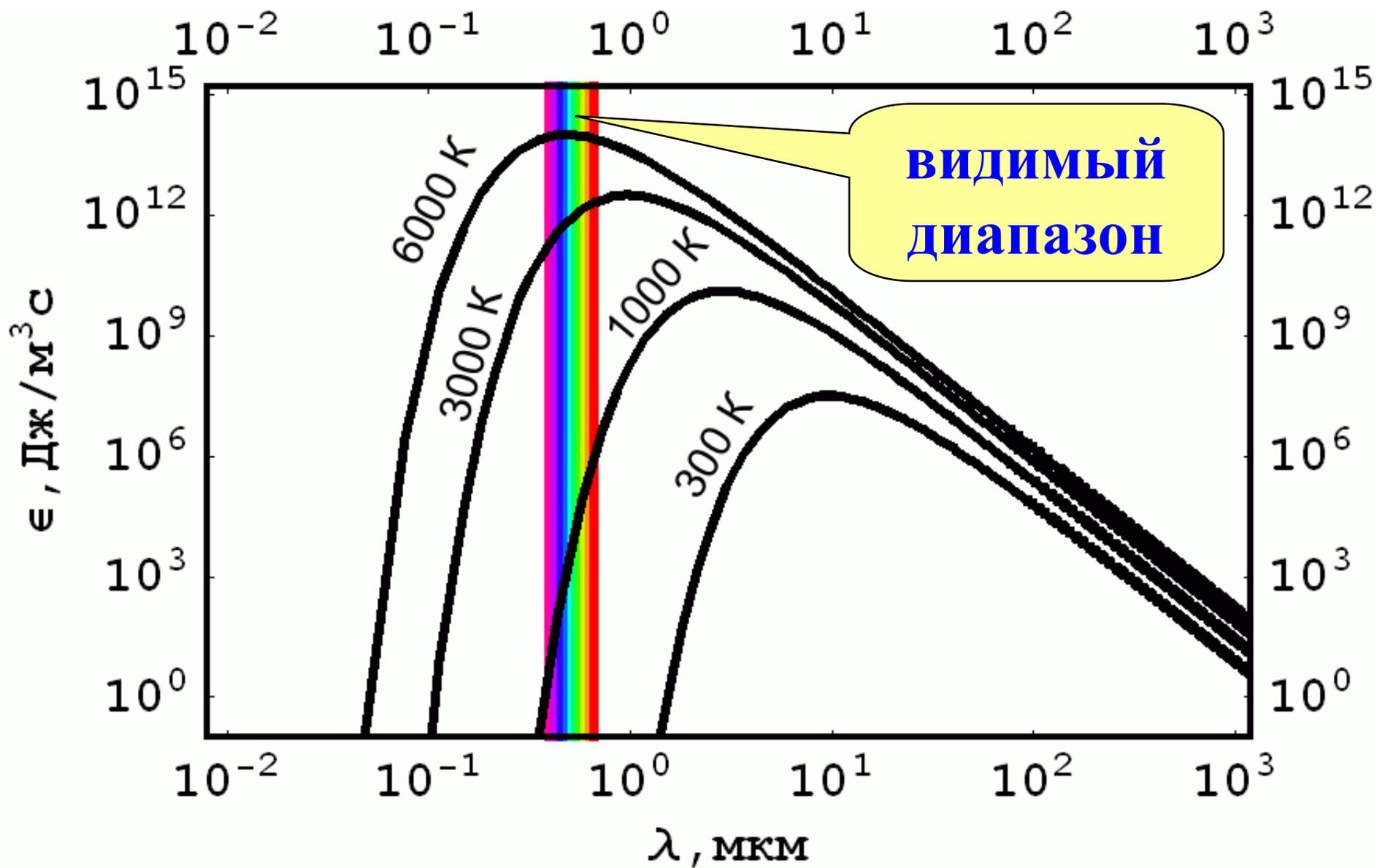
$$\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} \cdot \frac{1}{\text{м}} \right]$$

$\varepsilon$



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

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



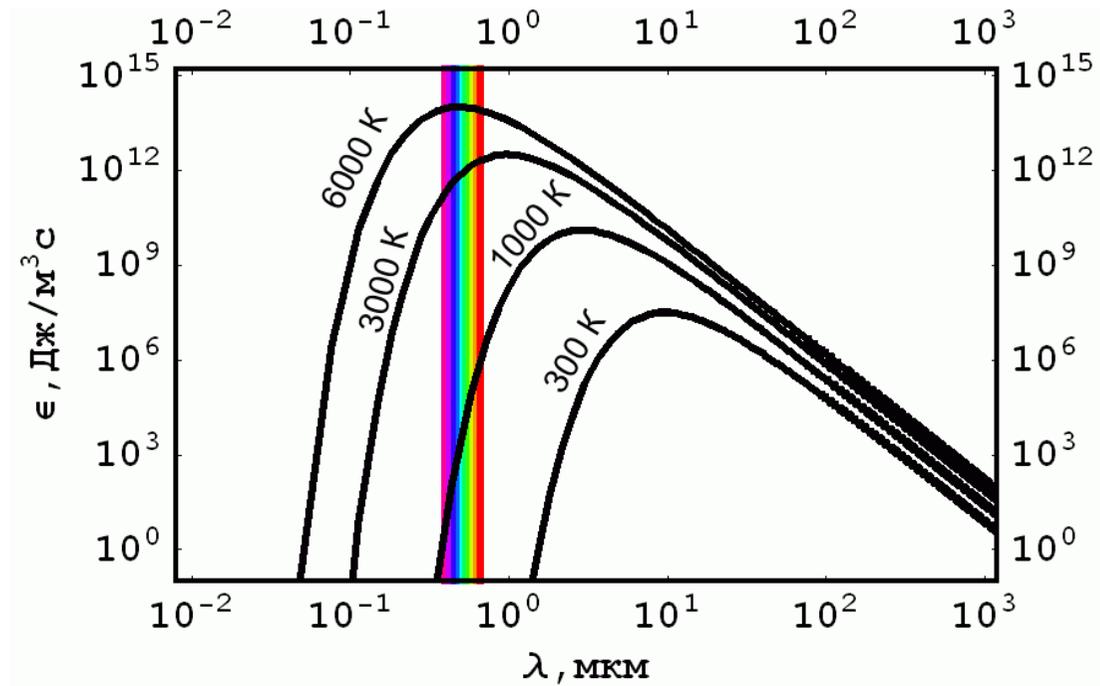
800-1200 °C



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  $\beta$ :

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!)

