

# **Квантовая оптика**

**ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

**КВАНТОВАЯ ПРИРОДА  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

- **Тепловое излучение** - электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии.



# Основные характеристики теплового излучения

- энергетическая светимость;
- спектральная плотность энергетической светимости (излучательная способность);
- поглощательная способность;
- отражательная способность

# Энергетическая светимость

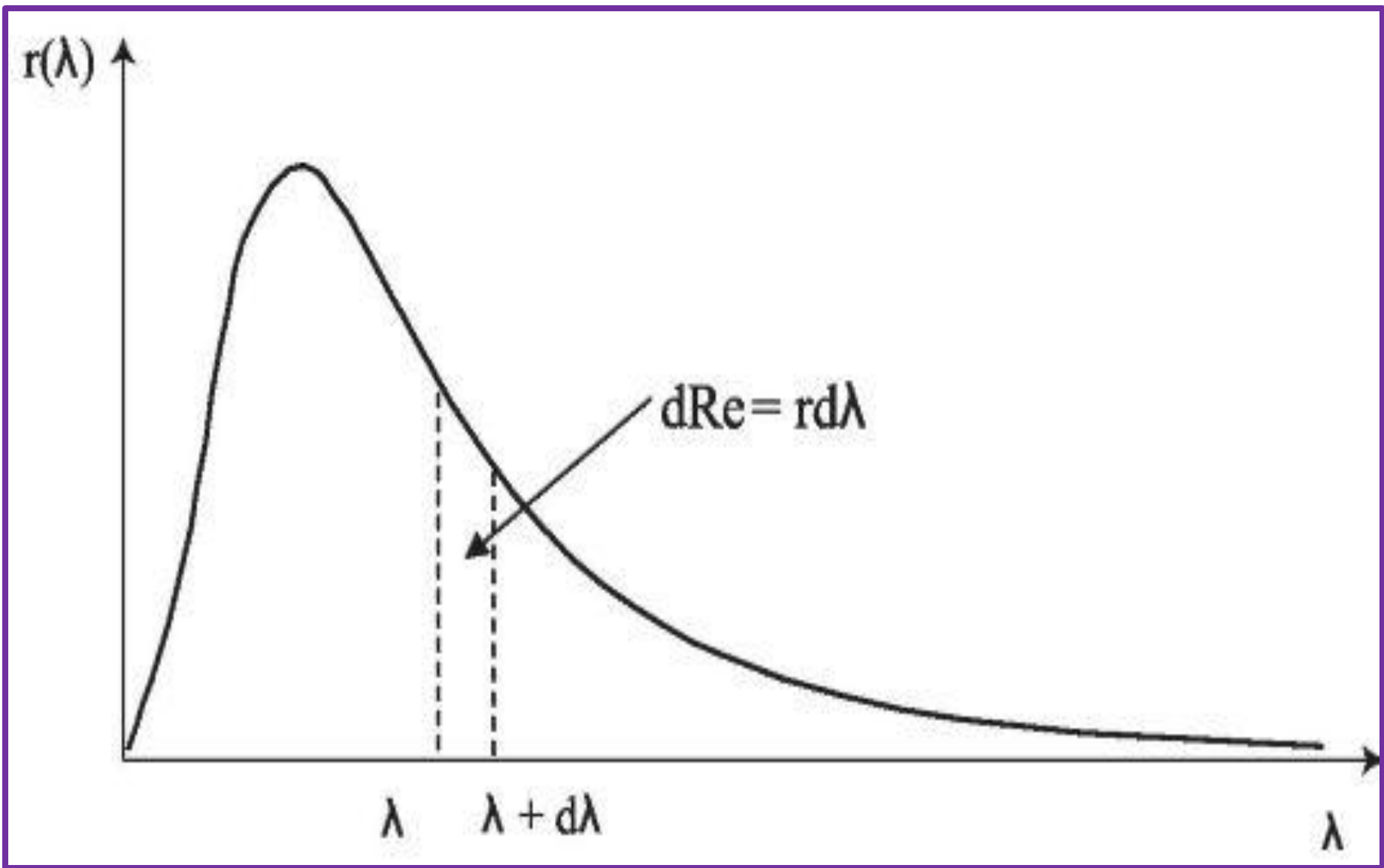
- *Энергетическая светимость* - это энергия, излучаемая единицей площади поверхности тела в единицу времени при температуре  $T$  в интервале длин волн  $0 < \lambda < \infty$

$$R_e = \frac{W}{S \cdot t} = \frac{P}{S}$$

# Излучательная способность

- **Спектральная плотность энергетической светимости (излучательная способность)** - энергия, излучаемая единицей площади в единицу времени в узком интервале длин волн  $d\lambda$ , отнесенная к этому интервалу

$$r_{\lambda, T} = \frac{dR_e}{d\lambda}$$



**Рис. 1.** Спектральная плотность энергетической светимости

Связь между энергетической светимостью и  
спектральной плотностью энергетической  
светимости

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda$$



# Поглощательная способность

- **Поглощательная способность** - отношение потока (или энергии) излучения  $dW_{\text{погл}}$ , поглощаемого в узком спектральном интервале длин волн  $d\lambda$  единицей площади поверхности тела к потоку излучения  $dW_{\text{пад}}$ , падающему на единицу площади поверхности в этом же спектральном интервале

$$\alpha_{\lambda, T} = \frac{dW_{\text{погл.}}}{dW_{\text{пад}}}$$

# Отражательная способность

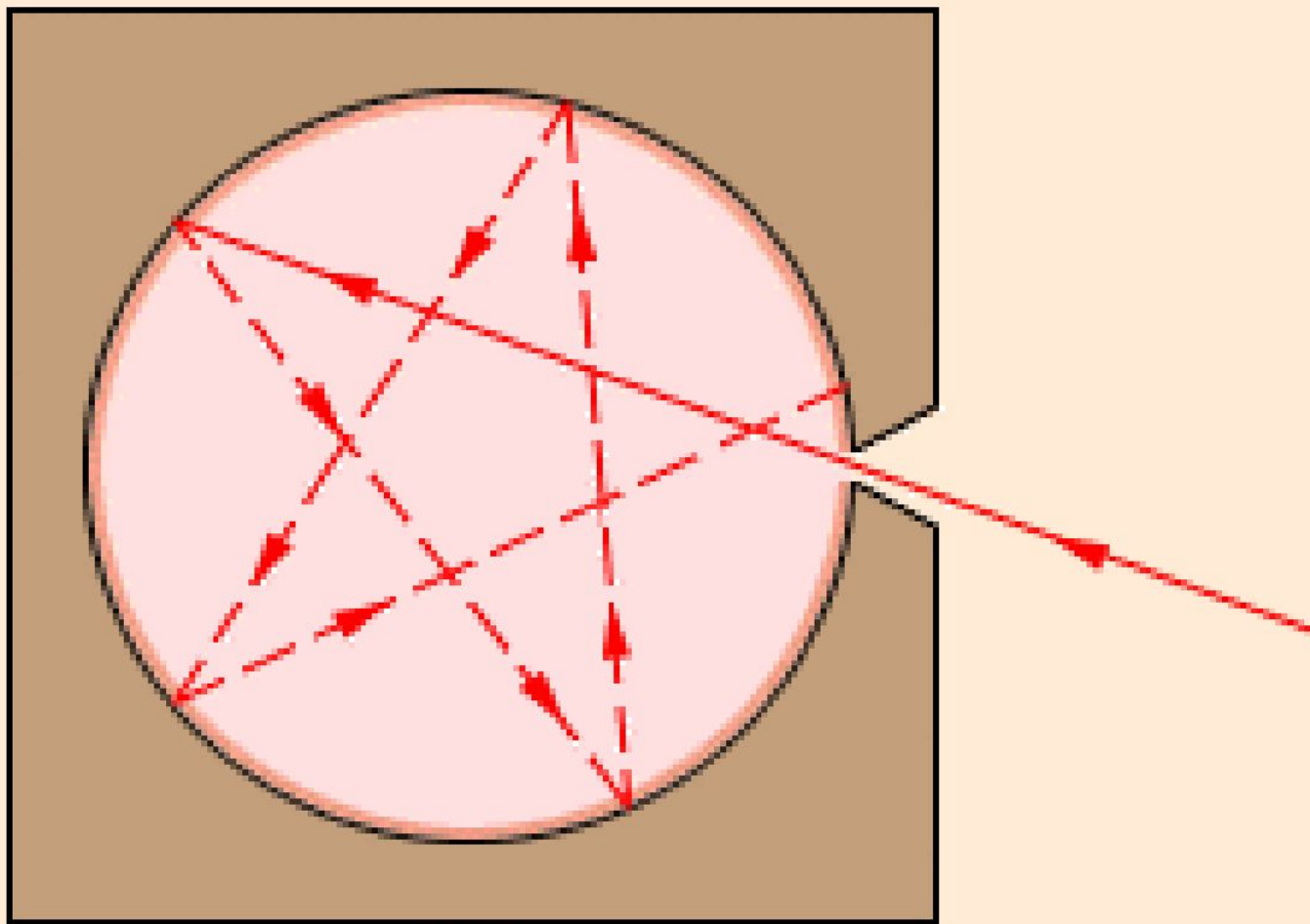
- **Отражательная способность** - часть энергии, которая отражается от единицы площади поверхности.

$$\rho_{\lambda, T} = \frac{dW_{\text{отр.}}}{dW_{\text{над.}}}$$

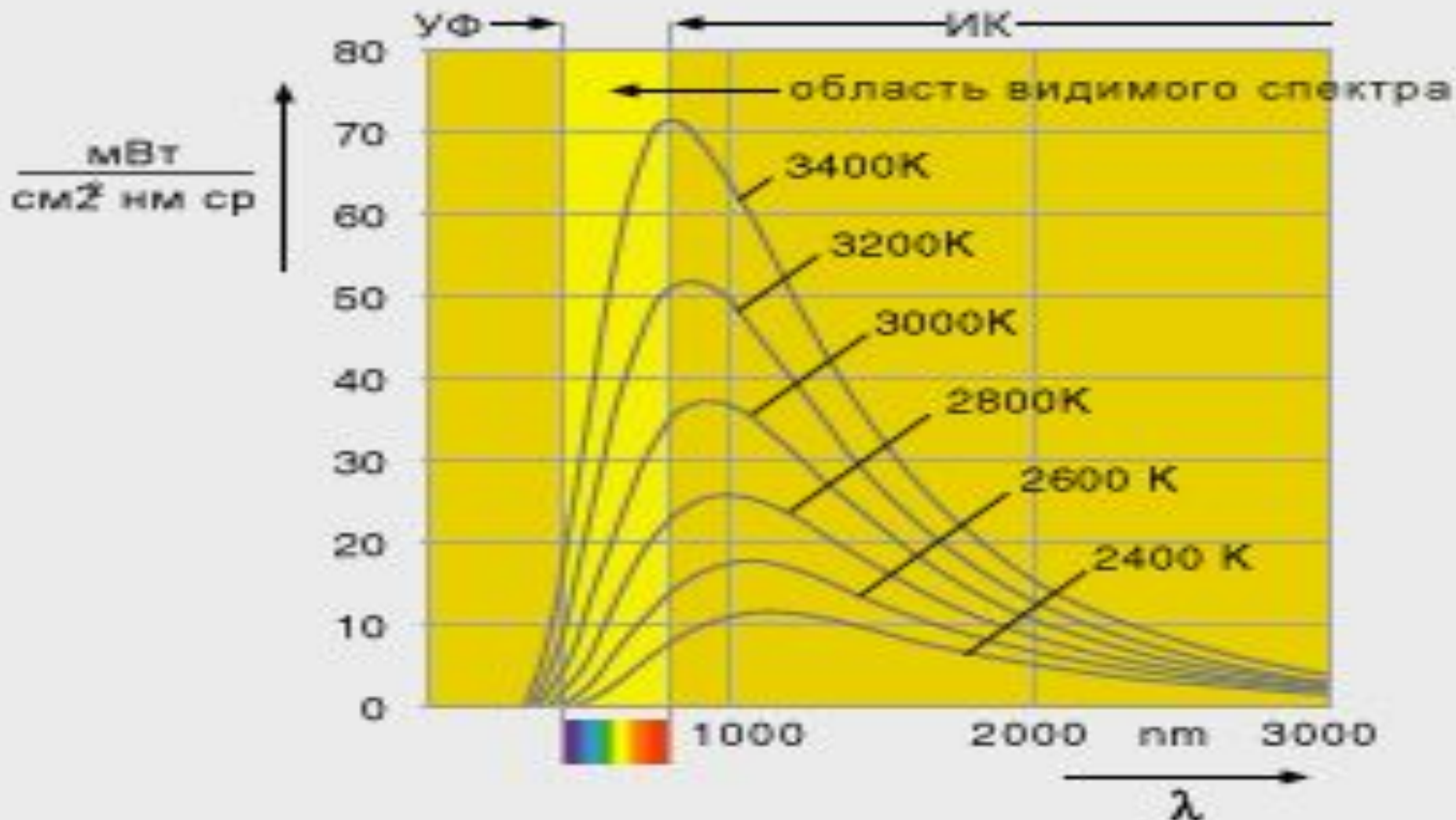
# Абсолютно черное тело (а.ч.т.)

