

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

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

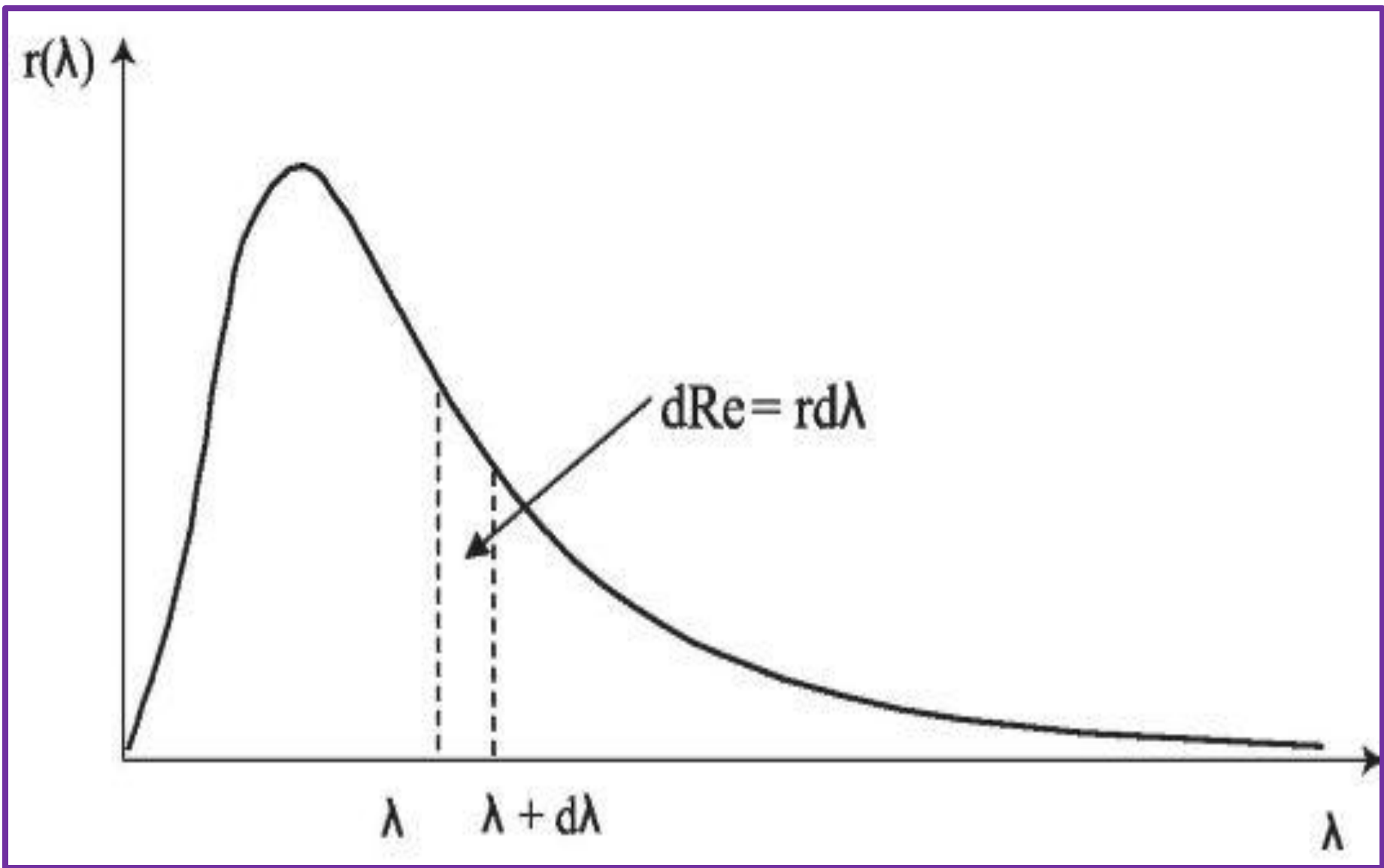


Рис. 1. Спектральная плотность энергетической светимости

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

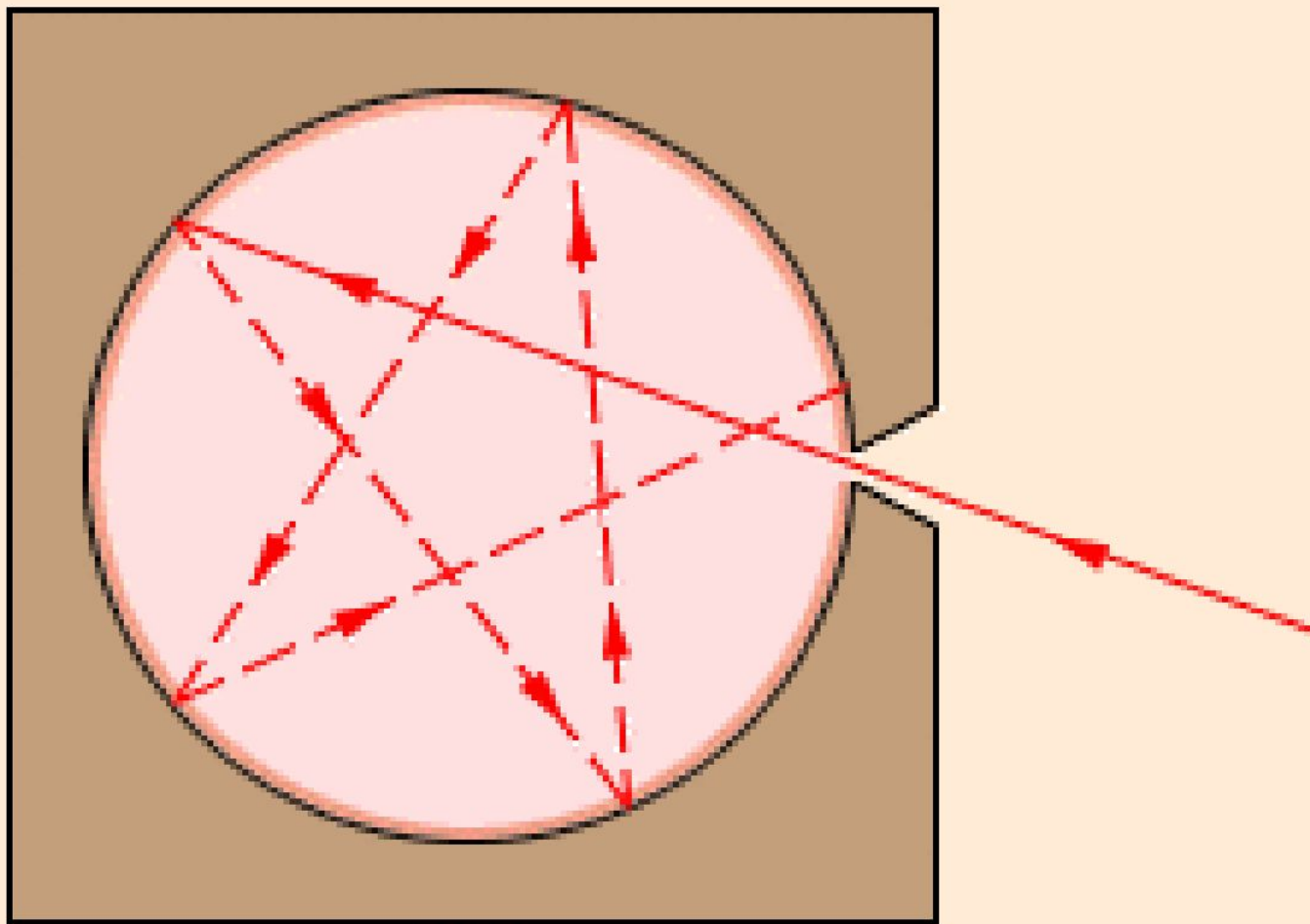
- **Отражательная способность** - часть энергии, которая отражается от единицы площади поверхности.