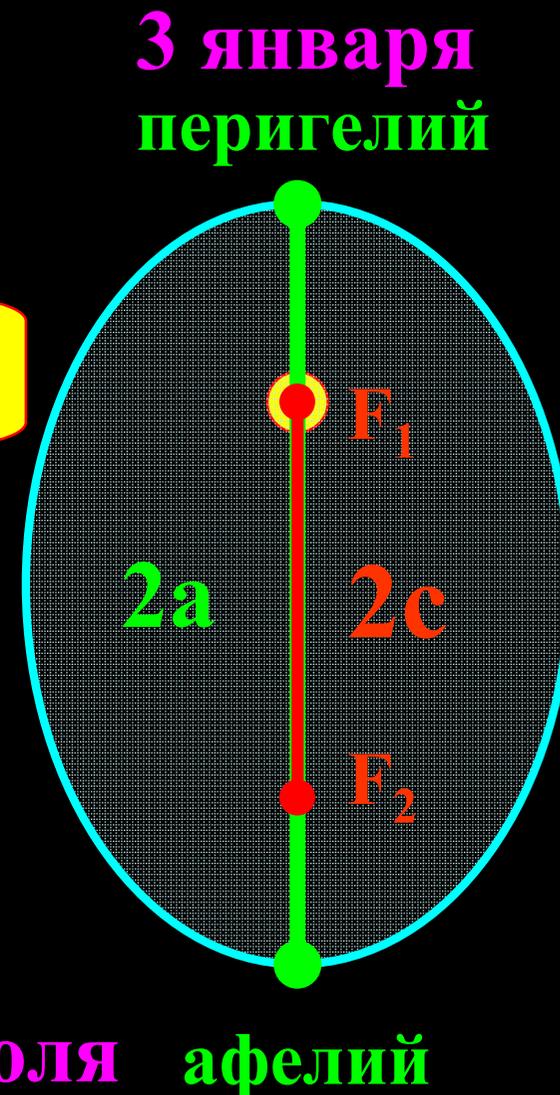
$$\Phi \sim \frac{1}{r^2} \Rightarrow \frac{\Phi_{\text{перигелий}}}{\Phi_{\text{афелий}}} = \left( \frac{r_{\text{афелий}}}{r_{\text{перигелий}}} \right)^2$$

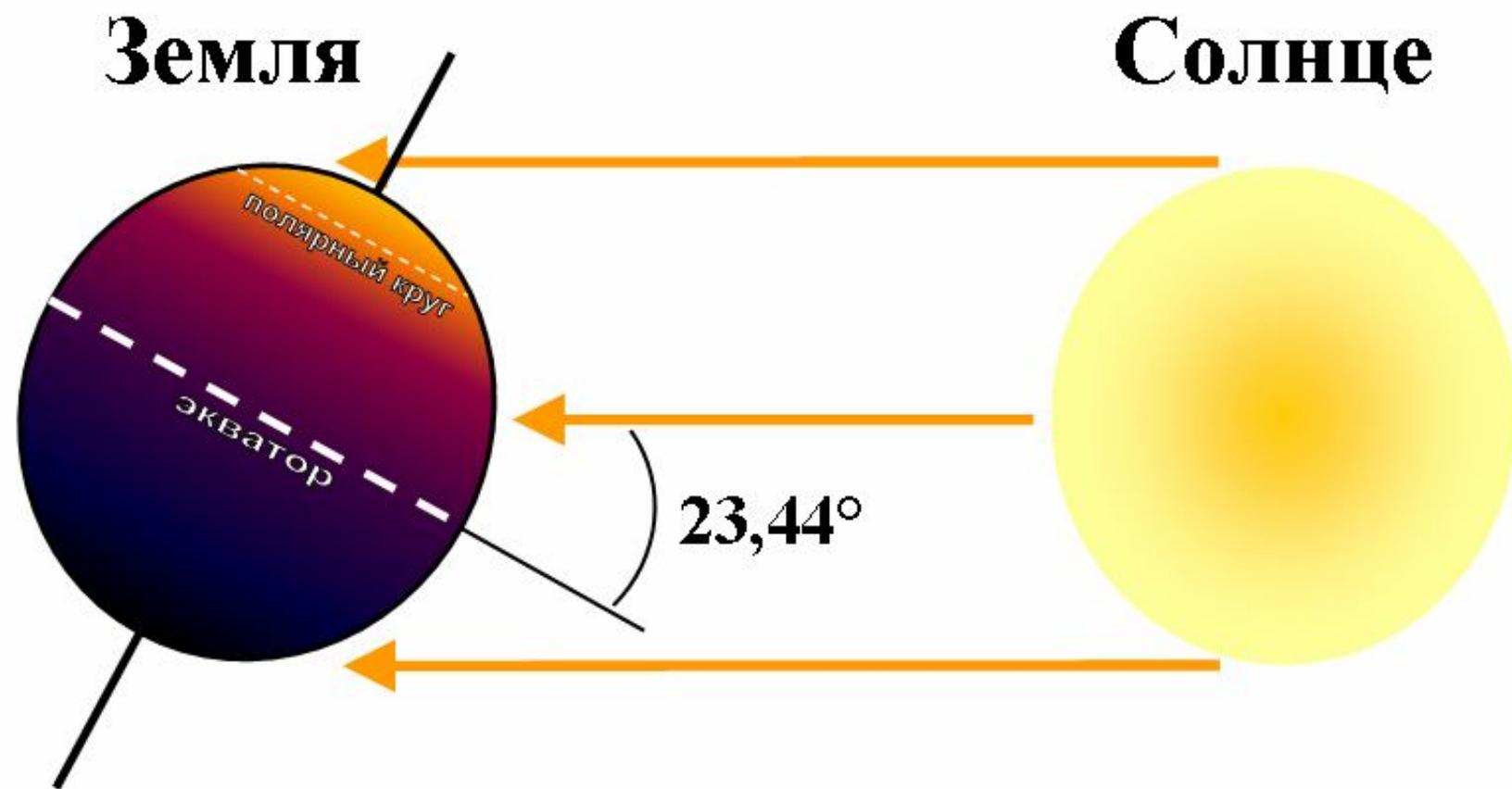
$$e = c/a = 0.0167$$

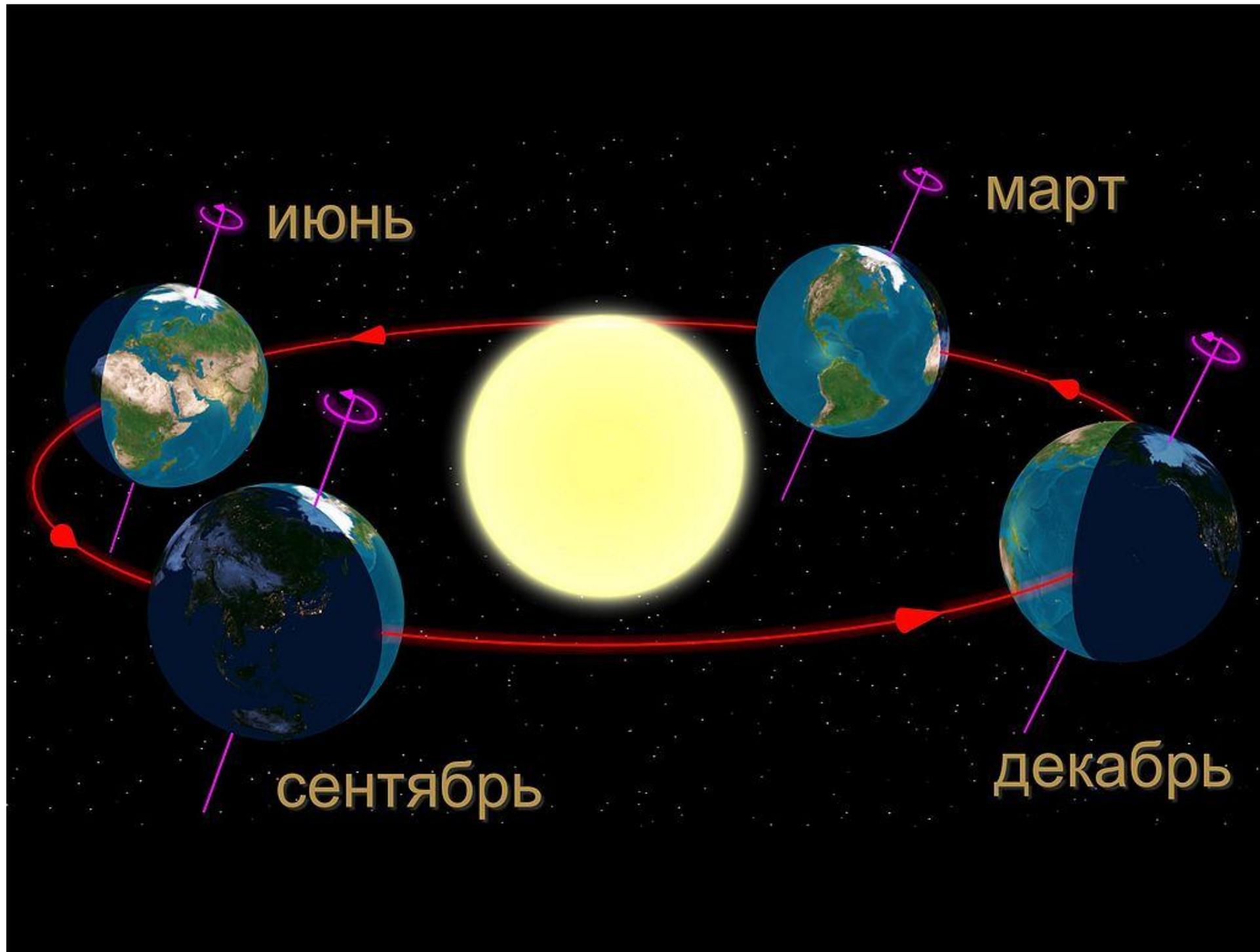
$$\frac{r_{\text{афелий}}}{r_{\text{перигелий}}} = \frac{a+c}{a-c} = \frac{1+e}{1-e} \approx 1.017$$