- **Абсолютно черным** называется такое тело, которое при любой температуре, независимо от материала тела и состояния его поверхности, полностью поглощает электромагнитные волны любых частот (длин волн), т.е. все лучи, падающие на тело.
- Для него  $\alpha_{\lambda, T} = 1$ ,  $\rho_{\lambda, T} = 0$ .

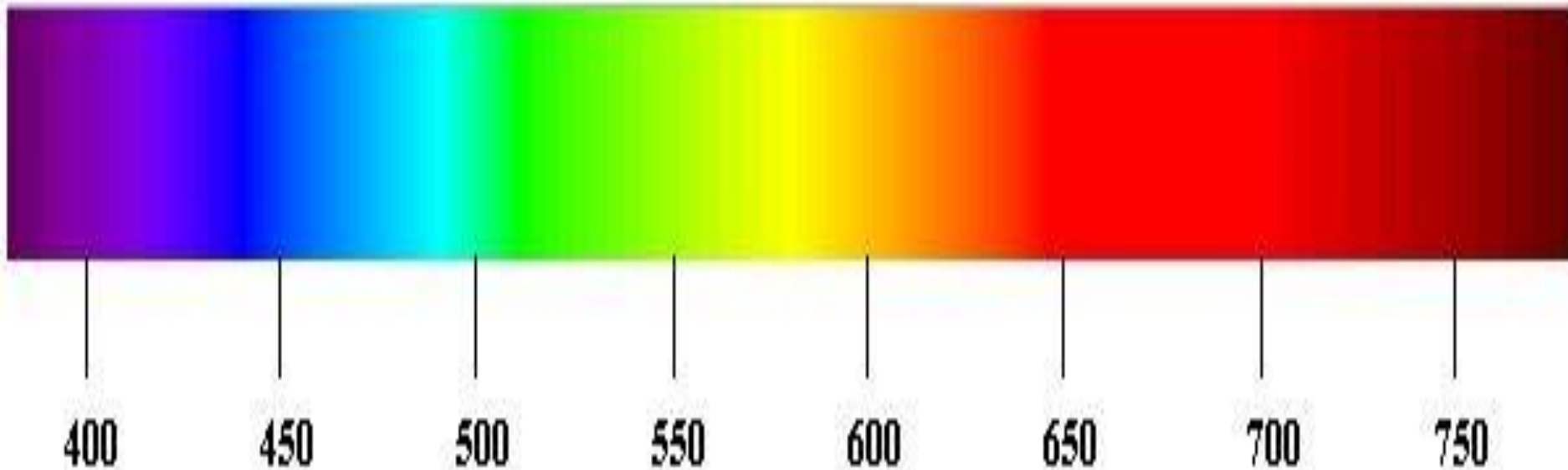
# Модель абсолютно черного тела



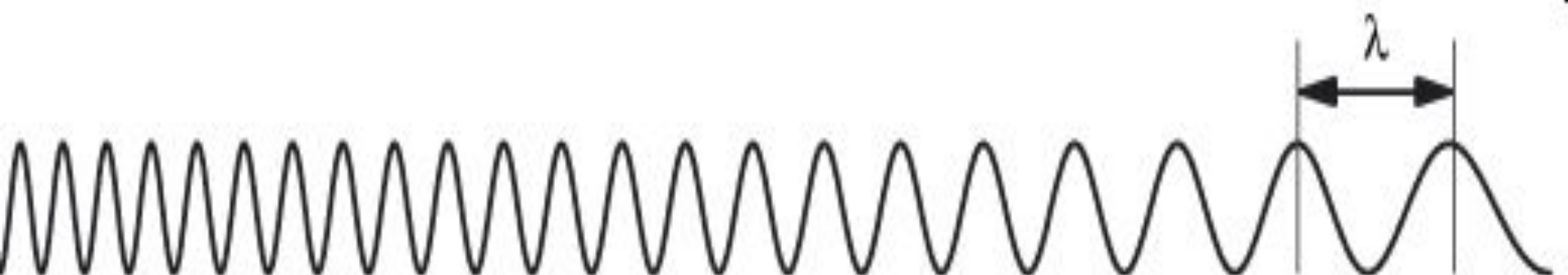
# Распределение энергии в спектре излучения АЧТ



# Спектральный состав белого света



длина волны в нанометрах (нм.) 1 нанометр =  $10^{-9}$  метра



1000K  
2000K  
3000K  
4000K  
5000K  
6000K  
7000K  
8000K  
9000K

# Таблица цветности излучения абсолютно чёрного тела

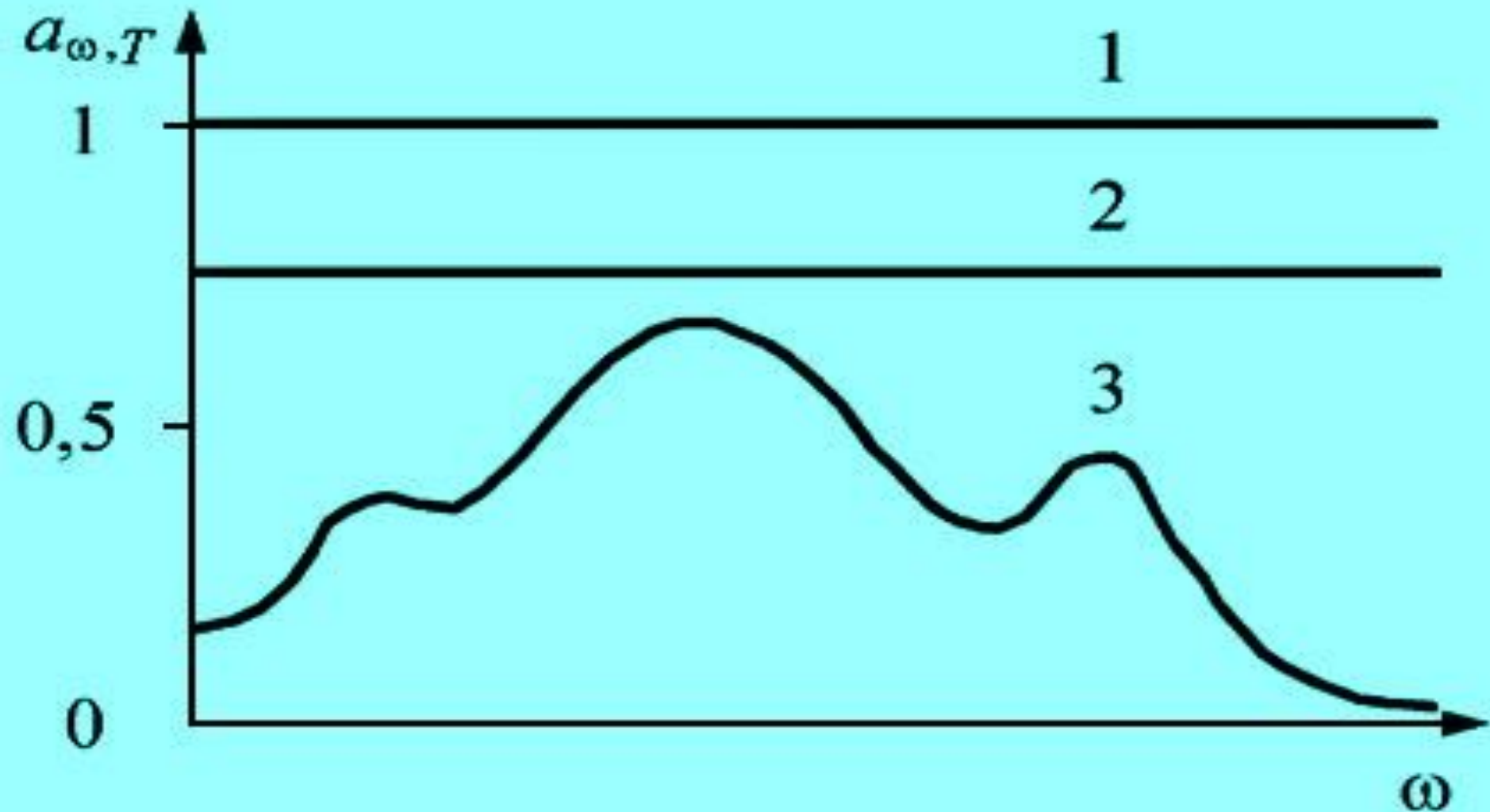
Температурный интервал в <u>Кельвинах</u>	Цвет
до 1000	Красный
1000—1500	Оранжевый
1500—2000	Жёлтый
2000—4000	Бледно-жёлтый
4000—5500	Желтовато-белый
5500—7000	Чисто белый
7000—9000	Голубовато-белый
9000—15000	Бело-голубой
15000— $\infty$	Голубой



# Абсолютно чёрное тело

- Абсолютно чёрное тело при  $T = 100 \text{ К}$  излучает **5,67 ватт** с квадратного метра своей поверхности.
- При температуре **1000 К** мощность излучения увеличивается до **56,7 киловатт** с квадратного метра.

1 - абсолютно черное тело, 2- серое тело, 3- реальное тело



# **ЗАКОНЫ**

# **ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

# Закон Кирхгофа

- Отношение спектральной плотности энергетической светимости к его поглотительной способности не зависит от природы тела; оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры.

$$\frac{r_{\lambda, T}}{\alpha_{\lambda, T}} = r_{\lambda, T}^{a.c.m.}$$

# Закон Стефана – Больцмана

Энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры

$$R^{a.c.m.} = \sigma T^4$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  - постоянная Стефана-Больцмана.

