

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ

**Лектор: к.т.н., доц. Якимов А.Н.**

Кафедра медицинской и биологической  
физики, медицинской информатики,  
биостатистики

**ГУ «Луганский государственный  
медицинский университет»**

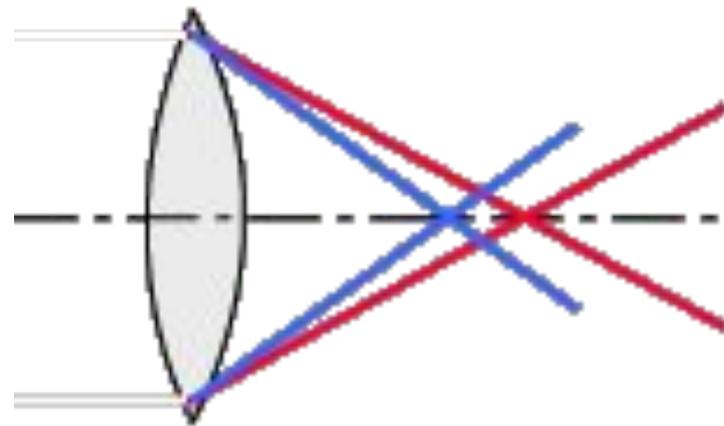
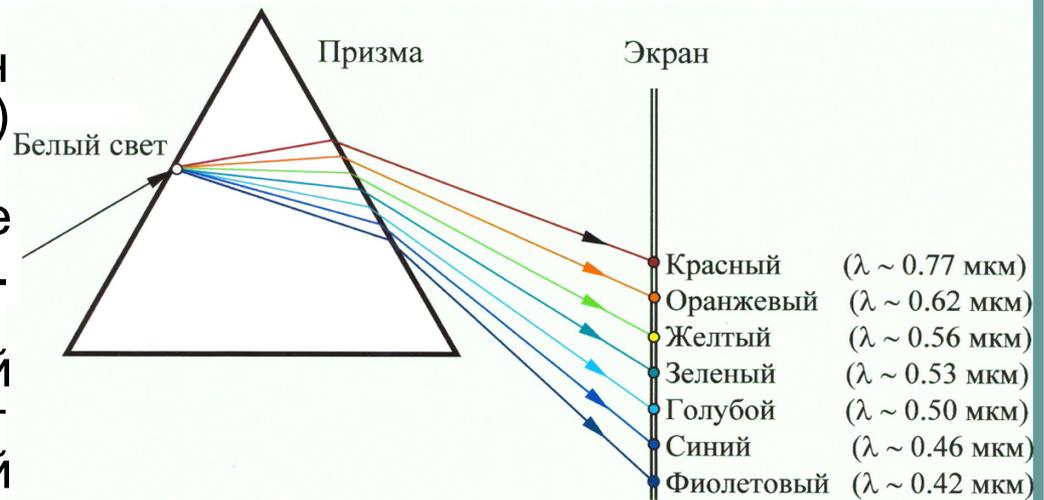
# ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

- **Дисперсией света** называют явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества  $n$  от длины световой волны  $\lambda$ .
- Световые волны различных длин / распространяются в вакууме с одинаковыми скоростями ( $c = 3 \times 10^8$  м/с), а в веществе - с различными. Например, в обыкновенном стекле красный свет распространяется с большей скоростью, чем фиолетовый. Также дисперсия вызывает нежелательную абберацию света в линзах.

# ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Свет разных длин волн (разного цвета) преломляется неодинаково на границе двух прозрачных сред. Различная преломляемость лучей разного цвета позволяет разложить сложный (белый) свет на его **монохроматические** составляющие («моно» - один, «хромос» - цвет). Такой опыт был впервые (1672 г.) предложен Исааком Ньютоном.

Аберрация света в линзе из-за дисперсии.



# ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

- Обычно дисперсию материалов характеризуют, измеряя показатель  $n$  голубой линии водорода (486.1 nm), желтой линии натрия D (589.3 nm), и красной линии водорода C (656.3 nm).
- Дисперсия характеризуется стандартным параметром, называемым числом Аббе, или значением  $v$  или числом  $V$ , что является одним и тем же:

$$v = \frac{(n_D - 1)}{(n_F - n_C)}$$

натрий, желтая

водород, голубая                      водород, красная

Стекла с  $v \geq 55$  (малая дисперсия) называют кронами  
с  $v < 50$  (большая дисперсия) называют флинтами

# ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

- **Пример дисперсии**
- Дисперсия в оптических стеклах обычно характеризуется значениями показателя преломления для трех стандартных длин волн.