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

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







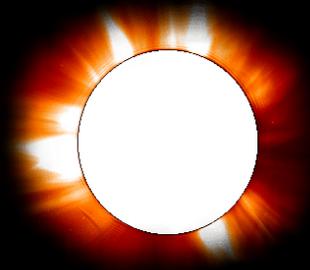
ИЮНЬ

март

сентябрь

декабрь

# Оценка радиационной температуры Земли



В спектре планет  
всегда присутствуют  
два максимума:

1. отраженное  
солнечное излучение

2. тепловое излучение

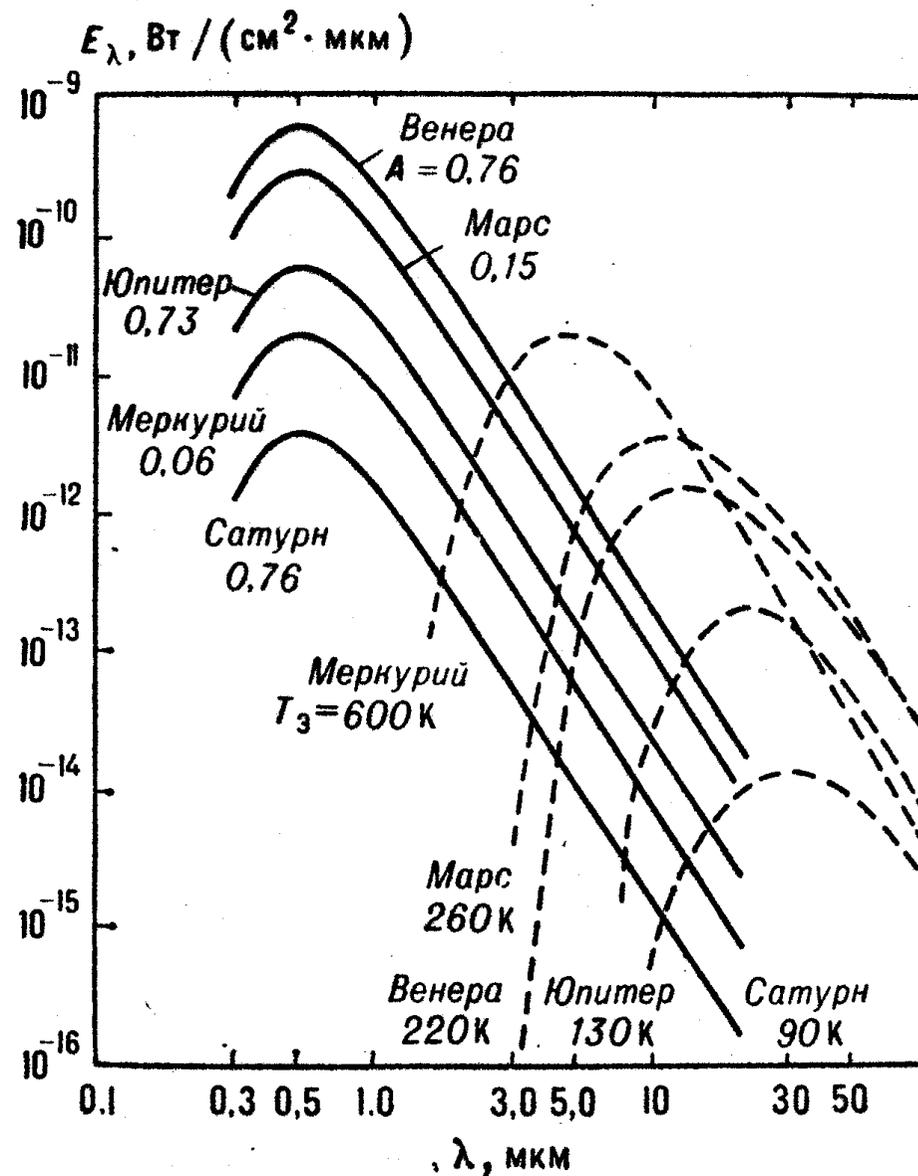


Рис. 3. Схема распределения энергии в спектре излучения планет. Сплошные кривые соответствуют отраженному солнечному излучению, прерывистые — тепловому излучению планет (рядом указаны значения альbedo A планет и эффективной температуры T<sub>e</sub> их поверхности).