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

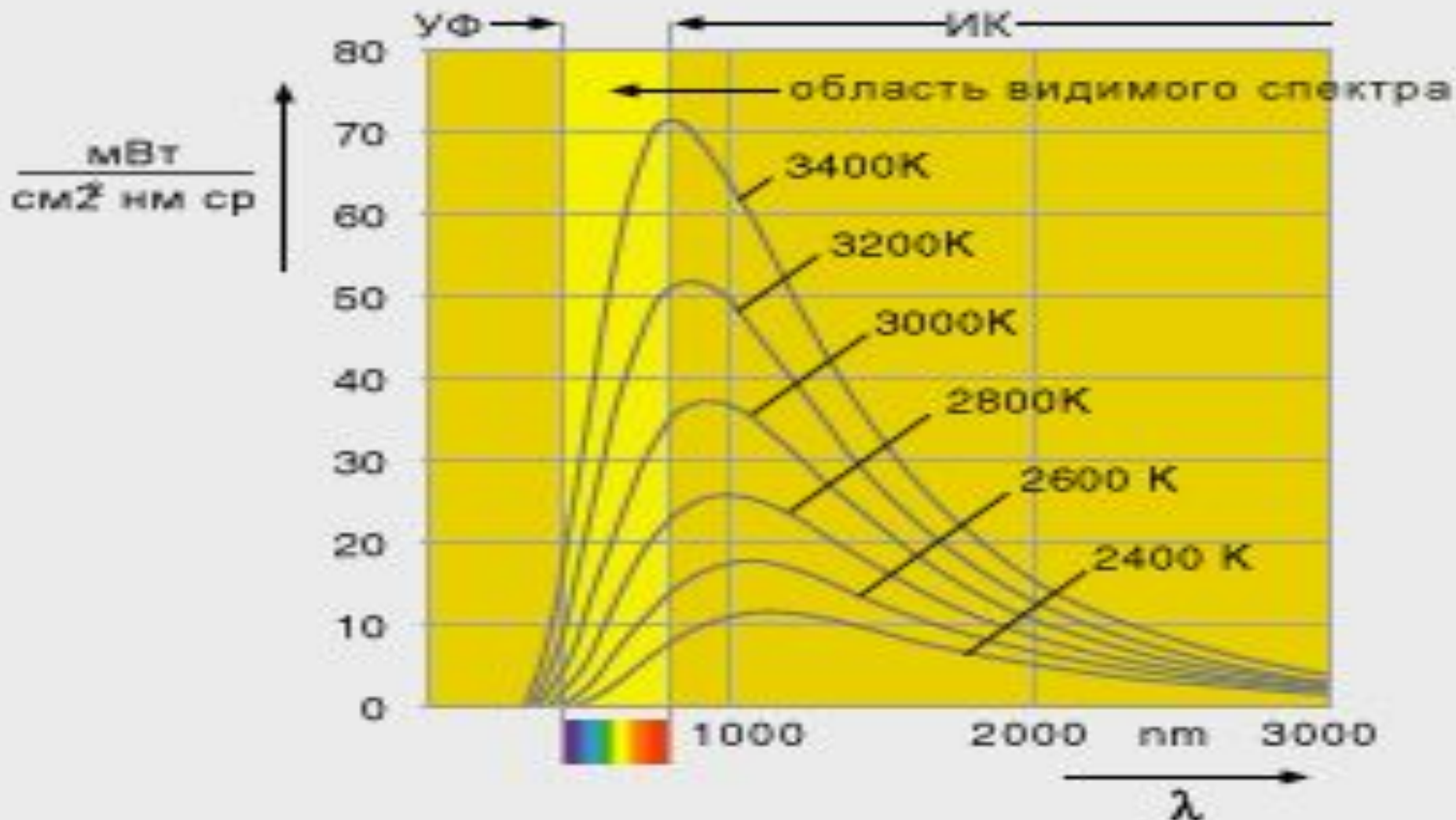
Абсолютно черное тело (а.ч.т.)

- **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 $\alpha_{\lambda, T} = 1$, $\rho_{\lambda, T} = 0$.

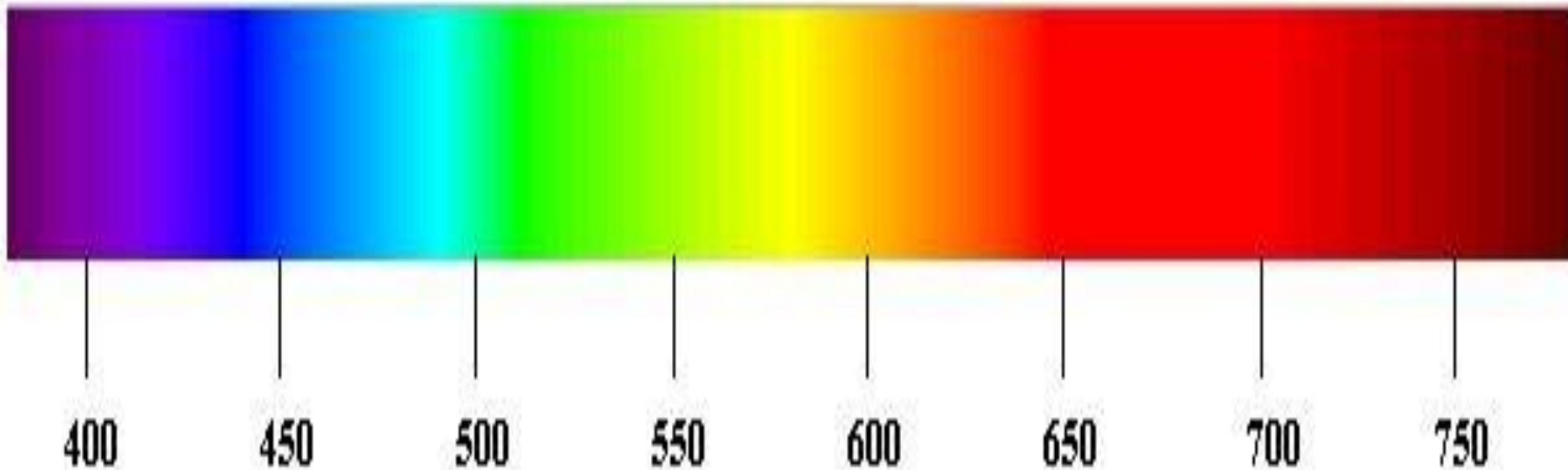
Модель абсолютно черного тела



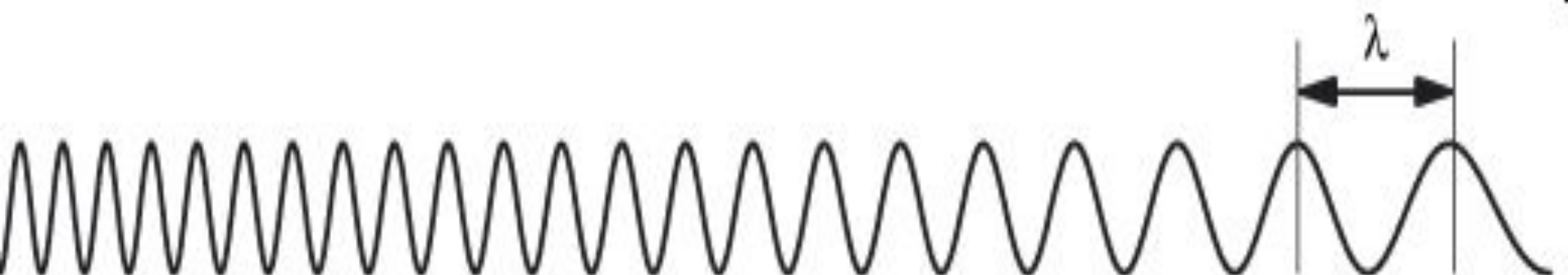
Распределение энергии в спектре излучения АЧТ