- Для серого тела закон Стефана – Больцмана принимает вид

$$R_e = \delta \cdot T^4$$

$$\delta = \alpha \cdot \sigma$$

# Таблица 1

## Коэффициенты поглощения

Материал	Коэффициент поглощения, $\alpha$	Приведенный коэффициент поглощения $\delta$ , $10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> К <sup>4</sup> )
Хлопчатобумажная ткань	0,73	4,2
Шерсть, шелк	0,76	4,3
Кожа человека	0,90	5,1

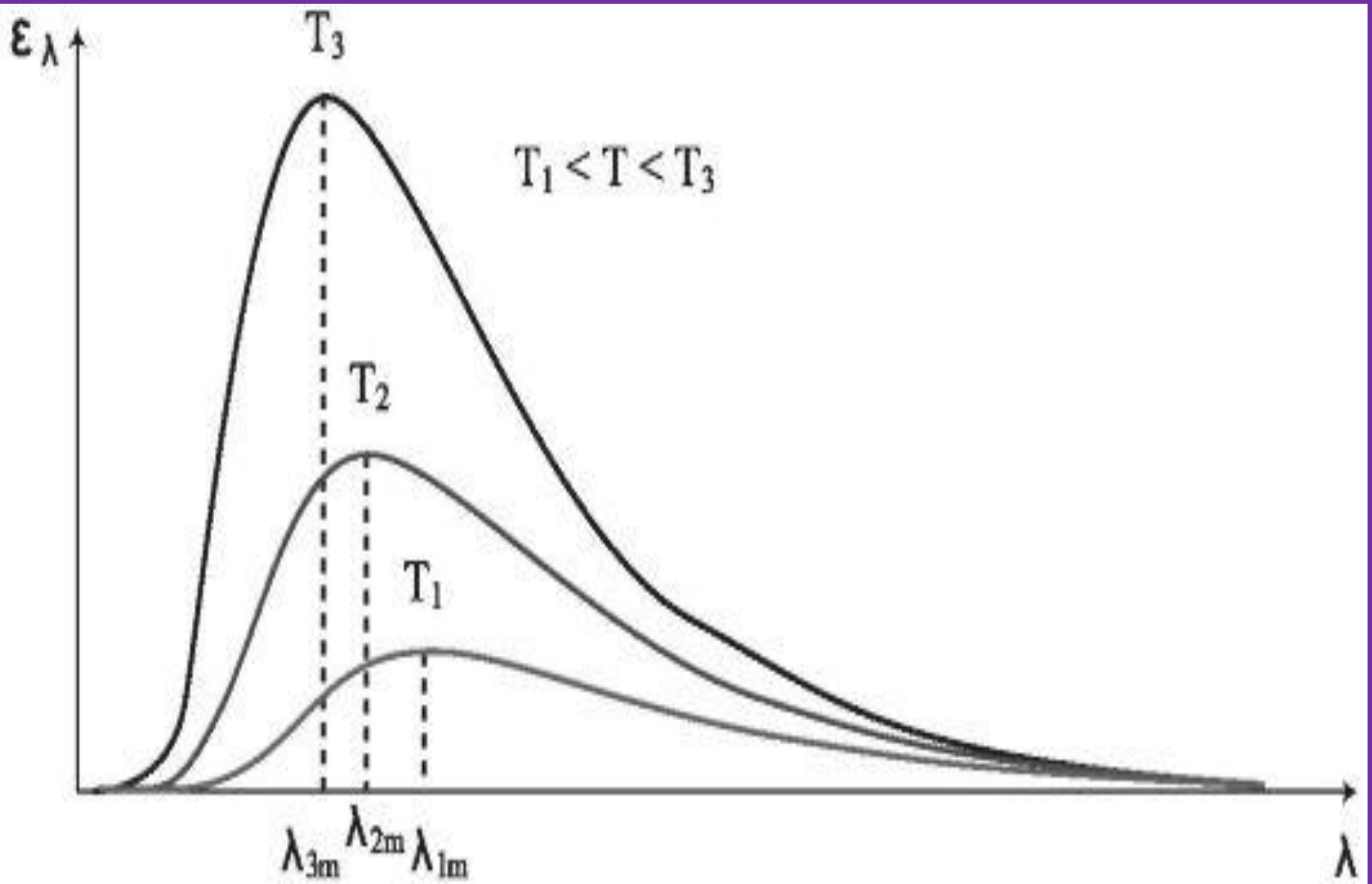
# Закон смещения Вина

- Длина волны  $\lambda$ , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости а.ч.т., обратно пропорциональна его абсолютной температуре, т.е. при повышении температуры максимум спектральной плотности энергетической светимости смещается в сторону коротких длин волн

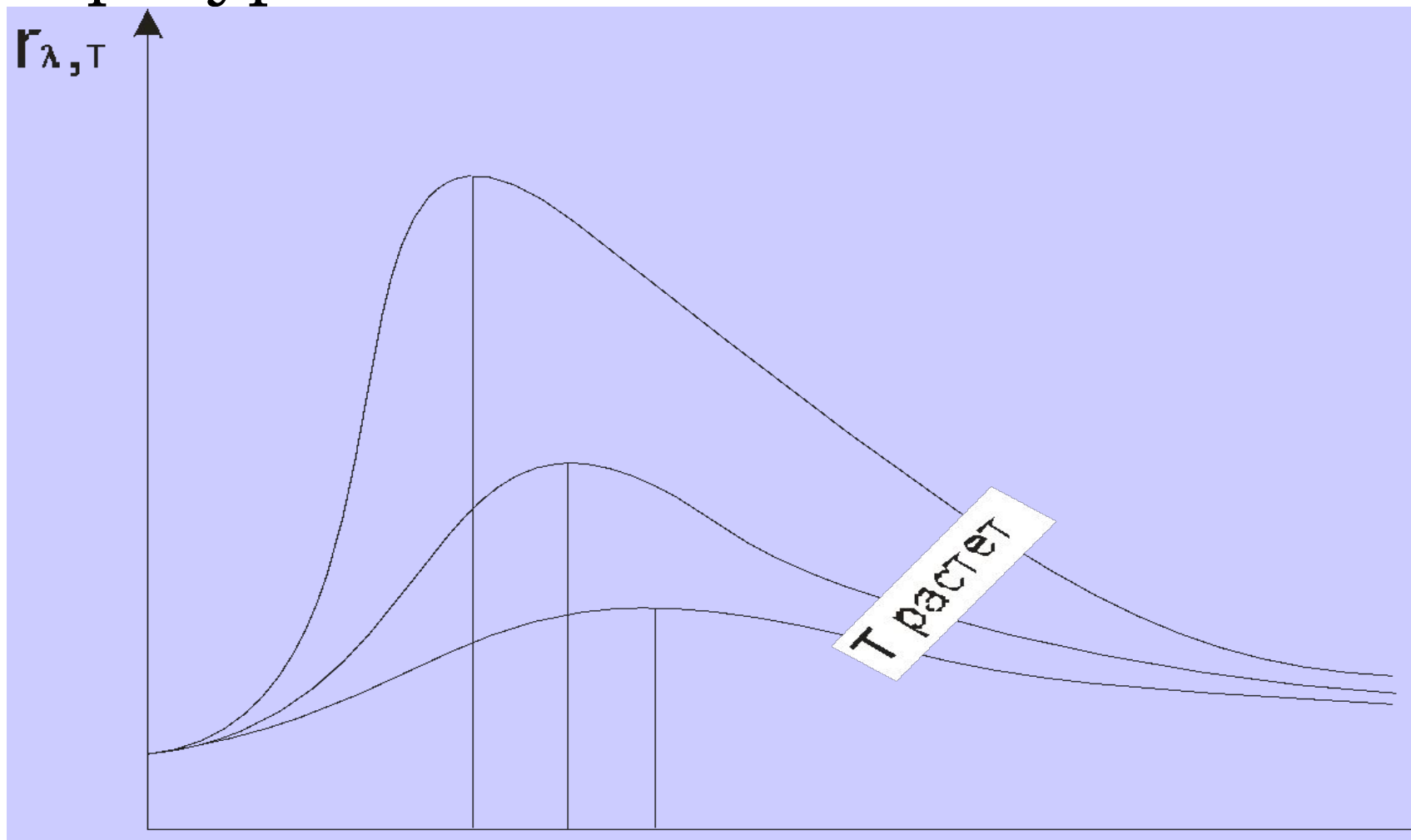
$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

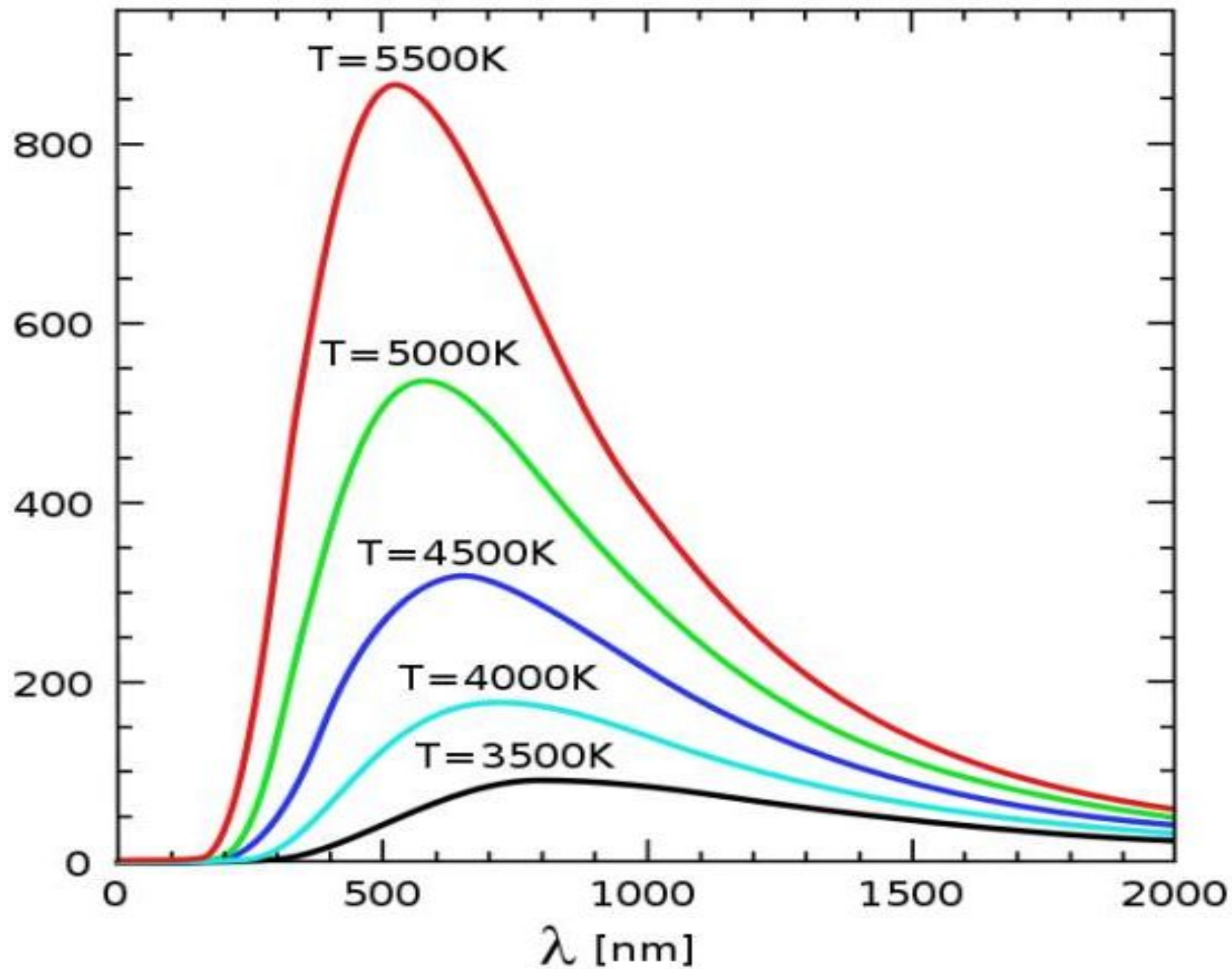
- где  $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  - постоянная Вина.