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

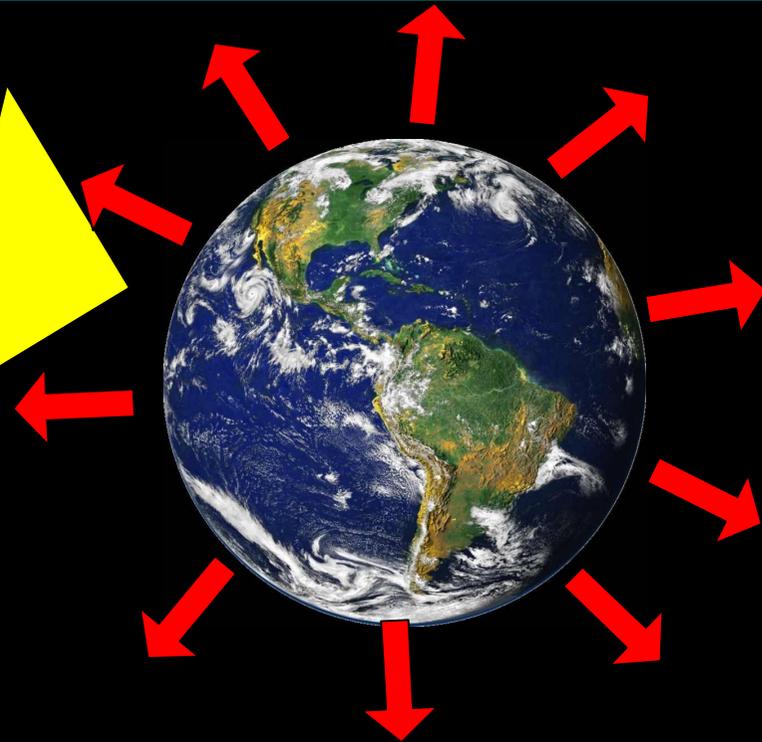
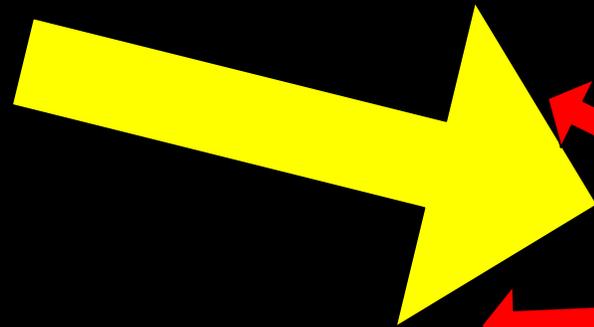
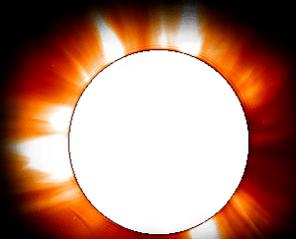
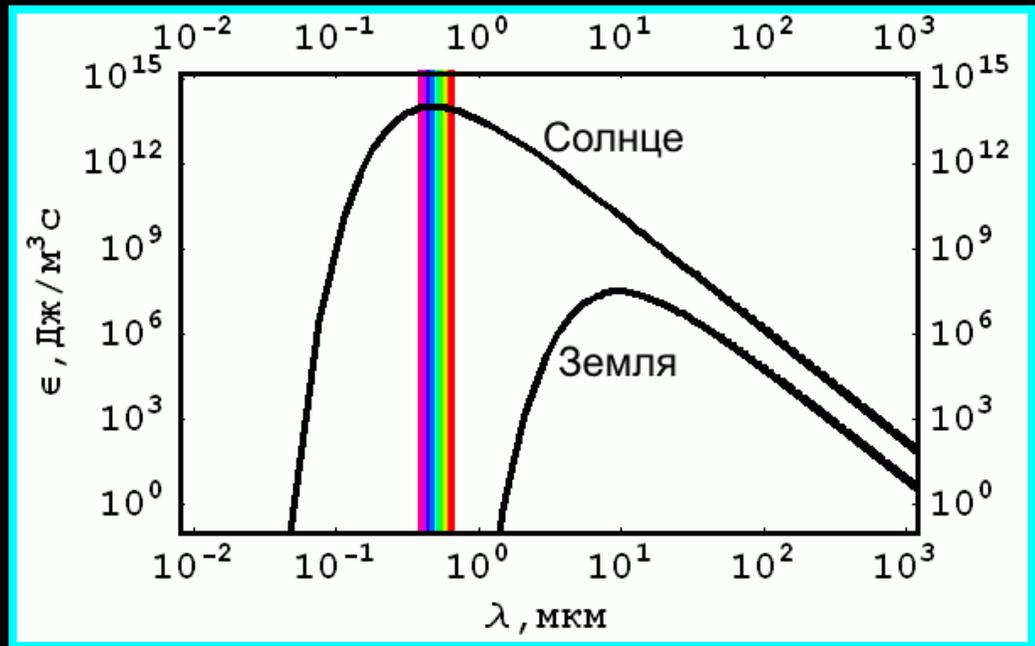
$$A = \Phi / \Phi_0$$

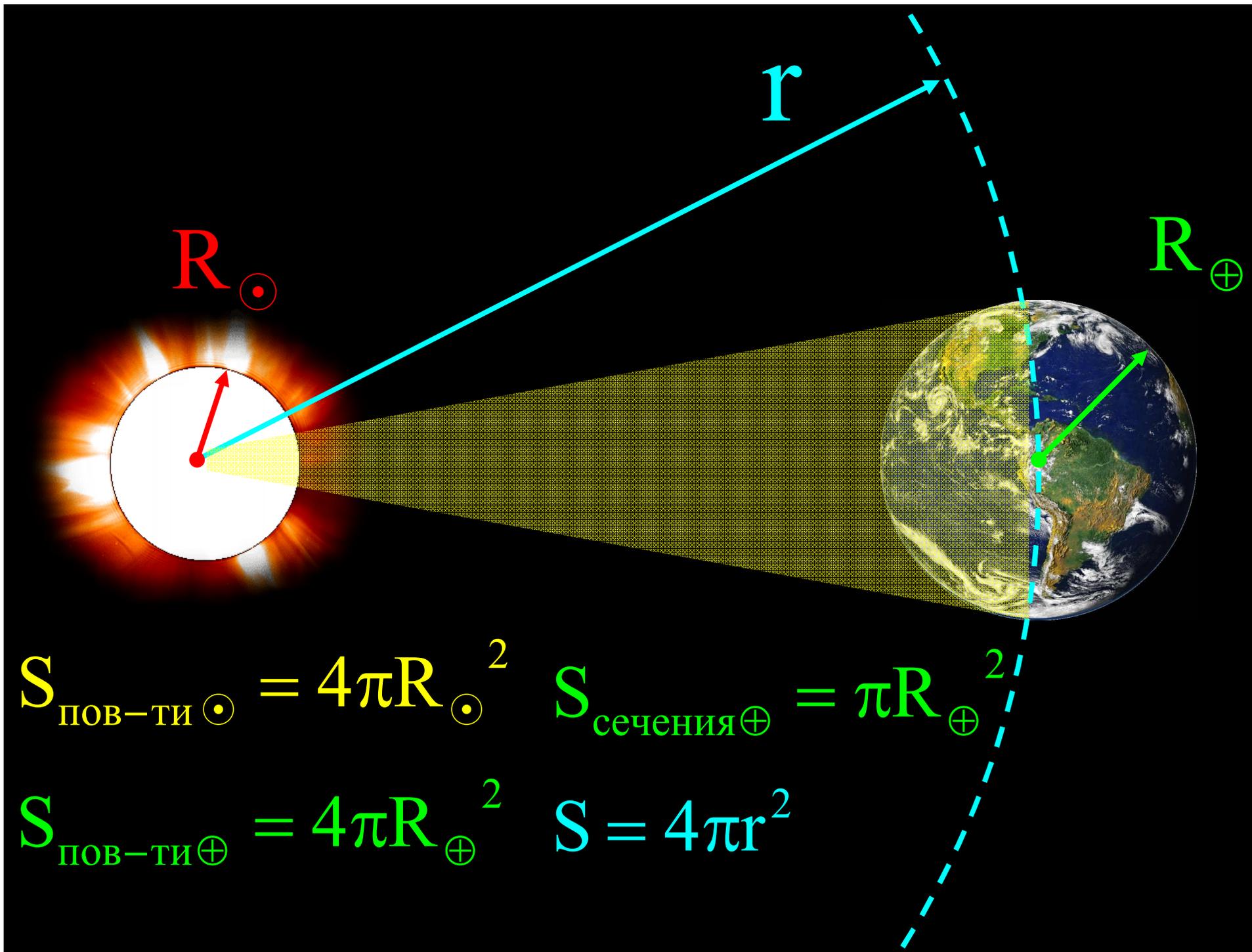
$\Phi_0$  - падающий поток солнечного излучения;