Спектральный состав белого света



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



1000K

Таблица цветности излучения абсолютно чёрного тела

2000K

3000K

4000K

5000K

6000K

7000K

8000K

9000K

Температурный интервал в Кельвинах

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

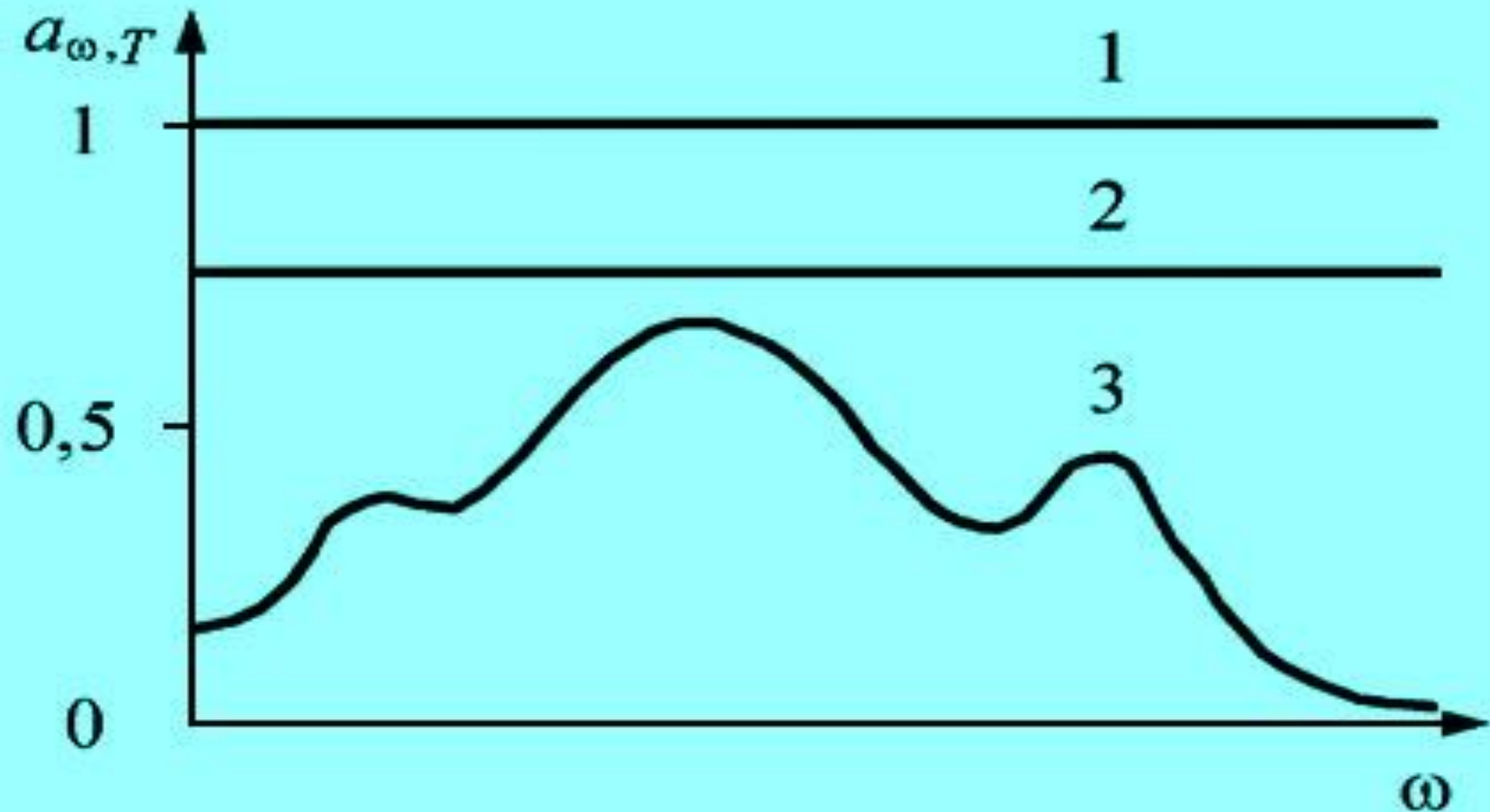
15000—∞

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

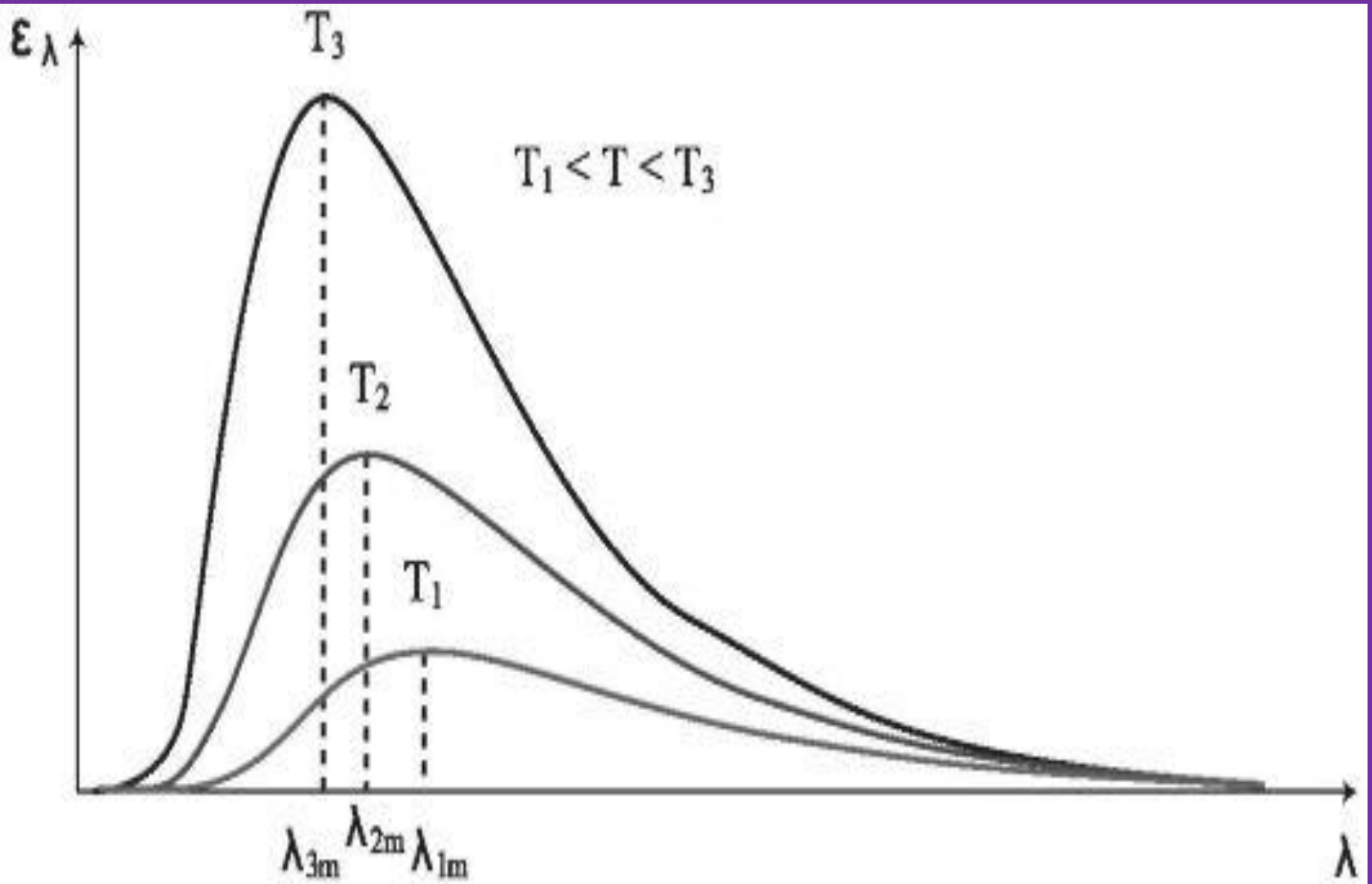
Материал	Коэффициент поглощения, α	Приведенный коэффициент поглощения δ , 10^{-8} Вт/(м ² К ⁴)
Хлопчатобумажная ткань	0,73	4,2
Шерсть, шелк	0,76	4,3
Кожа человека	0,90	5,1

Закон смещения Вина

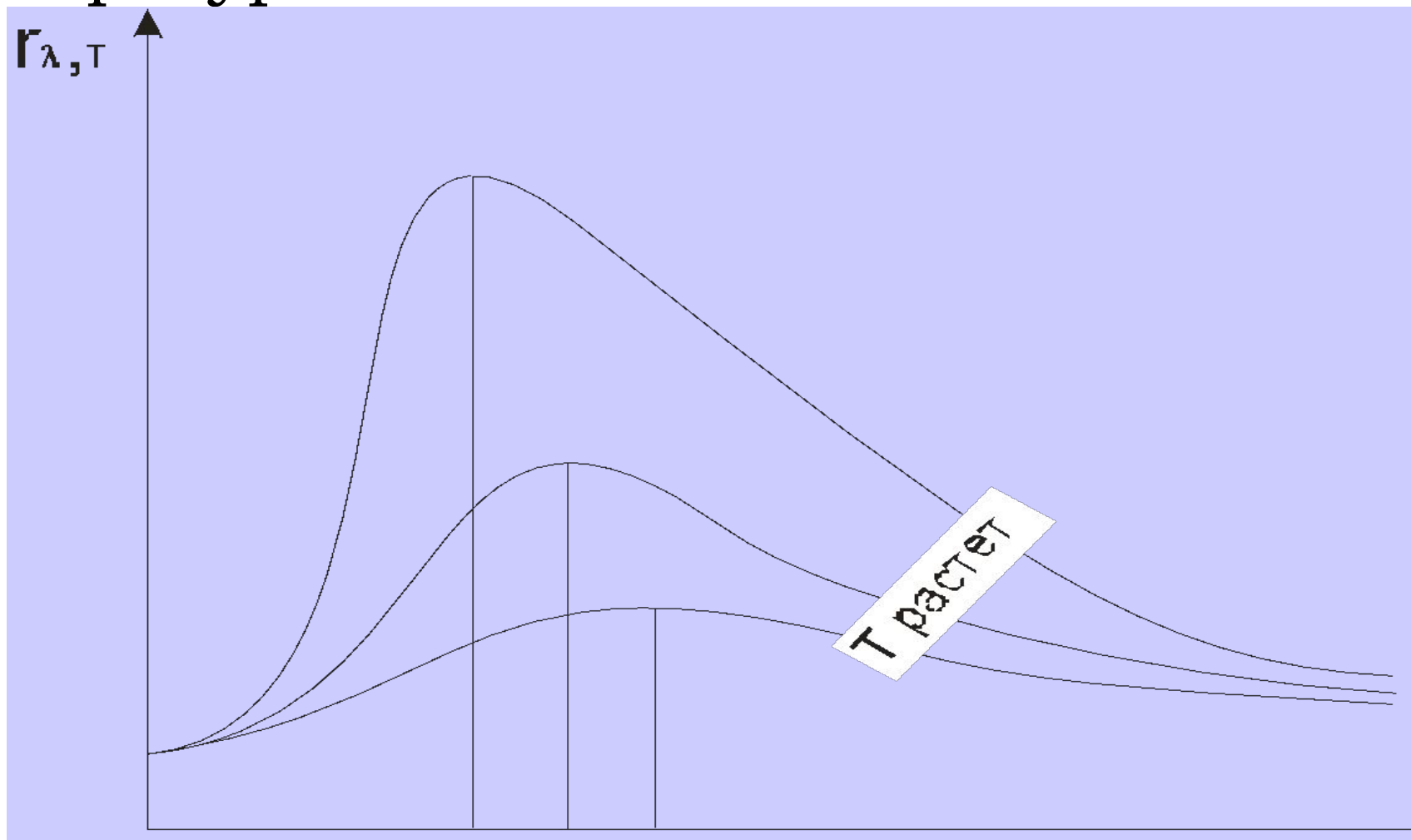
- Длина волны λ , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости а.ч.т., обратно пропорциональна его абсолютной температуре, т.е. при повышении температуры максимум спектральной плотности энергетической светимости смещается в сторону коротких длин волн