Экспериментальные кривые зависимости  $r_{\lambda, T}^{a. \text{н.м.}}$  от длины волны при различных температурах





## Таблица 2.

### Цвета нагретых тел

Цвет	Температура, К
Красный, едва видимый	823
Темно-красный	973
Вишнево-красный	1 173
Оранжевый	1 373
Белый	1 673 и выше

# Второй закон Вина

- Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости прямо пропорционально пятой степени абсолютной температуры

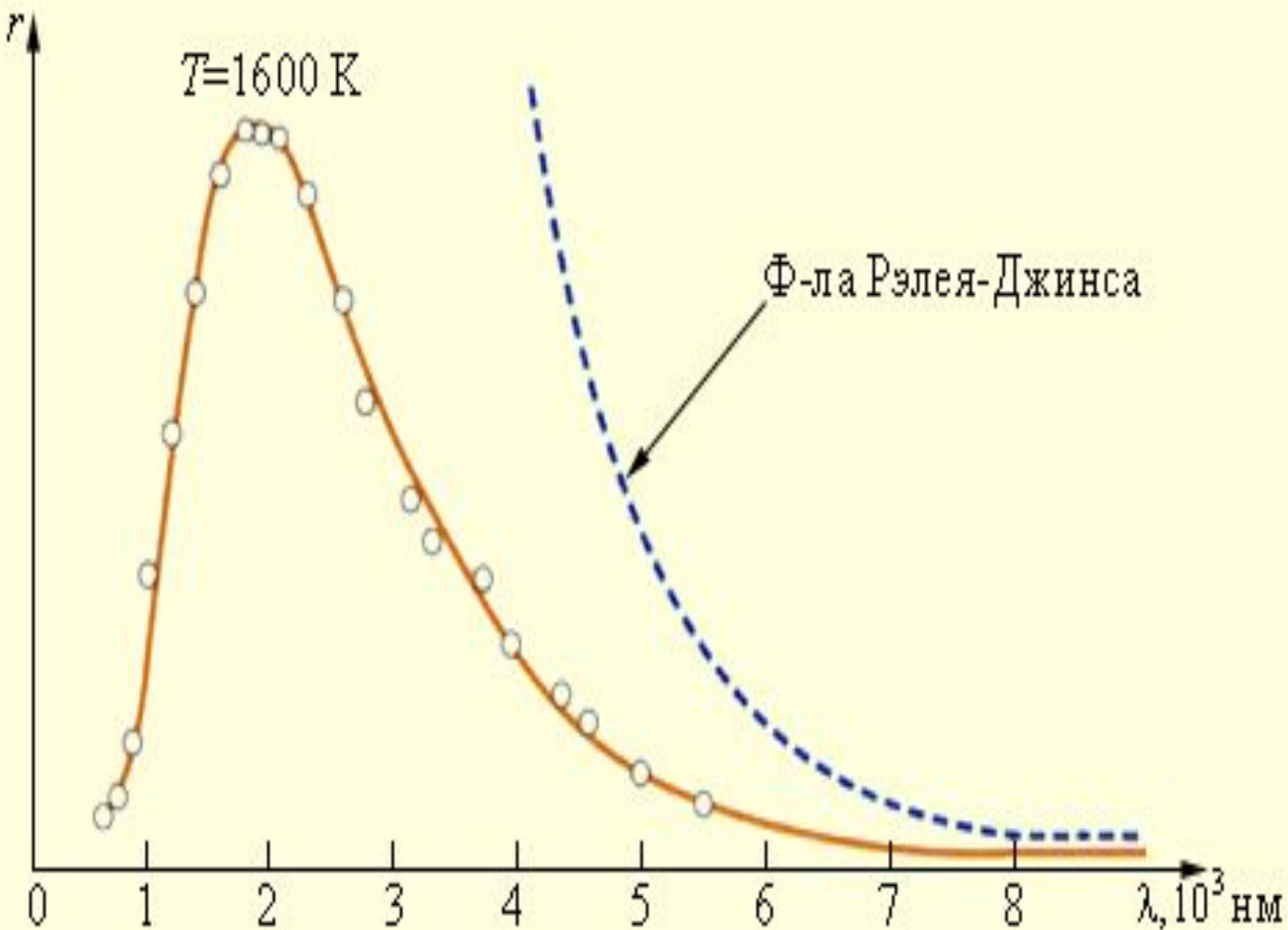
$$(r_{\lambda,T})_{\max} = cT^5$$

- где  $c = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/ (м}^3 \cdot \text{К}^5)$  - постоянная второго закона Вина.

# Формула Рэлея - Джинса

- Попытка строгого теоретического вывода зависимости принадлежит Рэлею и Джинсу, которые применили к объяснению теплового излучения методы классической статистической физики.
- Формула Рэлея-Джинса имеет следующий вид

$$r_{\lambda, T}^{a.c.m.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot c \cdot k \cdot T}{\lambda^4}$$



- Теоретическая кривая Рэлея-Джинса согласуется с экспериментальными данными только в области достаточно больших длин волн. В области малых длин волн теоретическая кривая резко расходится с экспериментальной, а также с законом смещения Вина.
- Таким образом, в рамках классической физики не удалось объяснить законы распределения энергии излучения абсолютно черного тела.



# Формула Планка

- Энергия не может изменяться непрерывно, а **квантуется**, т.е. существует лишь в строго определенных (**дискретных**) порциях. Наименьшая порция энергии называется **квантом энергии**

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

- где  **$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж · с** - постоянная Планка

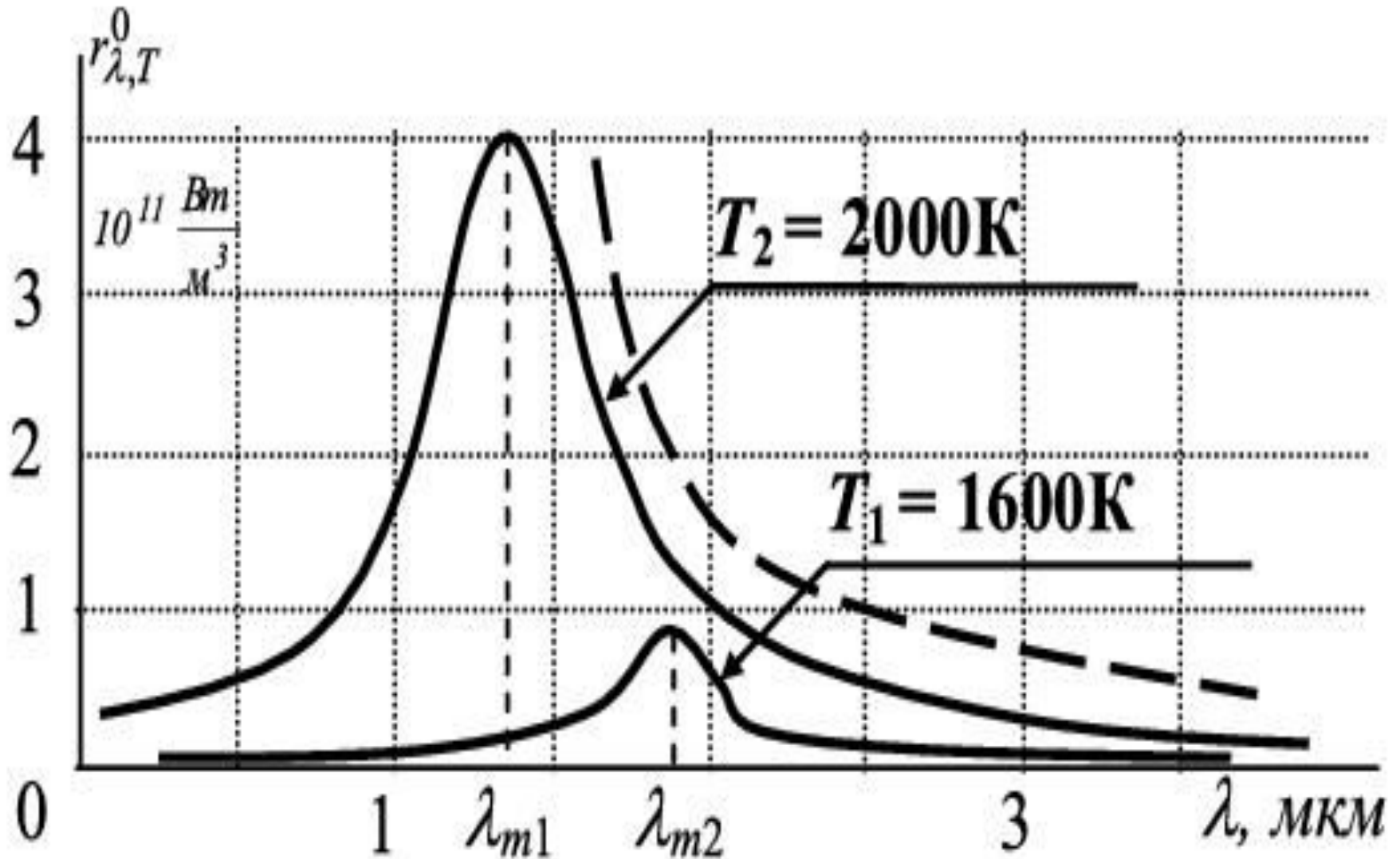
# Формула Планка

- Основываясь на своей гипотезе, Планк вывел формулу, дающую возможность определить функцию  $f(\lambda, T)$