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

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

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





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

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

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

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

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

$$A \approx 0.3$$

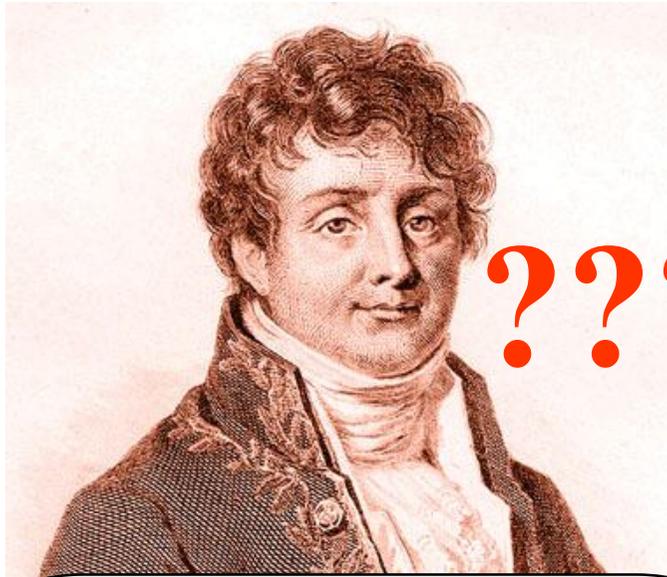
$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2r}} (1 - A)^{1/4} \approx 255 \text{ K} \approx -18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

$$r = 149.6 \cdot 10^9 \text{ м}$$

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

# 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

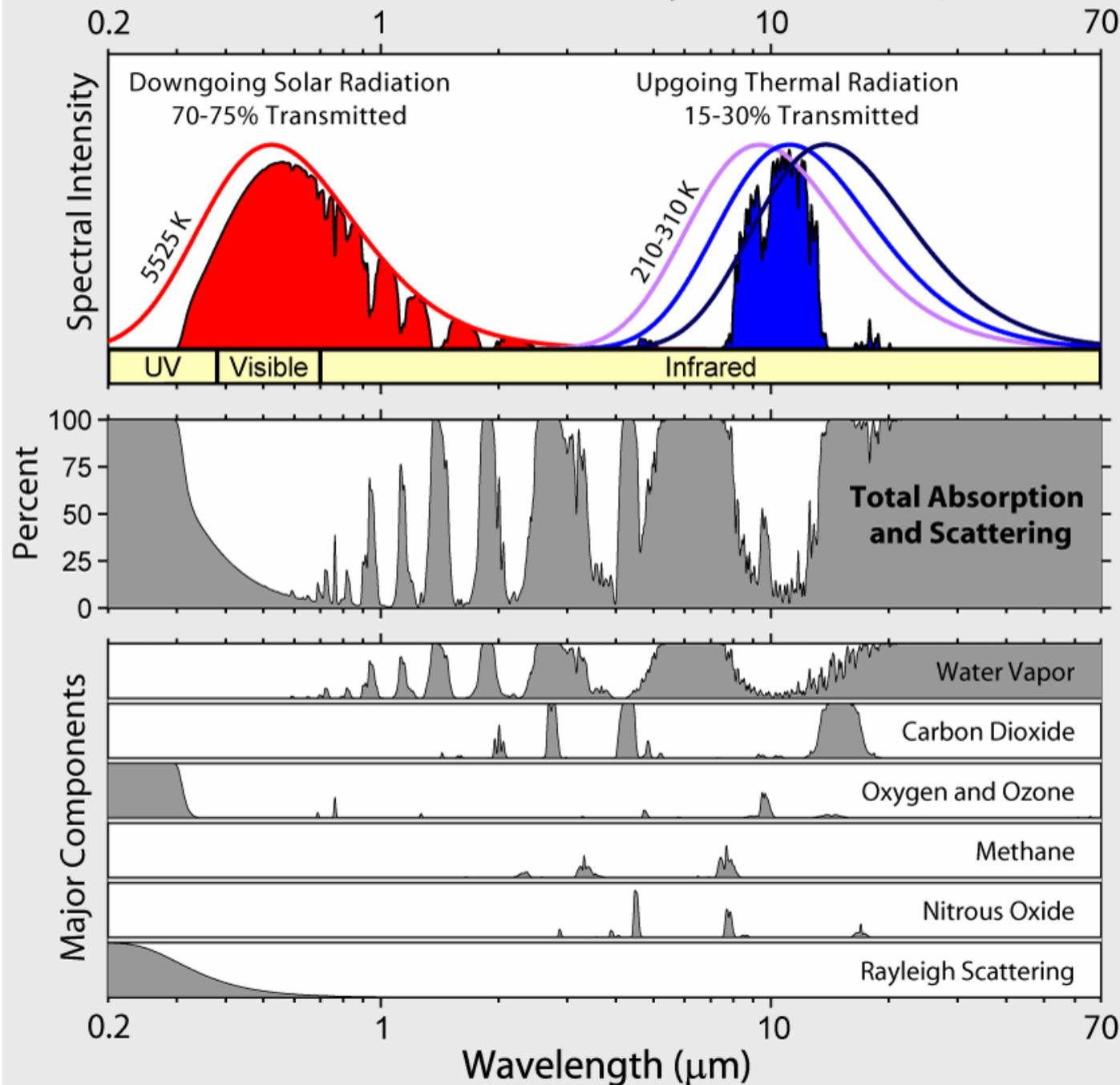
[J. Stefan, 1879; L. Boltzmann, 1884]