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

- 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



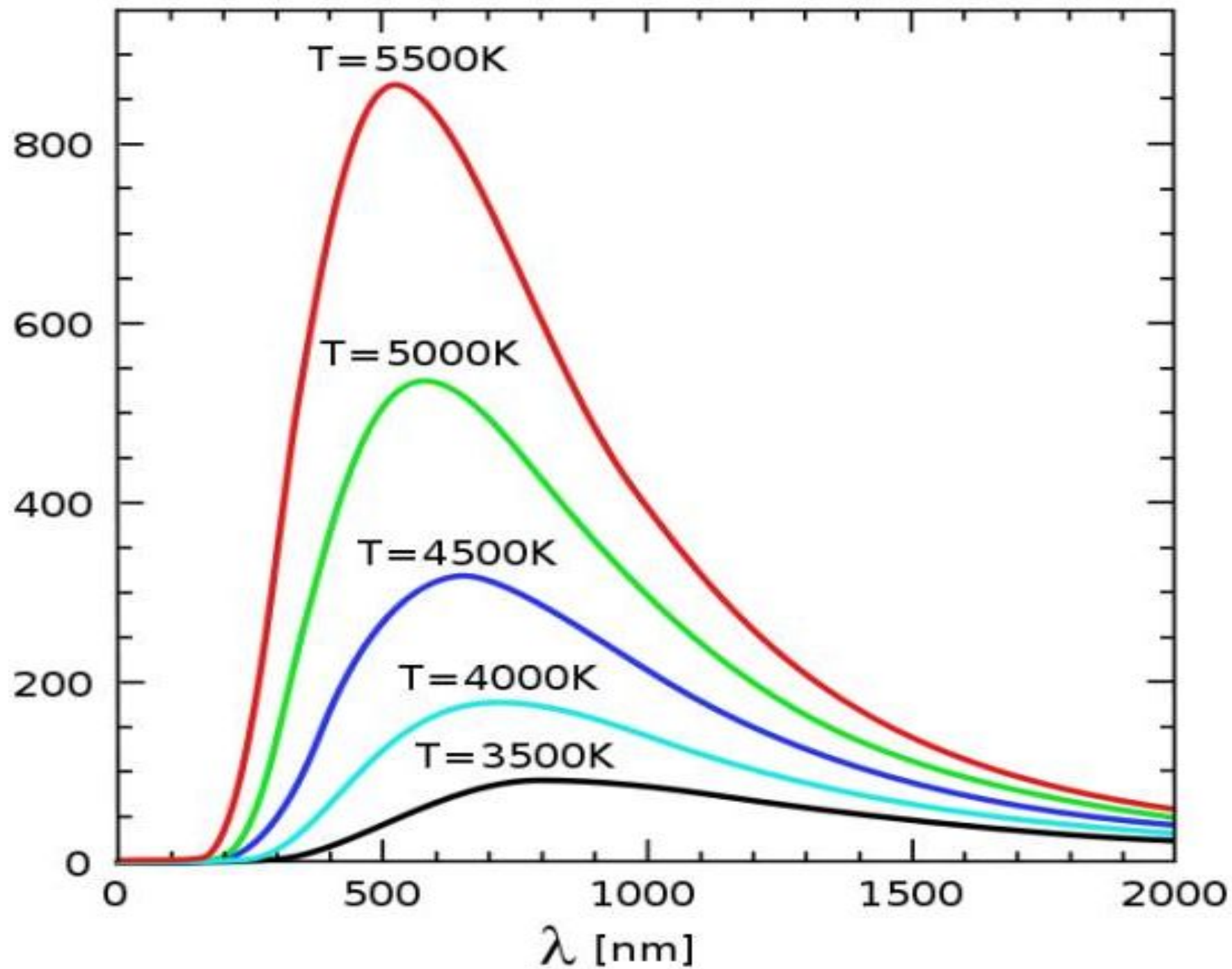


Таблица 2.