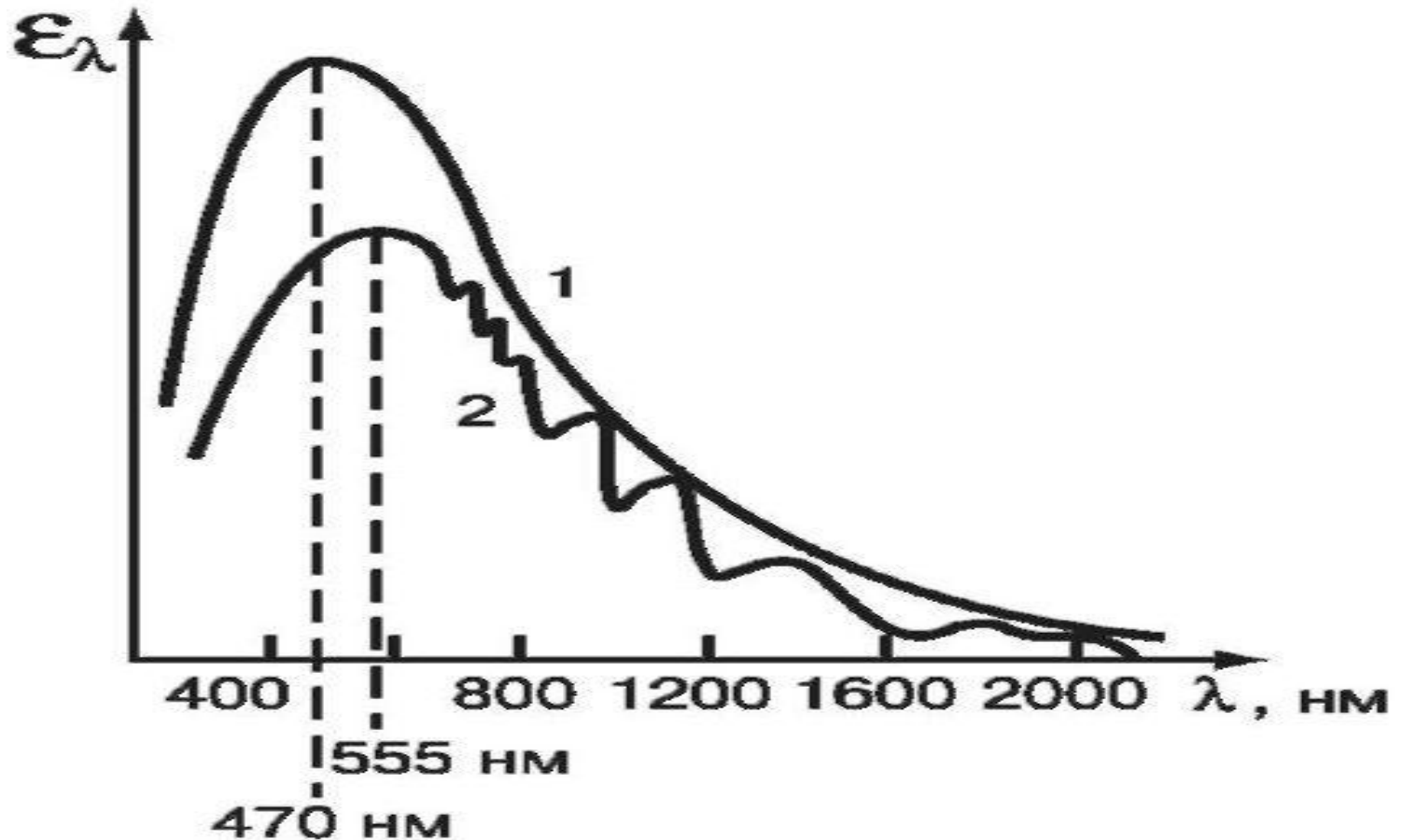
$$f(\lambda, T) = r_{\lambda, T}^{a.c.m.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{h \cdot \nu / k \cdot T} - 1}$$

- Формула Планка не только **хорошо согласуется с экспериментальными данными**, но и содержит в себе частные законы теплового излучения, а также позволяет вычислить постоянные в этих законах.

Для больших длин волн формула Планка переходит в закон Релея - Джинса (штриховая линия)



# Излучение Солнца

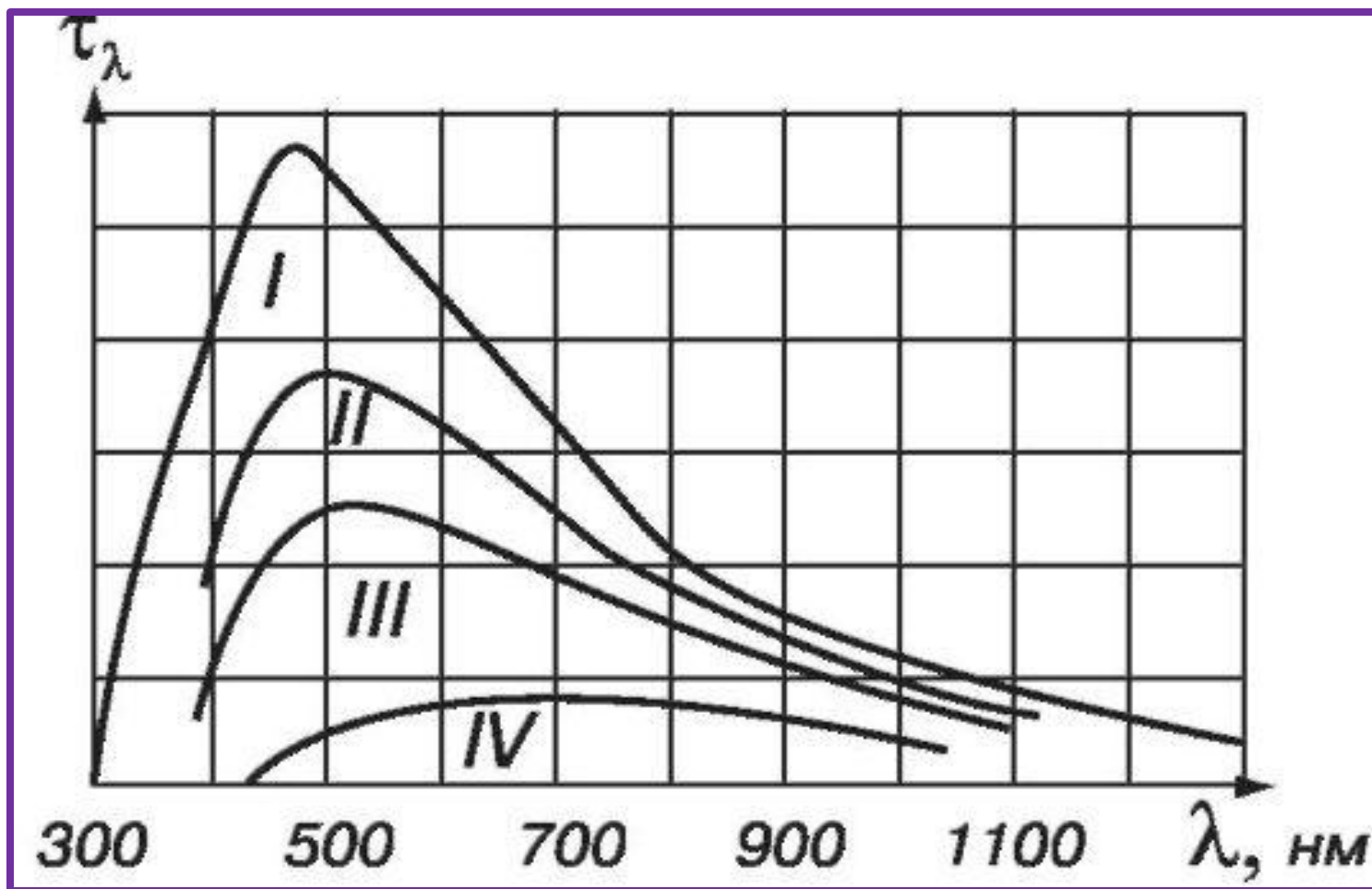


**Рис. .** Спектр солнечного излучения:  
1 - на границе атмосферы, 2 - у поверхности Земли

# Солнечная постоянная

*Солнечная постоянная* – полный поток лучистой энергии Солнца, падающий вне атмосферы Земли на площадку единичной площади, расположенную перпендикулярно солнечным лучам:

$$I = 1370 \text{ Вт/м}^2.$$



**Рис.** Распределение энергии в спектре Солнца при различных высотах над горизонтом

# Физические основы термографии

- **Термография** - диагностический метод, основанный на измерении и регистрации теплового излучения поверхности тела человека или его отдельных участков.

$$P = S\delta(T_1^4 - T_0^4)$$

# Пример

- Рассчитаем мощность излучательных потерь раздетого человека при температуре окружающей среды  $18^{\circ}\text{C}$  ( $291\text{ K}$ ).
- Примем: площадь поверхности тела  $S = 1,5\text{ м}^2$ ; температура кожи  $T_1 = 306\text{ K}$  ( $33^{\circ}\text{C}$ ). Приведенный коэффициент поглощения кожи  $\delta = 5,1 \cdot 10^{-8}\text{ Вт/м}^2\text{K}^4$ .
- Подставив эти значения в формулу

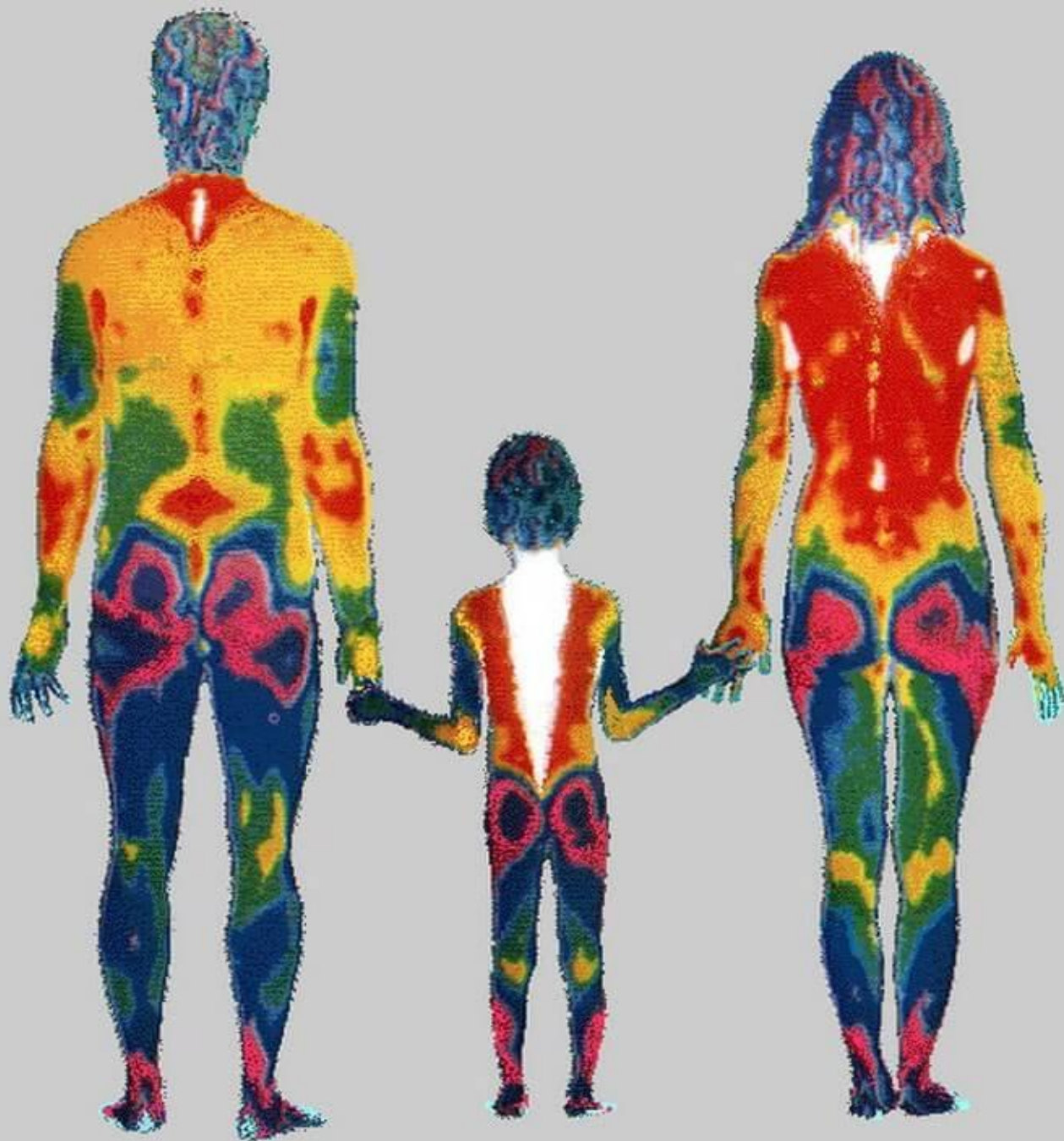
$$P = S\delta(T_1^4 - T_0^4)$$

- $P \approx 122\text{ Вт}$ .