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

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

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

# Radiation Transmitted by the Atmosphere



Нормированные  
спектры  
излучения  
Солнца и Земли

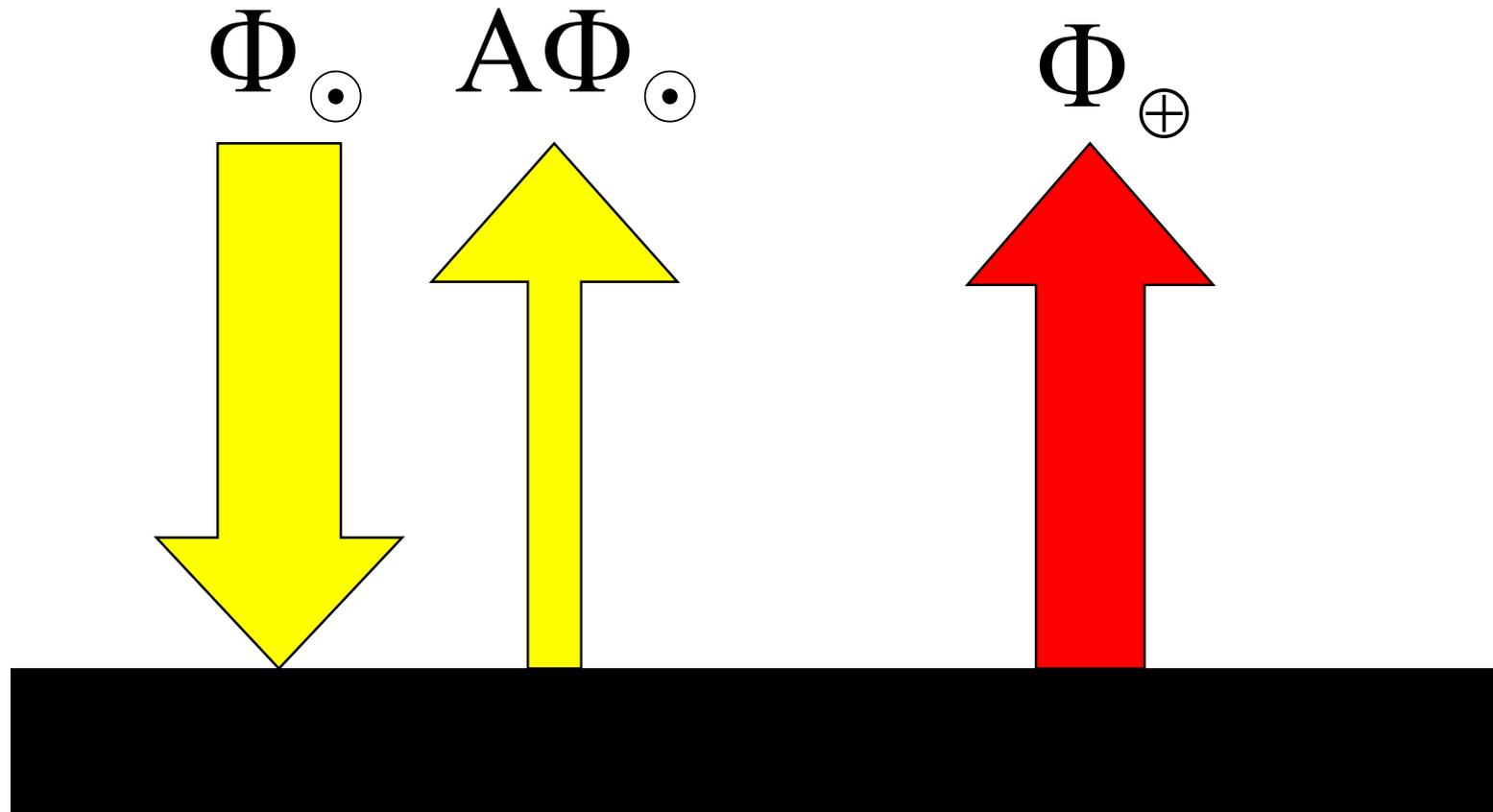
Спектр  
поглощения  
атмосферы

водяной пар  
углекислый газ  
кислород и озон  
метан  
закись азота

# Модель без учета атмосферы

$\sim 0.5$  мкм

$\sim 10$  мкм

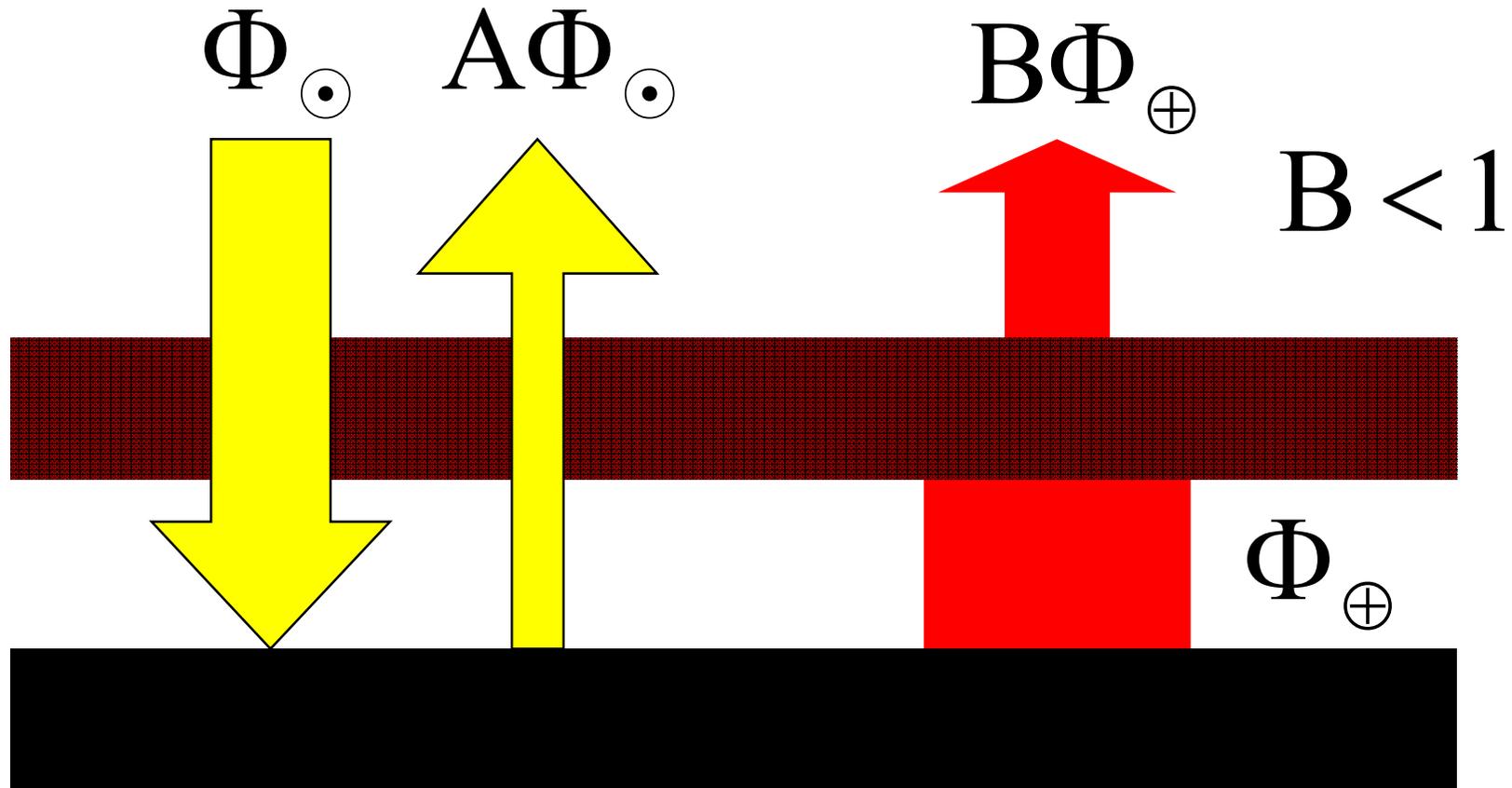


$$\Phi_{\odot} - \Lambda\Phi_{\odot} = \Phi_{\oplus}$$

# Модель с учетом атмосферы

$\sim 0.5 \text{ мкм}$