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

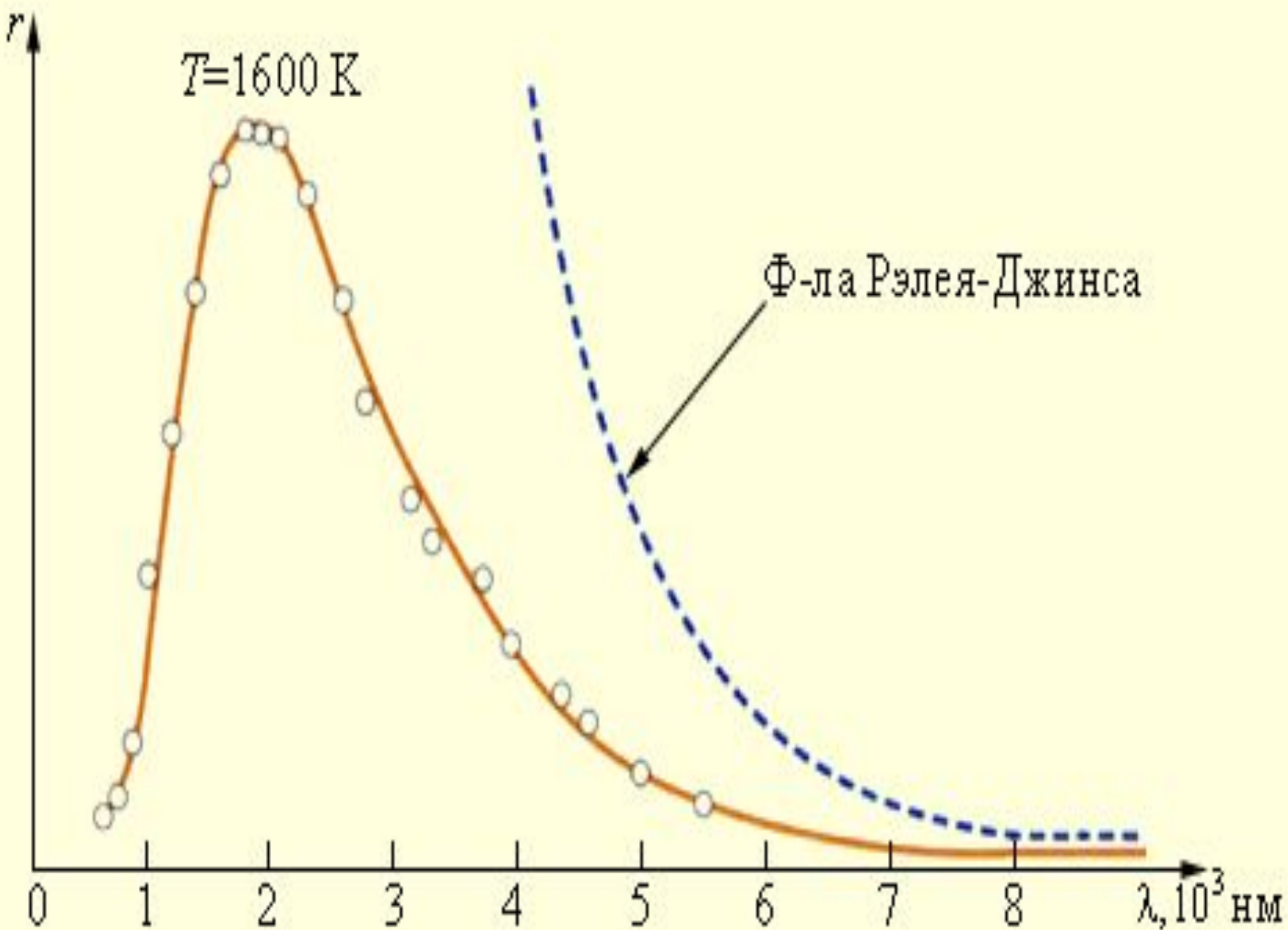
$$(r_{\lambda,T})_{\max} = cT^5$$

- 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

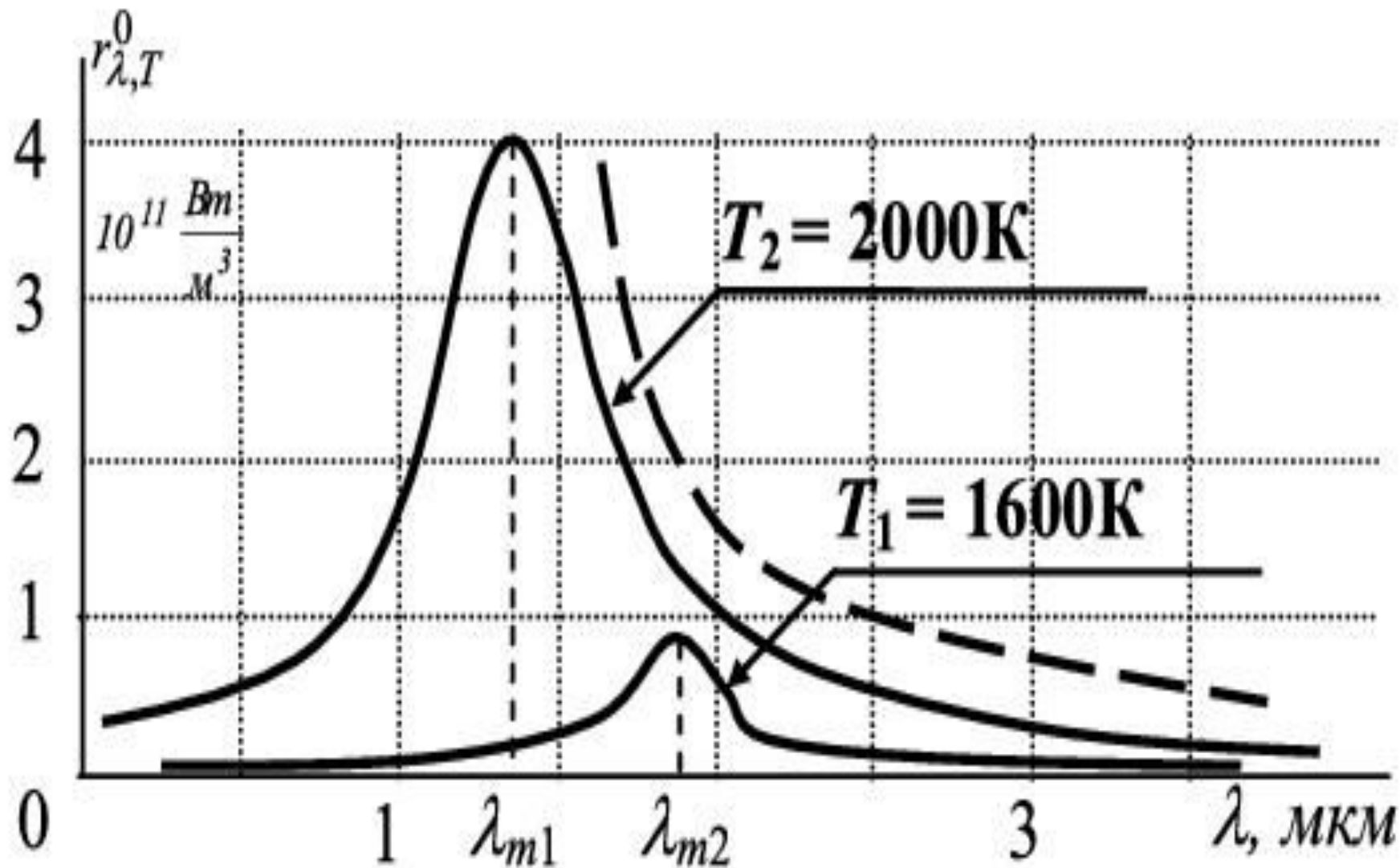
Формула Планка

- 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

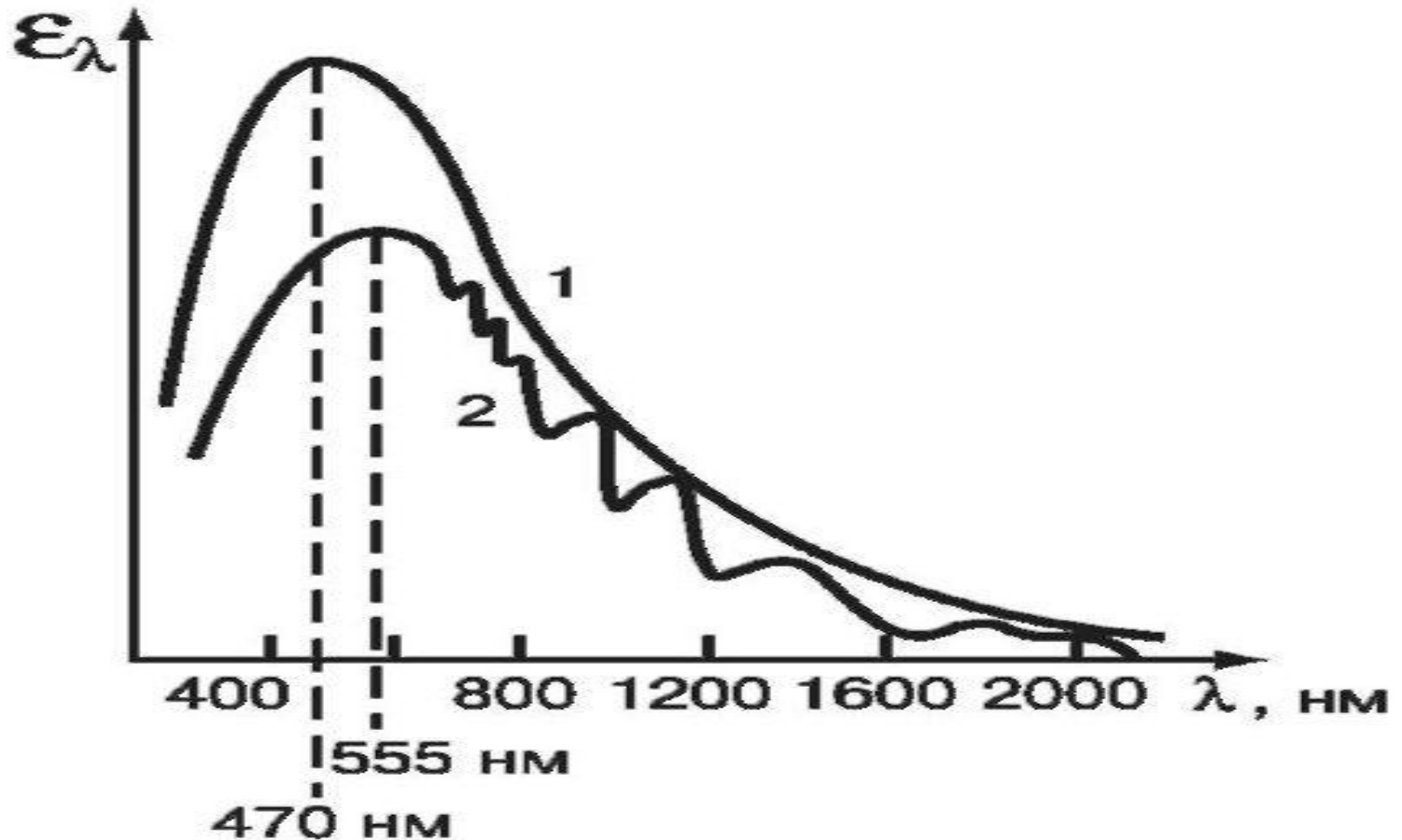


Рис. . Спектр солнечного излучения:
1 - на границе атмосферы, 2 - у поверхности Земли