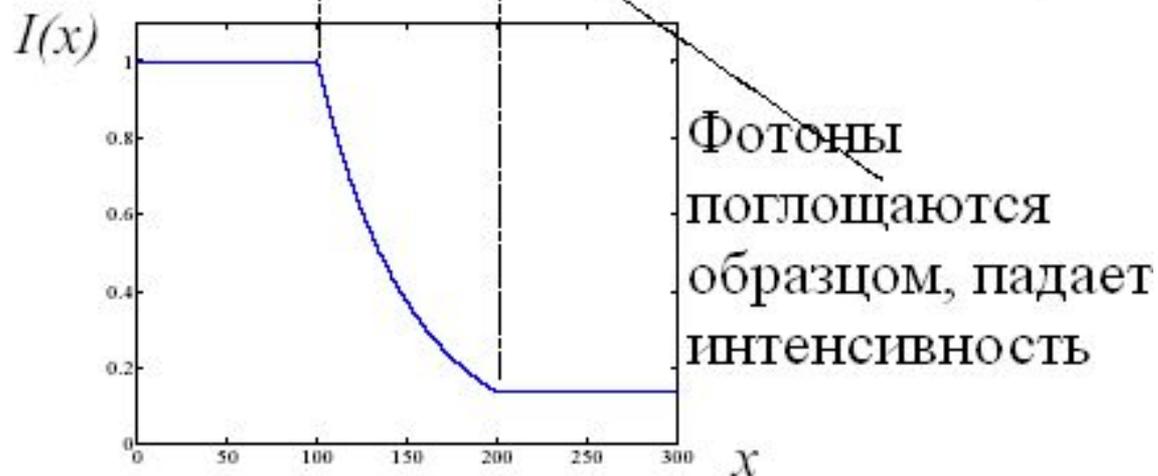
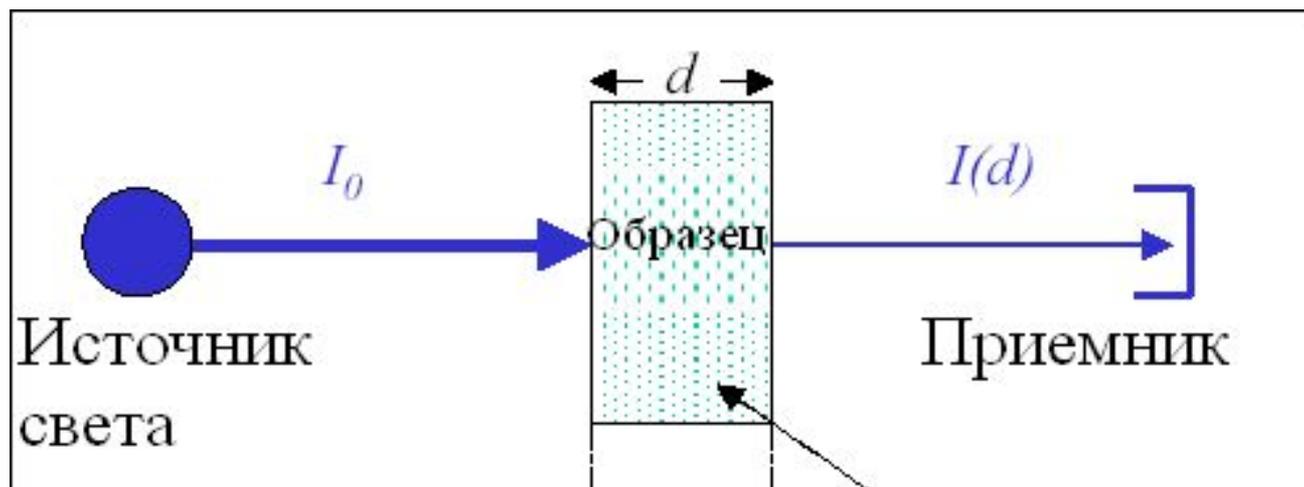
линия Фраунгофера	Цвет	Длина волны, нм	Прозрачное крон	Сверхплотное флинт
F	голубой(водород)	486.1	показатель преломления	
D	желтый(натрий)	589.3	1.5293	1.7378
C	красный(водород)	656.3	1.5230	1.7200
			1.5204	1.7130
$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = \text{число Аббе}$			v	
			59	29

- Малые значения v соответствуют большой дисперсии.