# Термография





$^{\circ}\text{C}$

>34

33

32

31

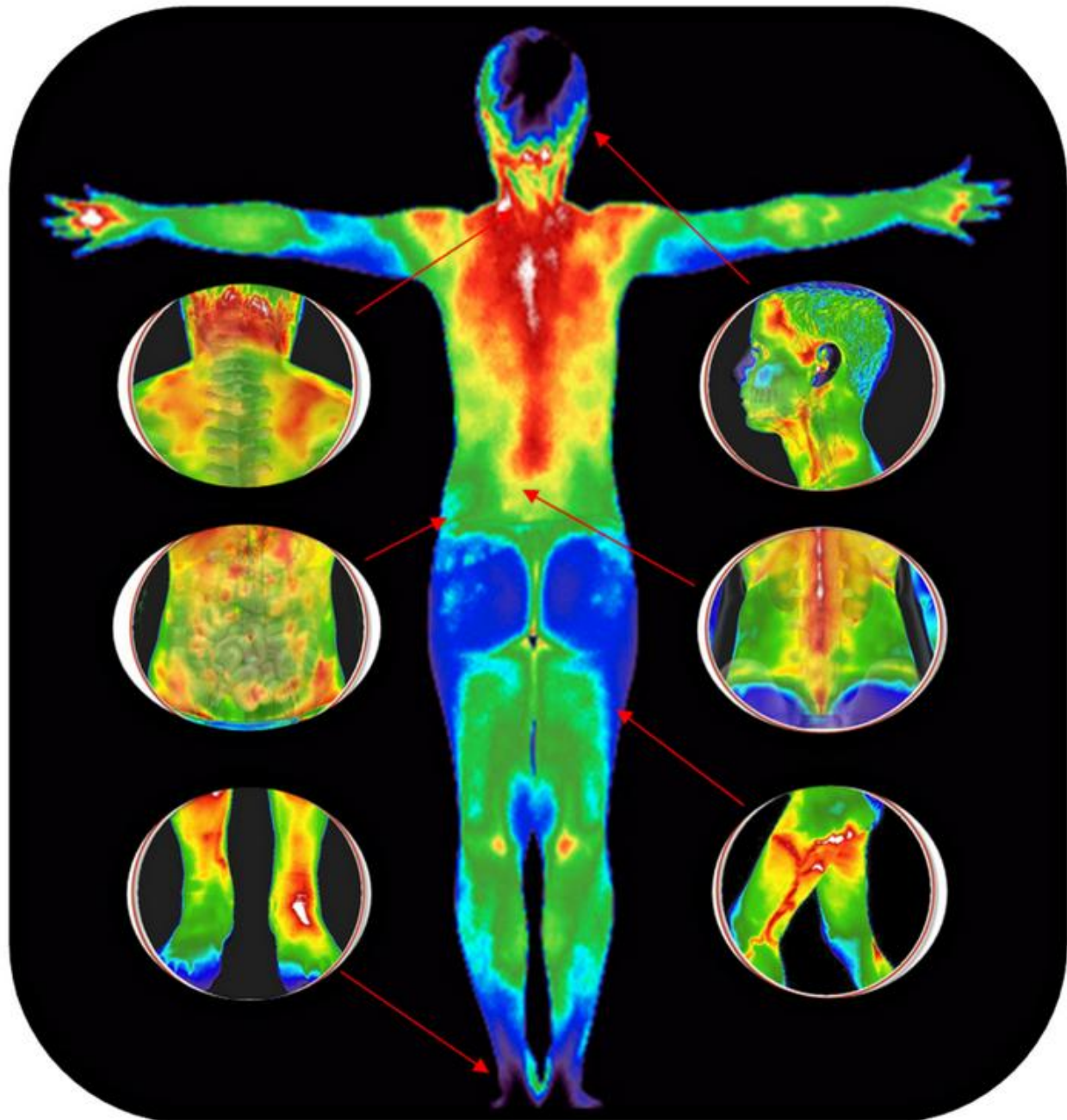
30

29

28

27

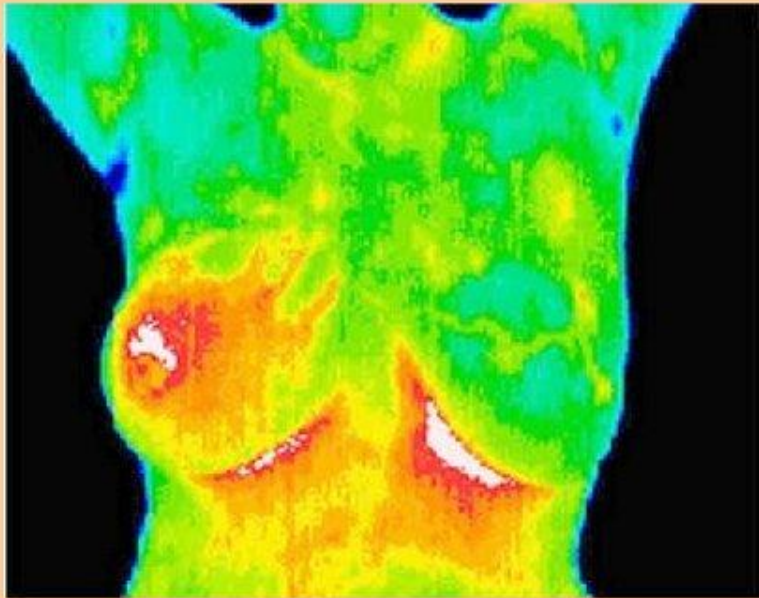
22<26





# ТЕРМОГРАФИЯ

Температура различных участков тела может изменяться: увеличиваться (например, при воспалении, опухолях) или уменьшаться (например, ниже места закупорки сосудов). Это будет вызвать изменение потока излучения с исследуемой области тела.



В термографии часто важна не абсолютная температура того или иного участка тела, а температурная асимметрия симметричных областей тела.

Термография позволяет определить опухоли размером 1-2 мм в таких трудно диагностируемых традиционными способами органах, как щитовидная железа, молочная железа и т.д.

Интересным походом в термографии служит исследование температурных полей поверхности тела, рефлекторно связанных с теми или иными внутренними органами (термография зон Захарьина-Геда). Изменение температуры соответствующих участков кожи могут указывать на нарушения функции органов.

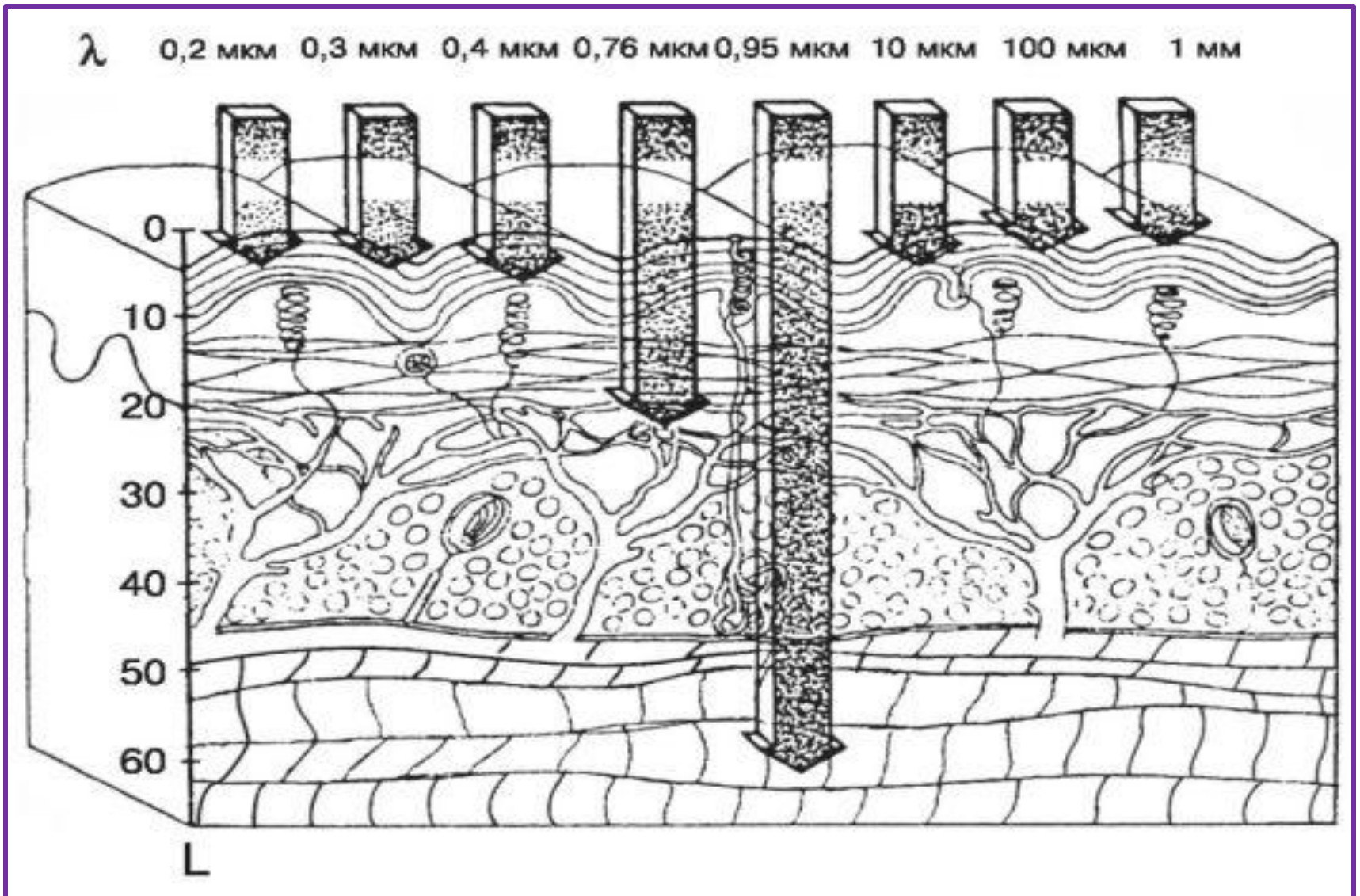
# Светолечение.