Солнечная постоянная

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

$$I = 1370 \text{ Вт/м}^2.$$

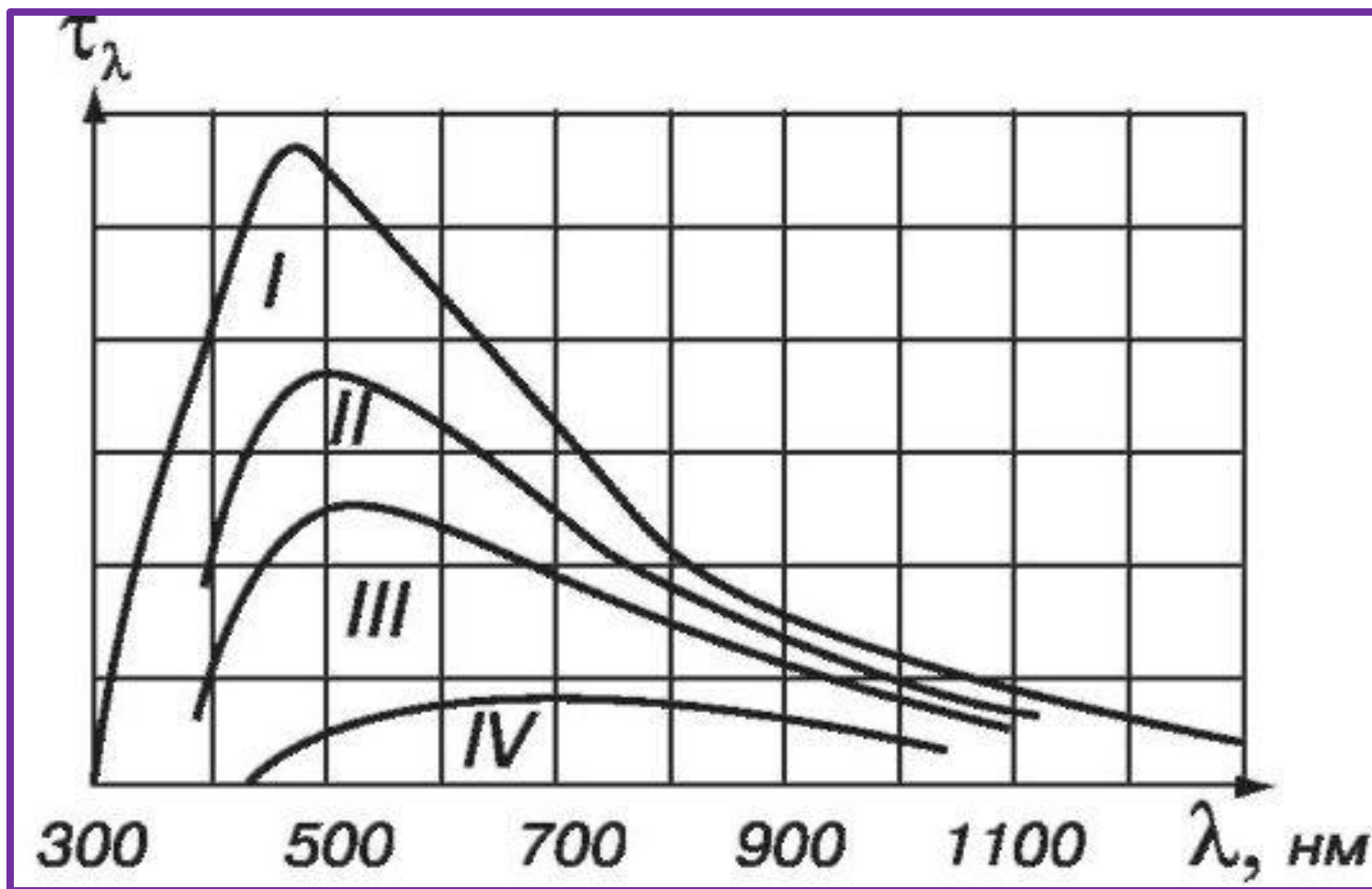


Рис. Распределение энергии в спектре Солнца при различных высотах над горизонтом

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

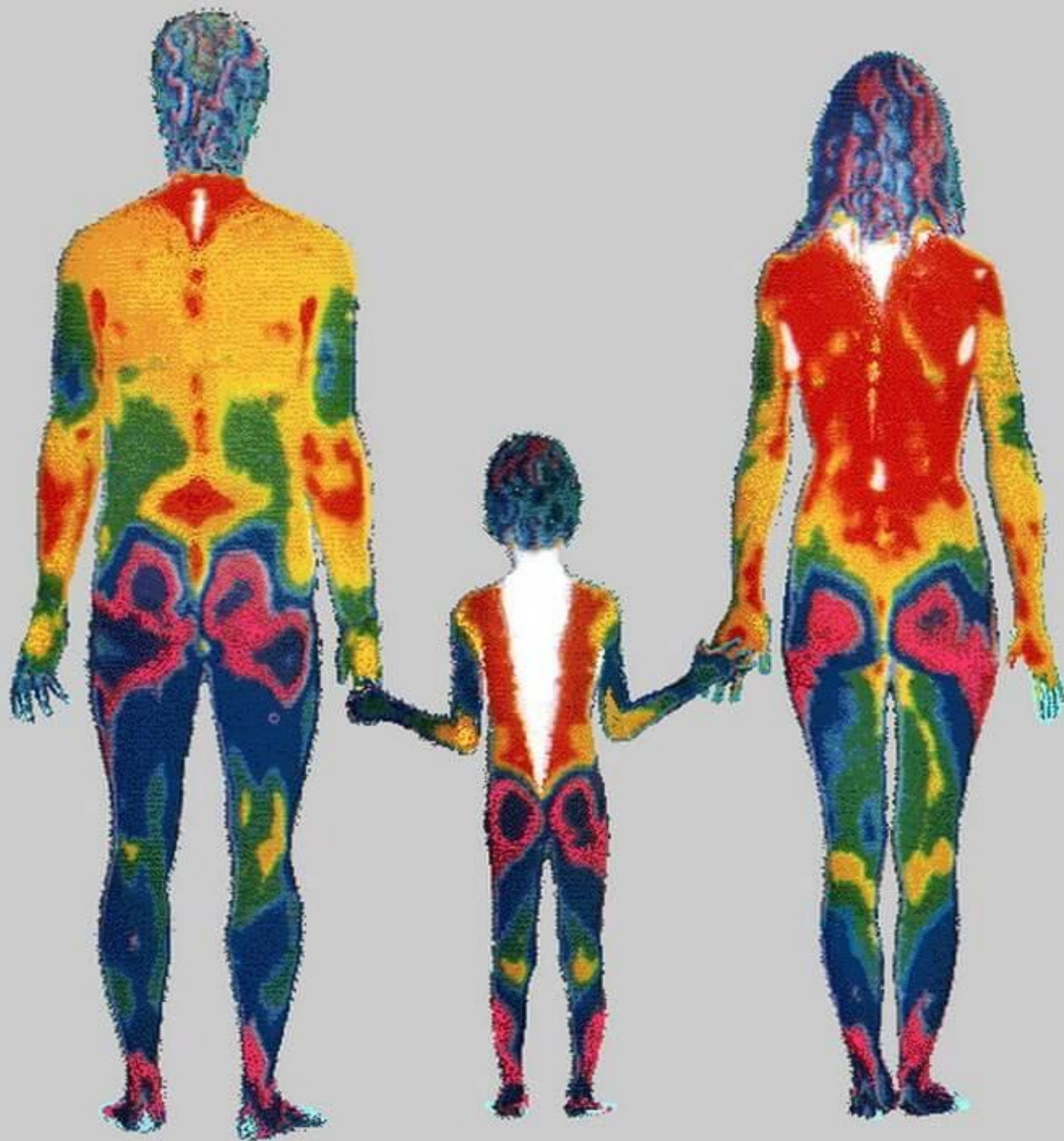
- Рассчитаем мощность излучательных потерь раздетого человека при температуре окружающей среды 18°C (291 K).
- Примем: площадь поверхности тела $S = 1,5\text{ м}^2$; температура кожи $T_1 = 306\text{ K}$ (33°C). Приведенный коэффициент поглощения кожи $\delta = 5,1 \cdot 10^{-8}\text{ Вт/м}^2\text{K}^4$.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