$\sim 10 \text{ мкм}$



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

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

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

$$B < 1$$

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

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

$$B \approx 0.6$$

$$A \approx 0.3$$

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

$$r = 149.6 \cdot 10^9 \text{ м}$$

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

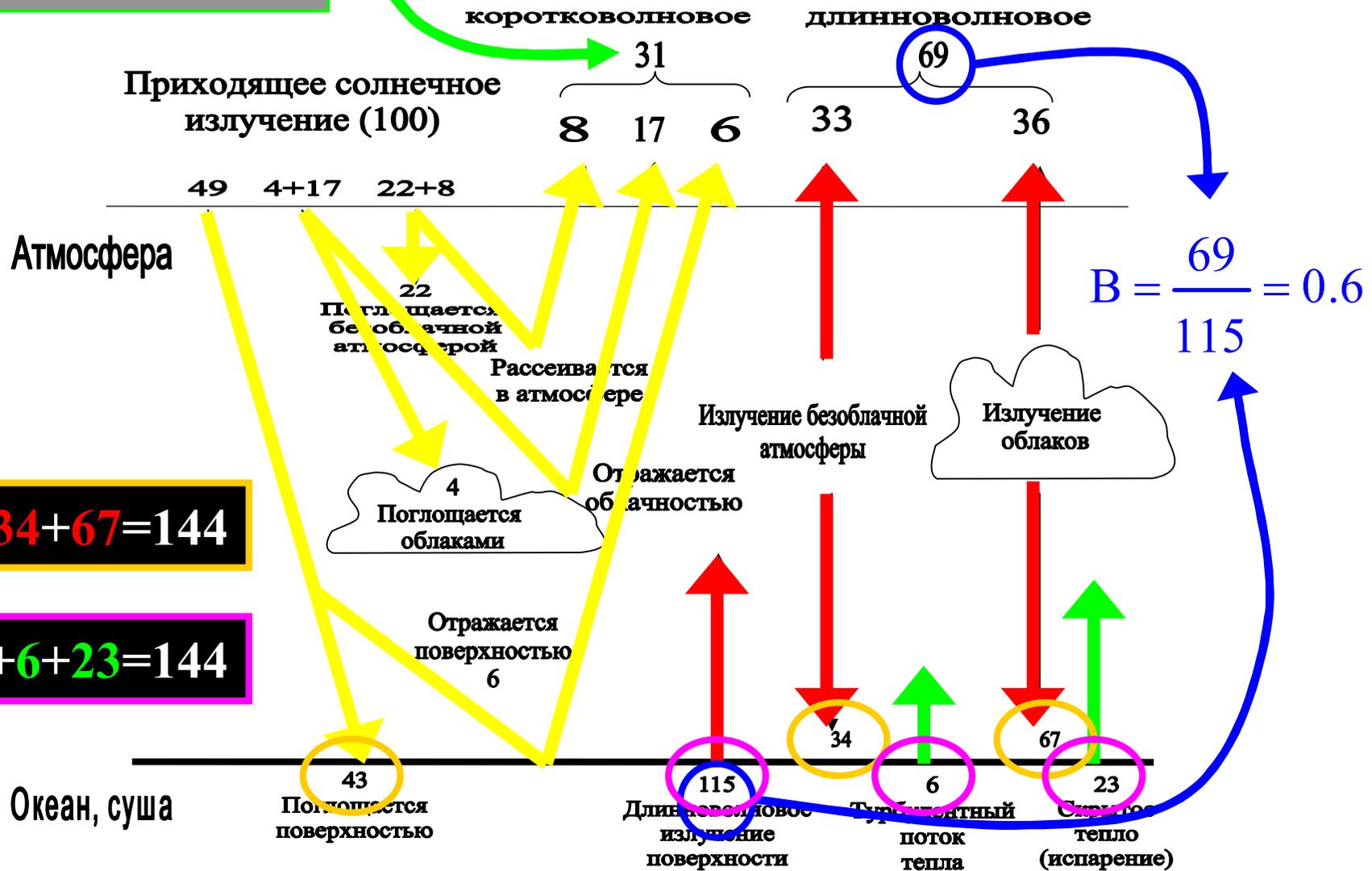
**ВОЗМОЖНОСТЬ ГЛОБАЛЬНОГО  
ОЛЕДЕНЕНИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ**