## Лечебное применение ультрафиолета

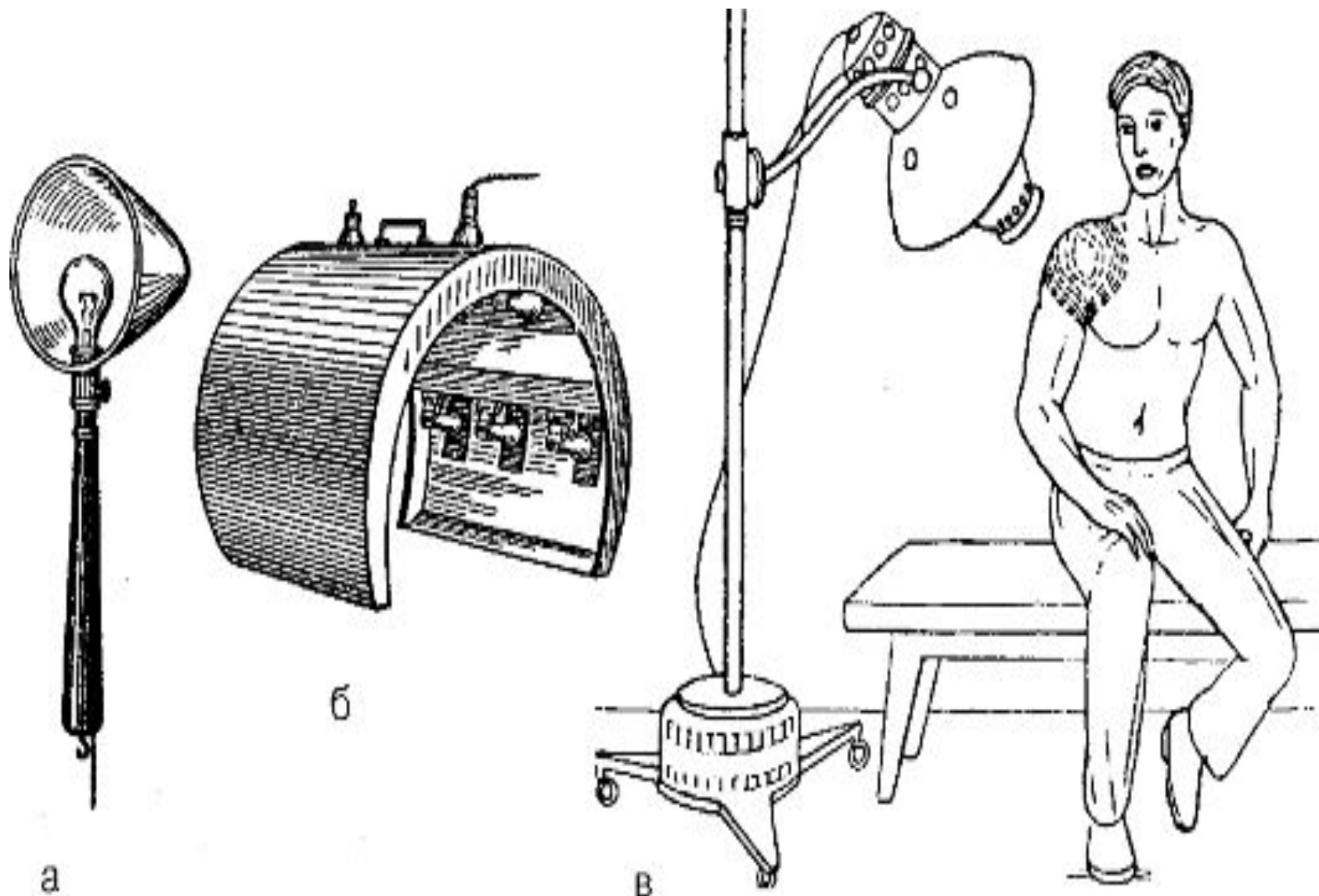
- Светолечением называют применение в лечебных целях инфракрасного и видимого излучений.

Вид излучения	Границы, мкм	
Инфракрасное излучение	1 000	0,76
Видимый свет	0,76	0,4
Ультрафиолетовое излучение	0,4	0,01





**Рис.** Глубина проникновения излучения в кожу

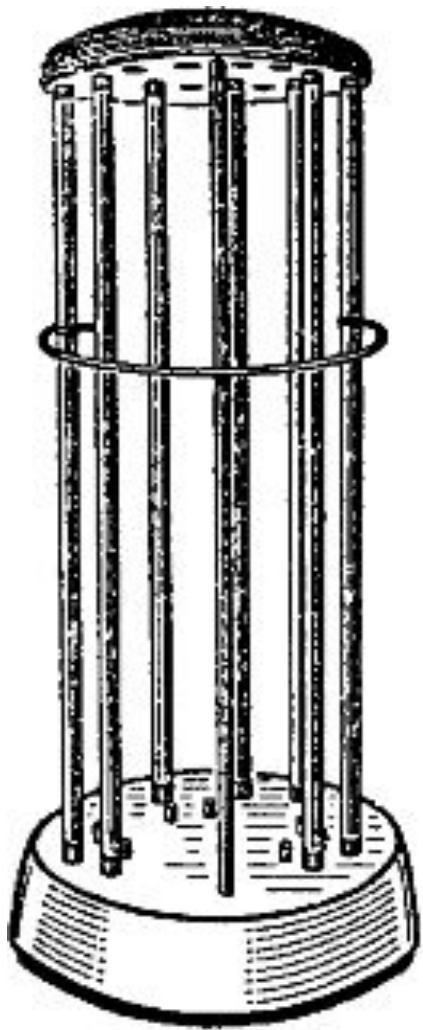


**Рис.** Облучатели: лампа Минина (а), светотепловая ванна (б), лампа Соллюкс (в)

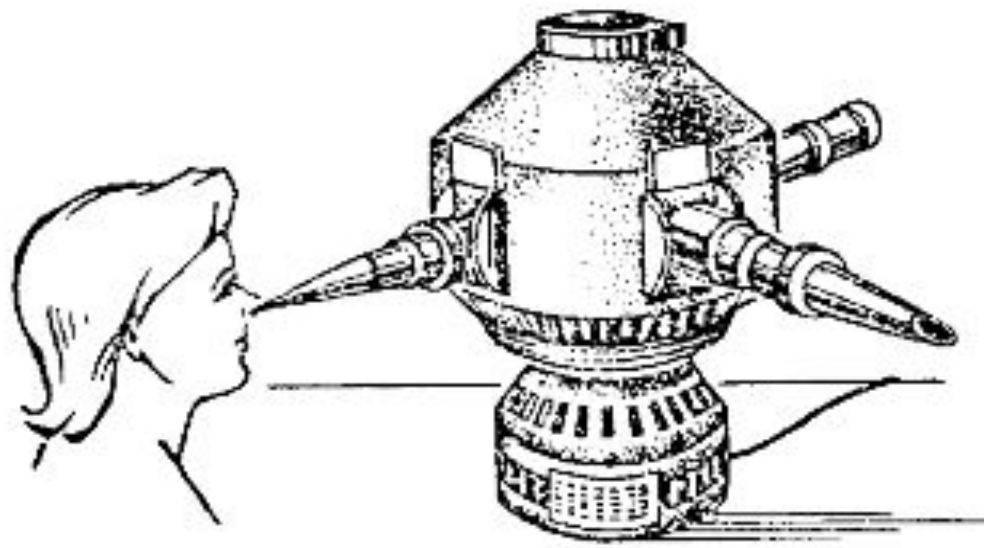
# Лечебное применение ультрафиолета

Диапазон	Длина волны, нм (1 мкм = 1000 нм)
А	400–315
В	315–280
С	280–200





а

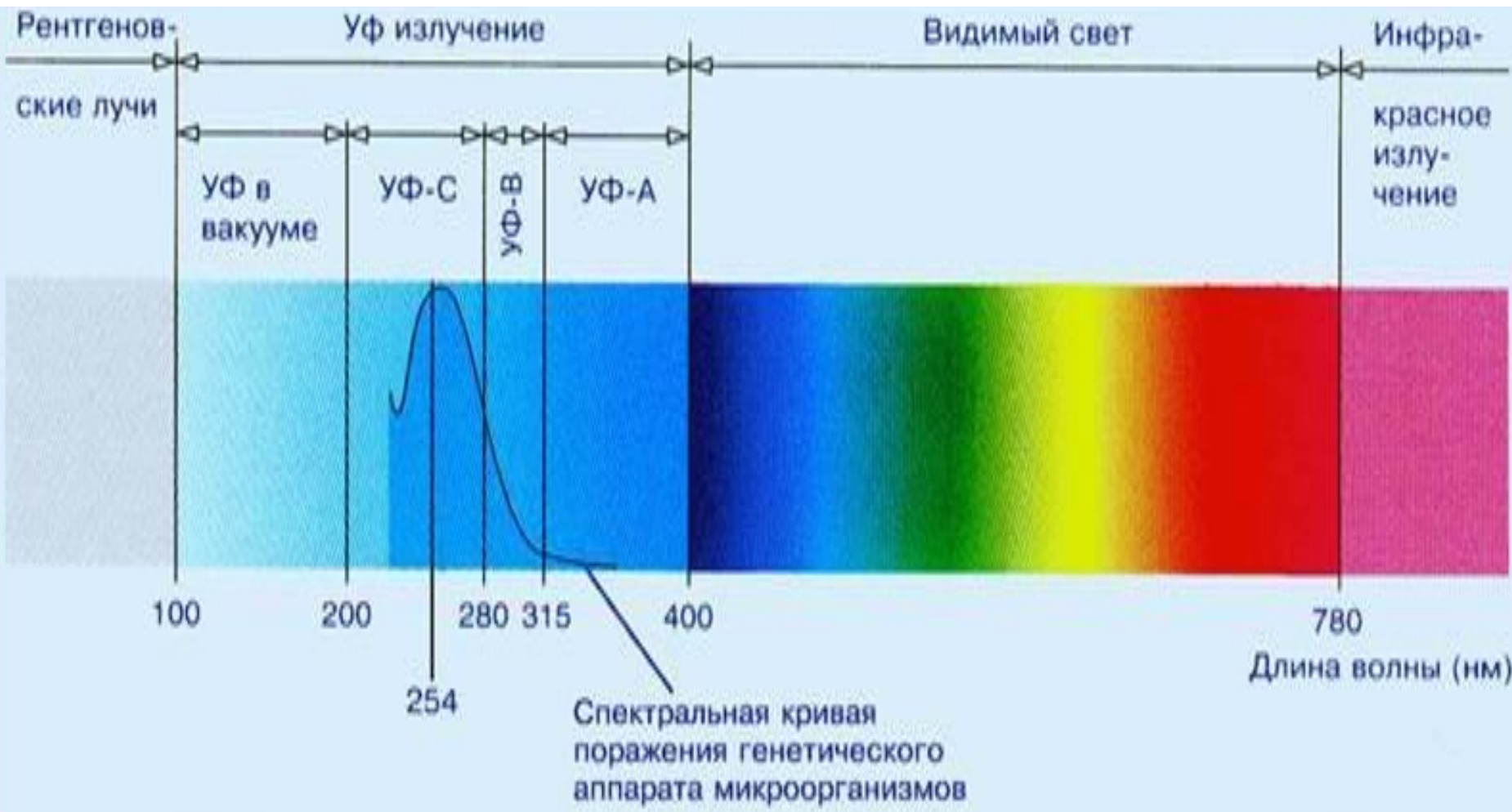


б

**Рис.** Бактерицидный облучатель (а), облучатель для носоглотки (б)

# Ультрафиолетовое излучение

- **Ультрафиолётовое излучение (УФ-излучение)** — электромагнитное **излучение**, занимающее спектральный диапазон между видимым и рентгеновским **излучениями**. Длины волн **УФ-излучения** лежат в интервале от 10 до 400 нм ( $7,5 \cdot 10^{14}$ — $3 \cdot 10^{16}$  Гц).