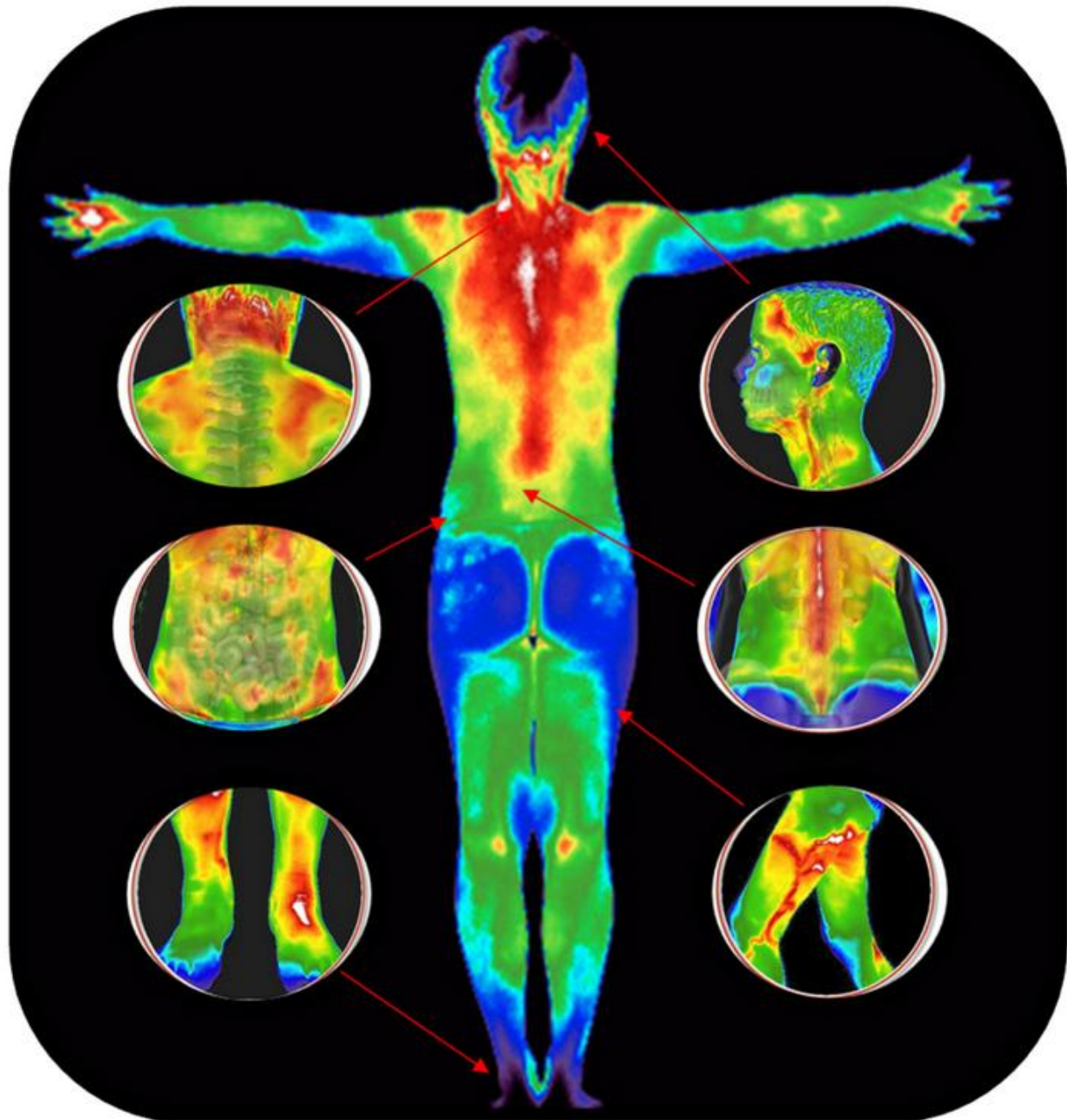
30

29

28

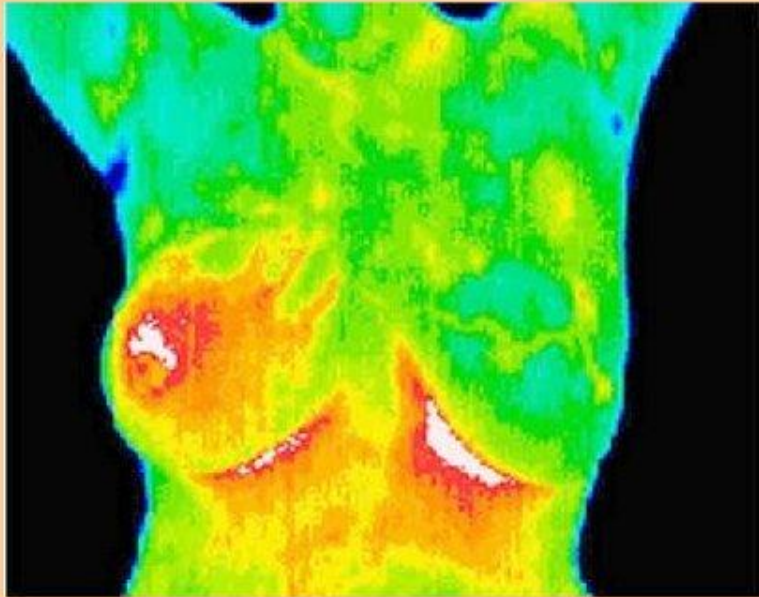
27

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

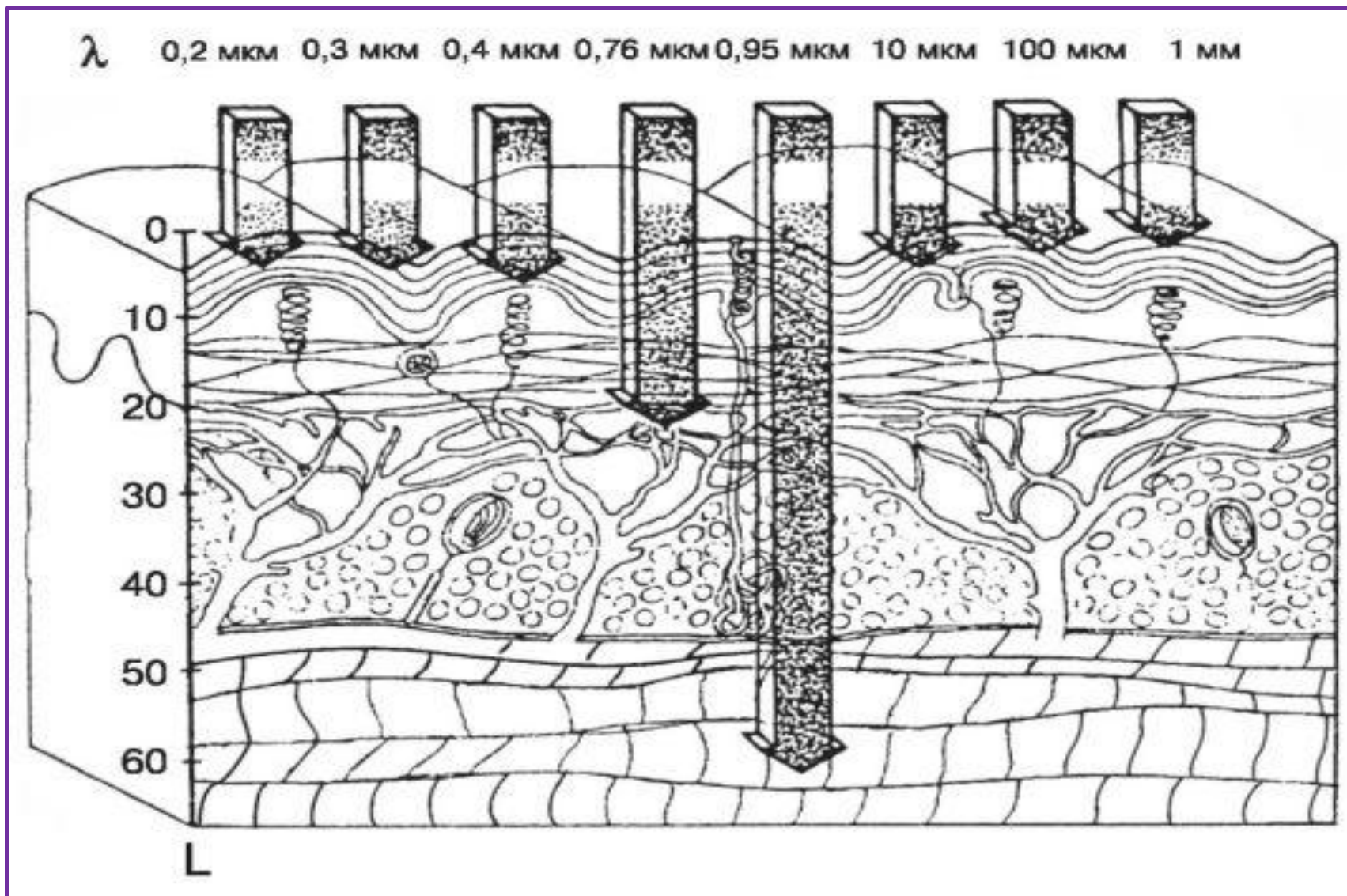


Рис. Глубина проникновения излучения в кожу

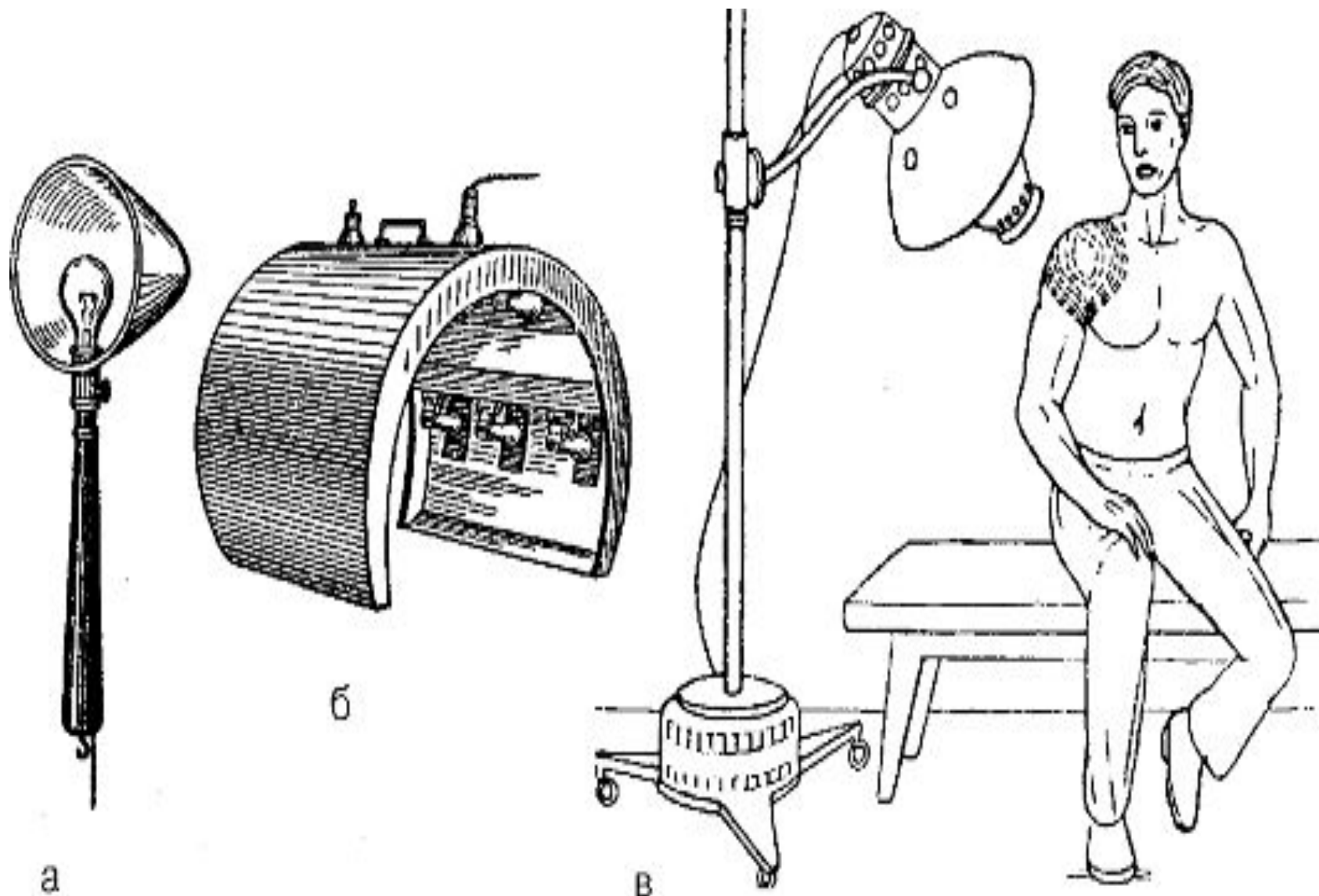
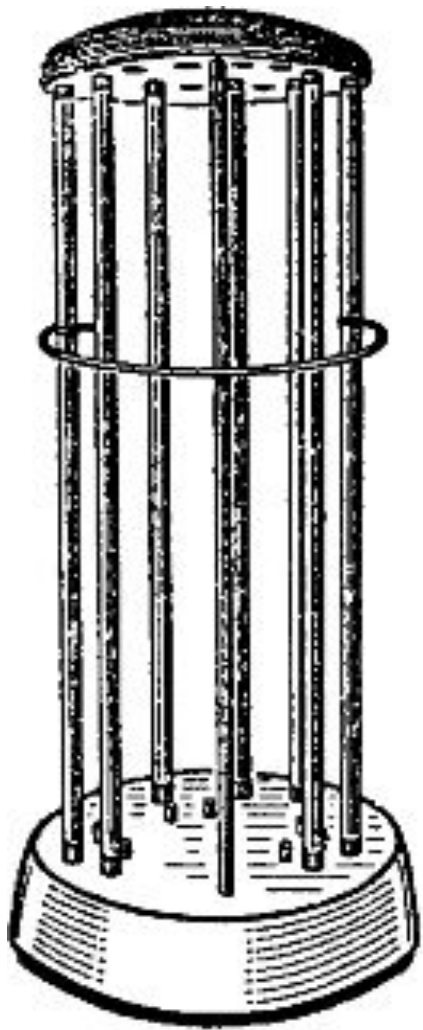


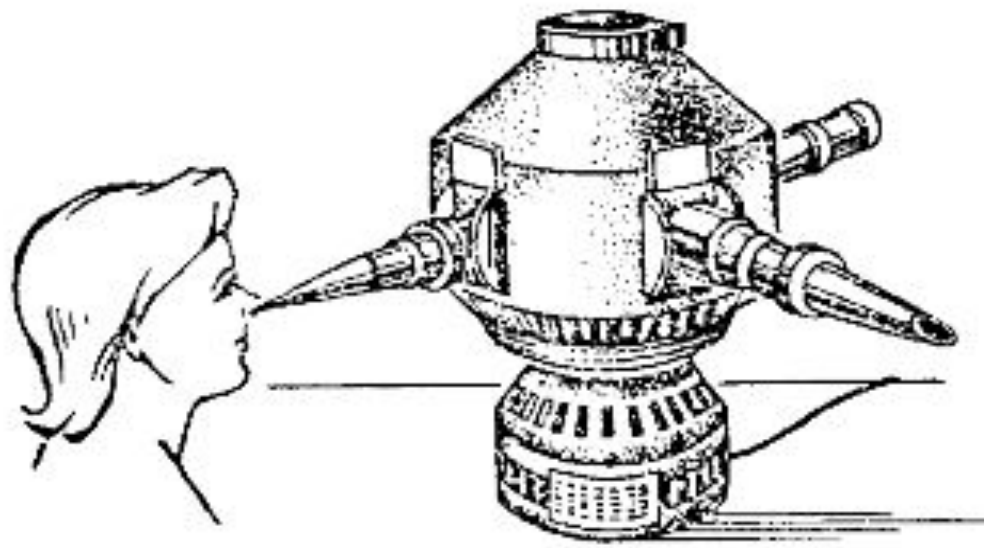
Рис. Облучатели: лампа Минина (а), светотепловая ванна (б), лампа Соллюкс (в)

Лечебное применение ультрафиолета