# Радиационно-тепловой баланс атмосферы

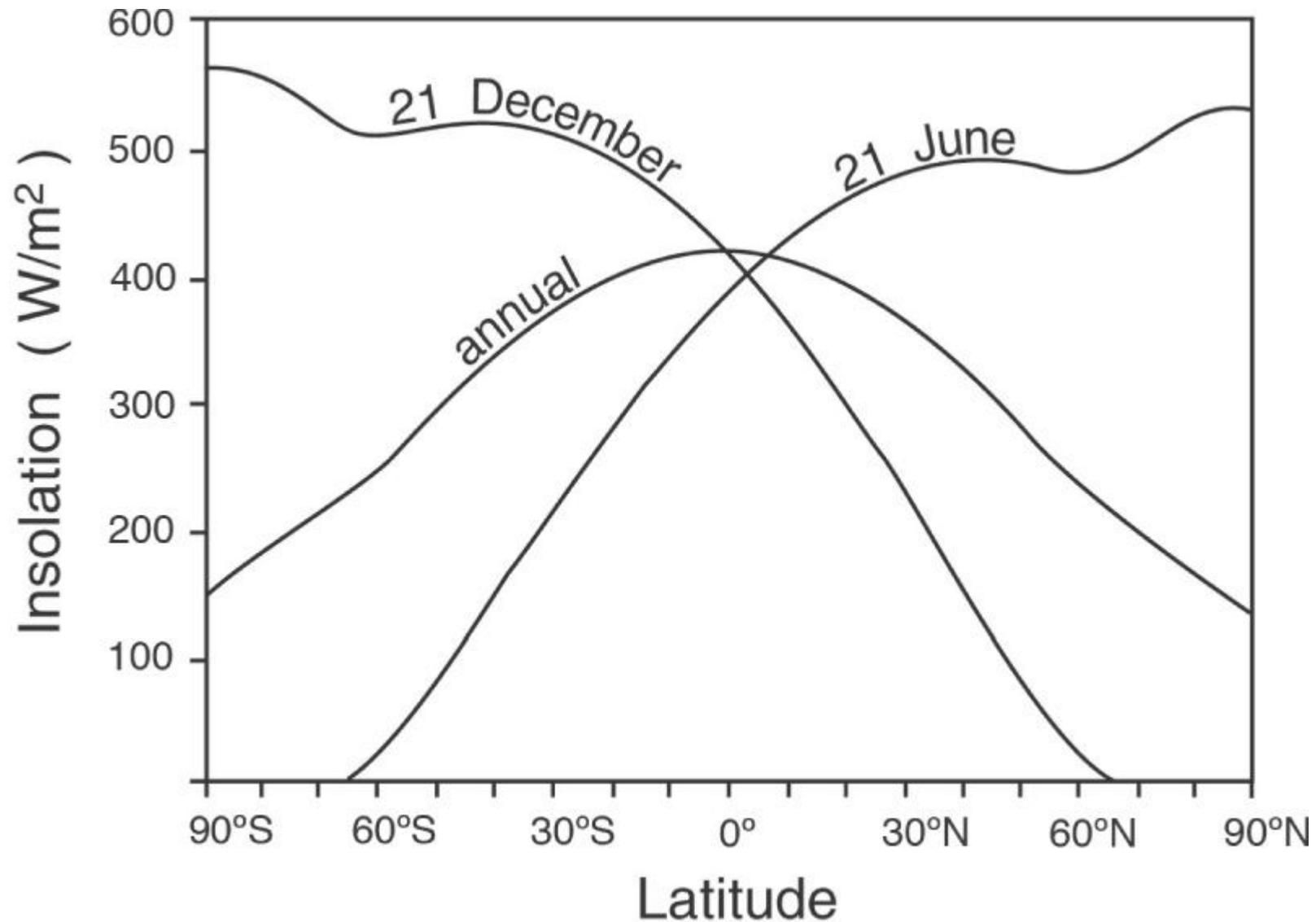
Космос

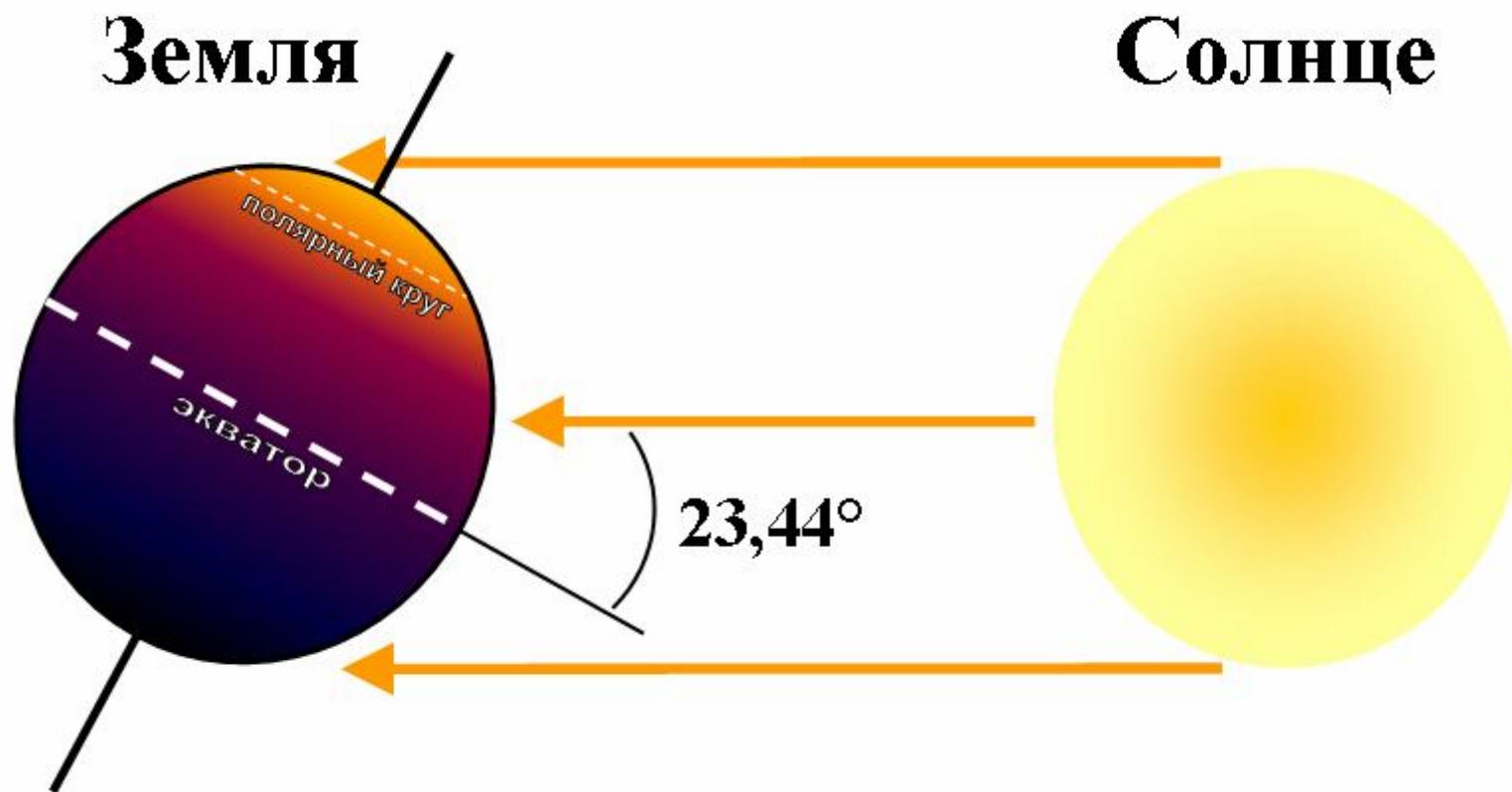
альбеде  $A \sim 0.3$

Уходящее излучение (100)

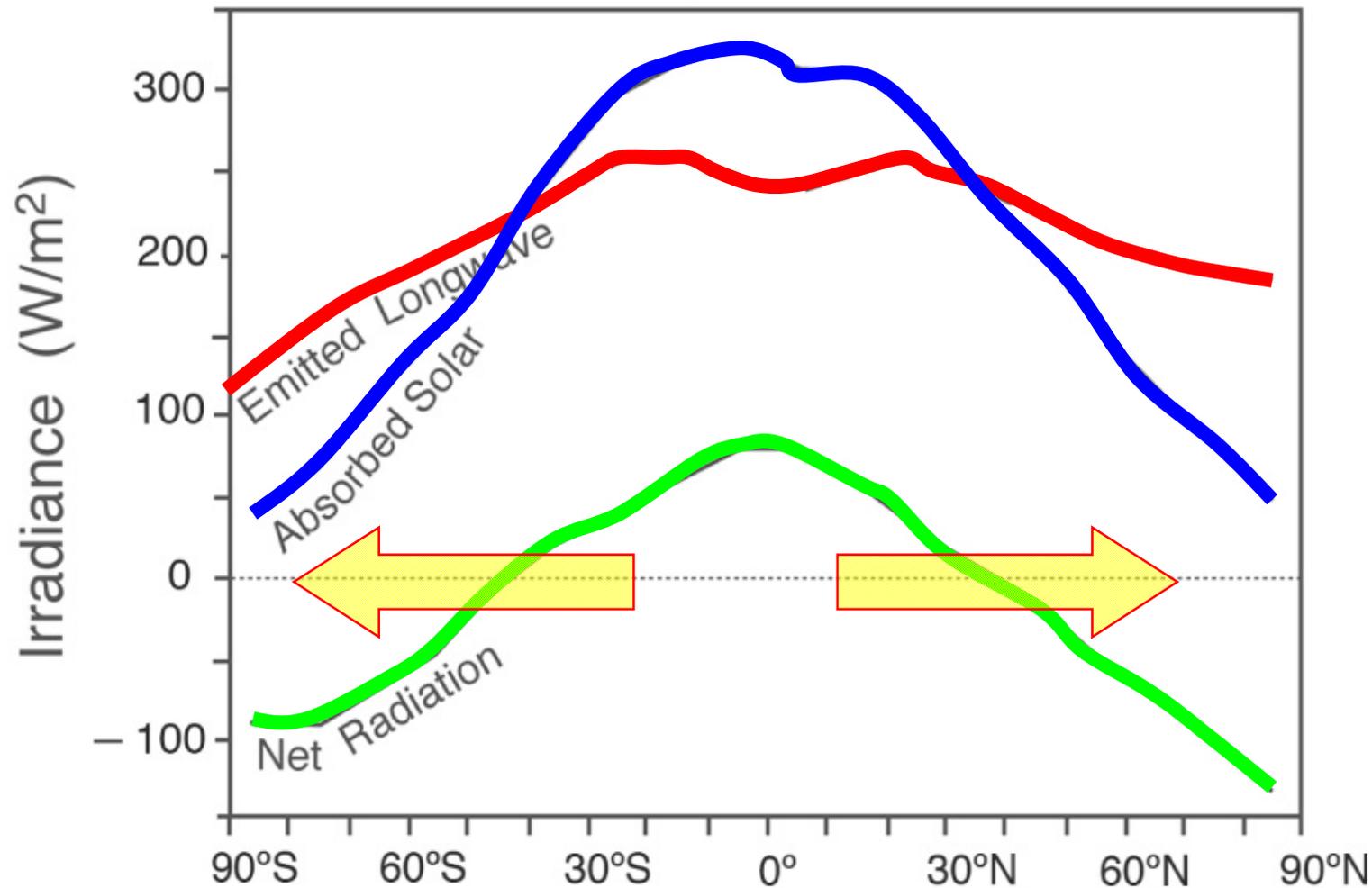


# Широтное распределение инсоляции ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) поверхности Земли





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