# Вредность ультрафиолетового облучения



## БОЛЕЗНИ КОЖИ

- Меланома (злокачественная опухоль).
- Базальноклеточная и плоскоклеточная карциномы (злокачественные, но не очень опасные опухоли кожи).
- Ожог.
- Фотостарение (раннее развитие сухости, морщин и пигментных пятен).
- Фотодерматозы (фотоаллергия, пигментация, ороговение и другие болезни кожи, связанные с солнцем).

## БОЛЕЗНИ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ

- Угнетение иммунитета.
- Увеличение подверженности инфекционным болезням.
- Ослабление действия профилактических прививок.
- Активация латентных (спящих) вирусов в организме.



## БОЛЕЗНИ ГЛАЗ

- Рак роговицы и конъюнктивы.
- Катаракта (помутнение хрусталика).
- Меланома век.
- Солнечная ретинопатия (повреждение сетчатки).

## ДРУГИЕ БОЛЕЗНИ

- Неходжкинские лимфомы (злокачественные заболевания лимфатической системы).



## Основные формулы и решение задач

- **Энергетическая светимость тела**  $R_T$ , численно равна энергии  $W$ , излучаемой телом во всем диапазоне длин волн ( $0 < \lambda < \infty$ ) с единицы площади в единицу времени, при температуре  $T$

$$R_T = \frac{W}{St} = \frac{P}{S}, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (1)$$

- **Закон Стефана-Больцмана:** Энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры:

$$R_T^0 = \sigma T^4, \quad (2)$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана.

- **Закон смещения Вина:** Длина волны, соответствующая максимальному значению испускательной способности АЧТ, обратно пропорциональна термодинамической температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (3)$$

где  $b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина.

- **Закон Кирхгофа:** Отношение испускательной способности тела  $r_{\lambda,T}$  к его поглощательной способности  $\alpha_{\lambda,T}$  не зависит от природы тела и является для всех тел универсальной функцией длины волны и температуры, равной испускательной способности АЧТ.

$$r_{\lambda,T}^0 = \frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}}. \quad (4)$$

# Примеры

*Пример 1.1* Во сколько раз увеличится мощность излучения АЧТ, при увеличении абсолютной температуры на 19% ( $T_2=1.19T_1$ )?

*Решение:* Выразим из определения энергетической светимости мощность излучения:

$$P=R_T S. \quad (1)$$

Энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры:

$$R_T^0 = \sigma T^4. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим  $P = \sigma T^4 S$ . (3)

Таким образом, отношение мощностей излучения тела пропорционально отношению температур в четвертой степени:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4. \quad (4)$$

Подставляя данные  $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = 1.19^4 = 2$ .

*Пример 1.2.* Максимум спектральной плотности энергетической светимости Солнца приходится на длину волны  $\lambda_m = 0.48 \text{ мкм}$  ( $0.48 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ). Определить 1) температуру  $T$  поверхности Солнца; 2) Мощность, излучаемую его поверхностью (радиус Солнца  $r_c = 6.95 \cdot 10^8 \text{ м}$ ).

*Решение:* 1) В соответствии с законом смещения Вина (3)

$$T = \frac{b}{\lambda_m}, \text{ подставляя данные } T = \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{0.48 \cdot 10^{-6}} = 6042 \text{ К.}$$

2) Из определения энергетической светимости

$$R_T = \frac{W}{St}, \text{ откуда } P = \frac{W}{t} = R_T S,$$

где  $S$  – площадь излучающей поверхности (площадь поверхности Солнца  $S = 4\pi r_c^2$ ).

Энергетическая светимость АЧТ из закона Стефана-Больцмана  $R_T^0 = \sigma T^4$ .

С учетом вышесказанного  $P = \frac{W}{t} = R_T S = \sigma T^4 4\pi r_c^2$ .

Подставляя данные и вычисленное в первом пункте значение  $T$ :

$$P = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 6042^4 \cdot 4\pi \cdot (6.95 \cdot 10^8)^2 = 4.58 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$



*Пример 1.3.* Считая, что тепловые потери обусловлены только излучением, определить какую мощность  $P$  необходимо подводить к свинцовому шарiku радиуса  $r=1$  см ( $r=0.01$  м), чтобы при температуре окружающей среды  $t_c=-13^\circ\text{C}$  ( $T_c=260$  К), поддерживать его температуру  $t_0=17^\circ\text{C}$  ( $T_0=290$  К). Принять поглощающую способность свинца  $\alpha_{\lambda,T}=0.6$ .

*Решение:* Энергия, излучаемая поверхностью шарика в единицу времени (мощность излучения):

$$P = \frac{W}{t} = R_T S = R_T 4\pi r^2. \quad (1)$$

Энергетическую светимость шарика можно определить на основании законов Кирхгофа и Стефана-Больцмана:  $R_T = \alpha_{\lambda,T} R_T^0 = \alpha_{\lambda,T} \sigma T_0^4$ .

Из (1) и (2), мощность, излучаемая шариком:

$$P_{\text{изл}} = \alpha_{\lambda,T} R_T^0 4\pi r^2 = \alpha_{\lambda,T} \sigma T_0^4 4\pi r^2, \quad (3)$$

Аналогично, мощность, поглощаемая шариком из окружающей среды:

$$P_{\text{погл}} = \alpha_{\lambda,T} \sigma T_c^4 4\pi r^2, \quad (4)$$

Мощность, необходимая для поддержания постоянной температуры равна разности излучаемой (3) и поглощаемой (4) мощностей

$$P = P_{\text{изл}} - P_{\text{погл}} = \alpha_{\lambda,T} \sigma T_0^4 4\pi r^2 - \alpha_{\lambda,T} \sigma T_c^4 4\pi r^2 = \alpha_{\lambda,T} \sigma 4\pi r^2 (T_0^4 - T_c^4).$$

С учетом данных задачи  $P = 0.6 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 3.14 \cdot 0.01^2 (290^4 - 260^4) = 0.11$  Вт

*Пример 1.4.* При увеличении термодинамической температуры  $T$  абсолютно черного тела в 2 раза длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, уменьшается на  $\Delta\lambda_m = 800$  нм. Определить начальную и конечную температуры  $T_1$  и  $T_2$ .

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}.$$

Тогда

$$\lambda_{m1} = \frac{b}{T_1}, \quad \lambda_{m2} = \frac{b}{T_2}.$$

$$\lambda_{1max} - \lambda_{2max} = \Delta\lambda_{max} = \frac{b}{T_1} - \frac{b}{T_2} = \frac{b}{T_1} - \frac{b}{2T_1} = \frac{b}{2T_1} \Rightarrow T_1 = \frac{b}{2\Delta\lambda}.$$

Т.к. по условию задачи  $T_2 = 2T_1$ , значит  $T_2 = \frac{b}{\Delta\lambda}$ .  $T_1 = 1813K$ ,  $T_2 = 3625K$ .

*Пример 1.5.* Принимая шарик радиусом  $r=10$  см ( $r=0.1$  м) за АЧТ, определить энергию, излучаемую за  $t=10$  мин ( $t=600$  с), если максимуму испускательной способности соответствует длина волны  $\lambda_m=0.6$  мкм ( $\lambda_m=6\cdot 10^{-5}$  м).

*Решение:* Выразим из определения энергетической светимости энергию излучения

$$W = R_T^0 S t = R_T^0 4\pi r^2 t. \quad (1)$$

Энергетическая светимость из законов Стефана-Больцмана и Вина:

$$R_T^0 = \sigma T^4 = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_m} \right)^4. \quad (2)$$

Поставляя (2) в (1)

$$W = \sigma \left( \frac{b}{\lambda_m} \right)^4 4\pi r^2 t. \quad (3)$$

$$W = 5.67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{2.9 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-5}} \right)^4 4 \cdot 3.14 \cdot 0.1^2 \cdot 600 = 23 \text{ Дж}$$

*Пример 1.6.* Шар, радиусом  $r$ , удельной теплоемкостью  $c$  нагрели до температуры  $T_0$  и поместили в среду, температура которой пренебрежимо мала. Принимая шар за АЧТ, определить время  $t$ , за которое его температура уменьшится в два раза. Плотность материала шара  $\rho$ .

*Решение:* Из определения энергетической светимости энергия  $dW$  излучаемая за время  $dt$

$$dW = R_T^0 S dt. \quad (1)$$

Энергетическая светимость АЧТ  $R_T^0 = \sigma T^4$ , площадь поверхности сферы  $S = 4\pi r^2$ , следовательно

$$dW = \sigma T^4 4\pi r^2 dt. \quad (2)$$

Испускание электромагнитных волн происходит за счет убыли внутренней энергии нагретого тела

$$dW = -dU. \quad (3)$$

Выразим изменение внутренней энергии через удельную теплоемкость, плотность и объем шара:

$$dU = c m dT = c \rho V dT = c \rho \frac{4}{3} \pi r^3 dT. \quad (4)$$

Подставим (2) и (4) в (3)

$$\sigma T^4 4\pi r^2 dt = -c \rho \frac{4}{3} \pi r^3 dT. \quad (5)$$

Упростим выражение (5)

$$\sigma T^4 dt = -c \rho \frac{1}{3} r dT.$$

Разделим переменные

$$-\frac{dT}{T^4} = \frac{3\sigma}{c\rho} dt, \quad \text{и проведем интегрирование}$$

$$-\int_{T_0}^{T_0/2} \frac{dT}{T^4} = \int_0^t \frac{3\sigma}{c\rho} dt, \quad \frac{1}{3T^3} \Big|_{T_0}^{T_0/2} = \frac{3\sigma t}{c\rho}, \quad \text{подставляя пределы } t = \frac{7c\rho r}{9\sigma T_0^3}$$

# Пример 1-7

- В комнате стоят два одинаковых чайника, содержащие равные массы воды при  $90^{\circ}\text{C}$ . Один из них никелированный, а другой темный. Какой из чайников быстрее остынет? Почему?
- Решение
- По закону Кирхгофа отношение испускательной и поглотительной способностей одинаково у всех тел. Никелированный чайник отражает почти весь свет. Следовательно, его поглотительная способность мала. Соответственно мала и испускательная способность.
- Ответ: быстрее остынет темный чайник.

# Пример 1-8

- Для уничтожения жучков-вредителей зерно подвергают действию инфракрасного облучения. Почему жуки погибают, а зерно нет?
- **Ответ:** жуки имеют *черный* цвет, поэтому интенсивно поглощают инфракрасное излучение и гибнут.

# Пример 1-9

- Нагревая кусок стали, мы при температуре  $800^{\circ}\text{C}$  будем наблюдать яркое вишнево-красное каление, но прозрачный стерженек плавленого кварца при той же температуре совсем не светится. Почему?
- **Решение**
- **См. пример 1- 7.** Прозрачное тело поглощает малую часть света. Поэтому и его испускательная способность мала.
- **Ответ:** прозрачное тело практически не излучает, даже будучи сильно нагретым.

# Пример 1-10

- Почему в холодную погоду многие животные спят, свернувшись в клубок?
- **Ответ:** при этом уменьшается открытая поверхность тела и соответственно уменьшаются потери на из