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



а

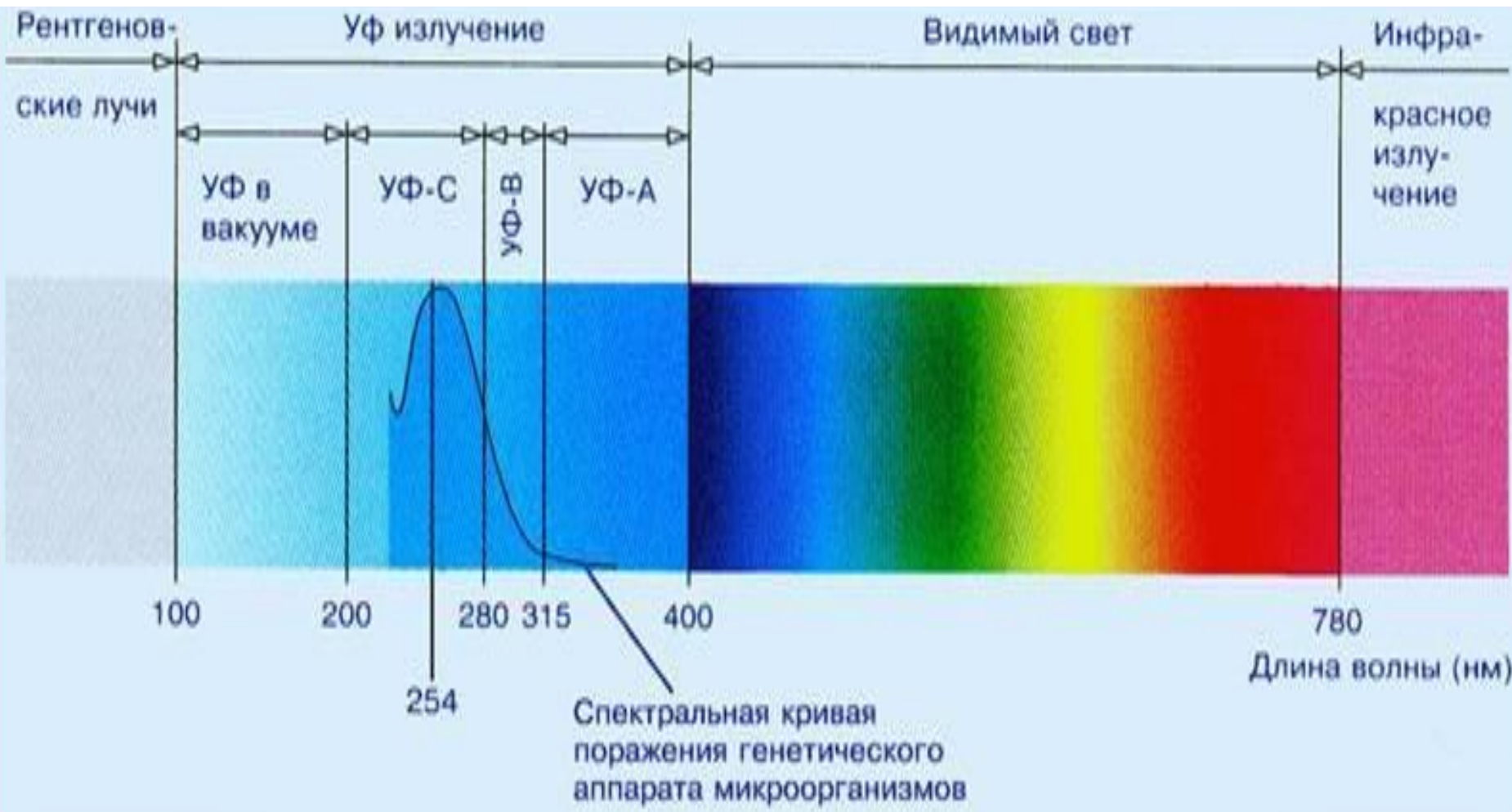


б

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 λ_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

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

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 ρ .

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°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°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