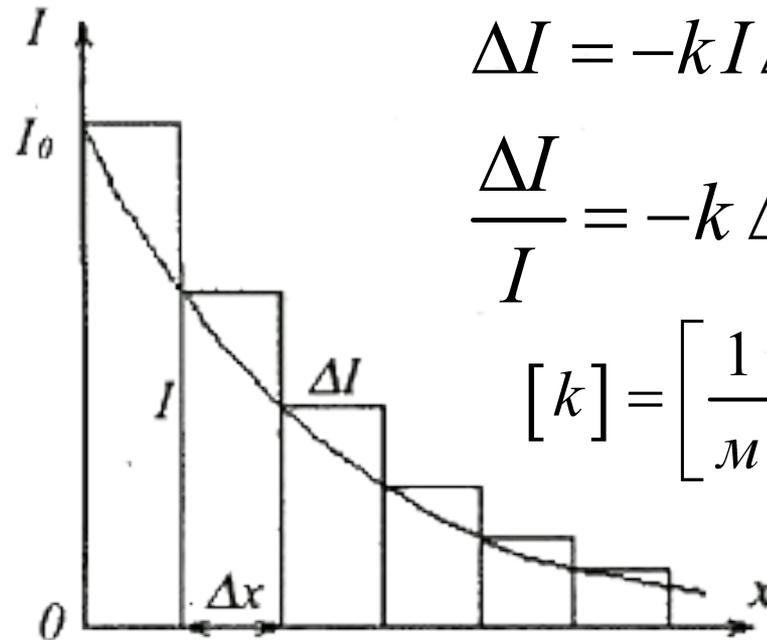
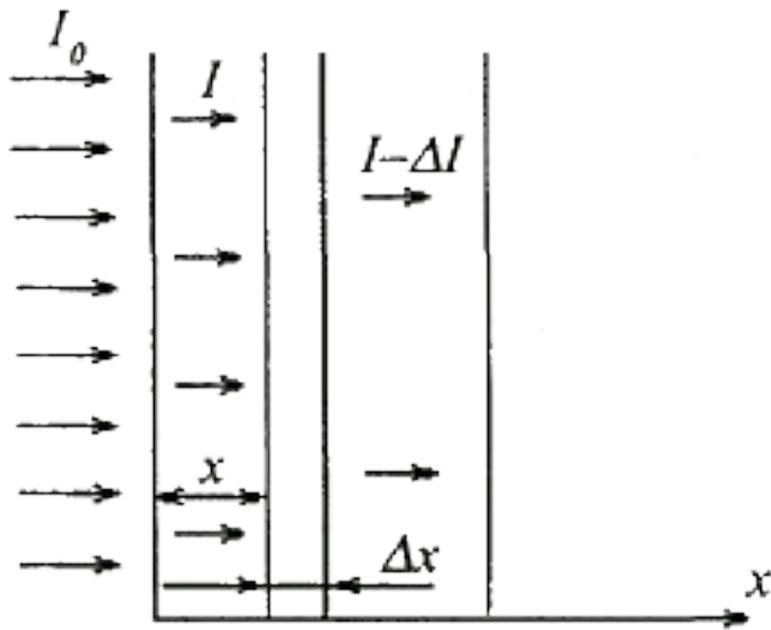
# ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

Когда световое излучение действует на вещество, состоящее из дискретных зарядов, они вынужденно колеблются с частотой действующего электрического поля. Таким образом, в данном случае, резонанс наблюдается вокруг естественных частот, посредством чего энергия передается от действующего поля системе, и амплитуда вибрации значительно увеличивается. Атомы или молекулы будут обычно терять свою энергию, сталкиваясь друг с другом, таким образом увеличивая кинетическую энергию других частиц, вовлеченных в столкновения. Следовательно, энергия, связанная с действующим полем, рассеивается на нагрев среды. **Этот процесс называется поглощением.**

# ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА



# ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА



$$\Delta I = -k I \Delta x$$

$$\frac{\Delta I}{I} = -k \Delta x$$

$$[k] = \left[ \frac{1}{\text{м}} \right]$$

Пусть на толщине  $\Delta x$  поглощается некоторая доля интенсивности света. Соединяя на рисунке ординаты, соответствующие интенсивностям света, вышедшим из слоев  $\Delta x$ , получим график изменения интенсивности света в веществе. Естественно, что доля поглощения тем больше, чем больше толщина  $\Delta x$ .

# ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

**Закон Бугера — Ламберта — Бера** - физический закон, определяющий ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде. Соотношение между поглощением света в абсорбирующей среде и толщиной среды было впервые найдено в 1729 Бугером. Ламберт в 1760 получил математическое выражение для зависимости, известной как закон Ламберта-Бугера, которая описывает, как каждый следующий слой  $dx$  среды поглощает ту же часть  $dI$  интенсивности  $I$  для постоянной  $k_\lambda$ , известной как коэффициент поглощения:

$$\frac{dI}{I} = k_\lambda \cdot dx$$

# ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

Интенсивность входящего пучка  $I_0$ , следовательно, интенсивность потока  $I$  на расстоянии  $d$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = \int_0^d k_\lambda \cdot dx$$

$$I = I_0 \cdot e^{-k_\lambda \cdot d}$$

$k_\lambda$  - показатель поглощения, зависящий от свойств вещества и длины волны  $\lambda$  (частоты падающего света).

Интенсивность света уменьшается в геометрической прогрессии, если толщина слоя увеличивается в арифметической прогрессии.  $k_\lambda$  - величина, обратная расстоянию, на котором интенсивность света уменьшается в результате поглощения средой в  $e$  раз.

# ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

На практике закон Бугера обычно представляют в виде показательной функции с основанием 10:

$$I_l = I_o \cdot 10^{-k'_\lambda d},$$

где  $k'_\lambda = 0,43 k_\lambda$ .

В 1852 **Бер** выяснил, что коэффициент поглощения состава линейно связан с его концентрацией  $c$  растворенной в неабсорбирующей среде.

$$k_\lambda = \alpha_\lambda \cdot C, \text{ или } k'_\lambda = \alpha'_\lambda \cdot C$$

где  $\alpha_\lambda$  - мономатический коэффициент поглощения соответствующий концентрации вещества.  $\alpha'_\lambda$  - удельный коэффициент поглощения.

# ЗАКОН БУГЕРА-ЛАМБЕРТА-БЕРА

Закон Бера справедлив только для растворов низких концентраций, в концентрированных растворах, он не соблюдается из-за влияния взаимодействий между близко расположенными молекулами поглощающего вещества.

Подставив  $k_\lambda$  в закон Ламберта-Бугера, получим **закон Бугера-Ламберта-Бера**:

$$I_l = I_o \cdot e^{-\epsilon_{\lambda} \cdot C \cdot d}$$

$$I_l = I_o \cdot 10^{-\alpha'_{\lambda} \cdot C \cdot d},$$

Соотношение  $I_d/I_o = \tau$  называется **коэффициентом пропускания**.

# ОПТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ

$D = \lg (1/\tau) = \lg(I_0/I_d)$  - оптическая плотность или спектральная поглощательная способность вещества (раствора).

Тогда мы имеем:  $D = \alpha_{\lambda}' \cdot C \cdot d$

В растворе, содержащем смесь  $n$  абсорбирующих компонент, полная спектральная поглощательная способность - сумма отдельных коэффициентов поглощения, умноженных на концентрацию  $C$  и расстояние  $d$ :

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n = (\alpha_{\lambda 1}' \cdot C_1 + \alpha_{\lambda 2}' \cdot C_2 + \dots + \alpha_{\lambda n}' \cdot C_n) \cdot d$$

Это уравнение справедливо только для низких концентраций растворов и лежит в основе метода колориметрии.

# КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОЛОМЕТРИЯ

**Фотометрический метод** определения концентрации вещества в окрашенных растворах основан на измерении их оптической плотности. Такие измерения осуществляют двумя классами устройств: фотометрами или фотоколориметрами.

Приборы, используемые для сравнения силы света световых потоков (проходящих через стандартные и изучаемые растворы), называются **фотометрами**. Они бывают:

- визуальными,
- объективными (фотографические, электрические).

**Фотоколориметр** — оптический прибор для измерения концентрации веществ в растворах.

# КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОЛОМЕТРИЯ

- Измерения должны осуществляться в **монохроматическом свете** наиболее поглощаемого содержащимся в растворе конкретным исследуемым веществом участка спектра 315 нм - 980 нм. Другие компоненты раствора должны поглощать этот свет относительно слабо. Для этого фотоколориметр может быть снабжен набором соответствующих светофильтров.
- Принцип действия колориметра основан на серии измерений светового потока  $\Phi_0$  проходящего через растворитель или контрольный раствор, и потока  $\Phi_1$ , проходящего через исследуемый раствор. В колориметре световые потоки  $\Phi_0$  и  $\Phi_1$  преобразуются в электрические сигналы  $U_0$  и  $U_1$ , регистрируемые гальванометром как коэффициент передачи ( $\tau$ ), оптическая плотность ( $D$ ) или концентрация.

# КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОЛОМЕТРИЯ

- Коэффициент пропускания изучаемого раствора

$$\tau = \frac{U_s}{U} \cdot 100\%$$

- Оптическая плотность:

$$D = -\log \frac{U_s}{U_o}$$

$$D = a + b \cdot C$$

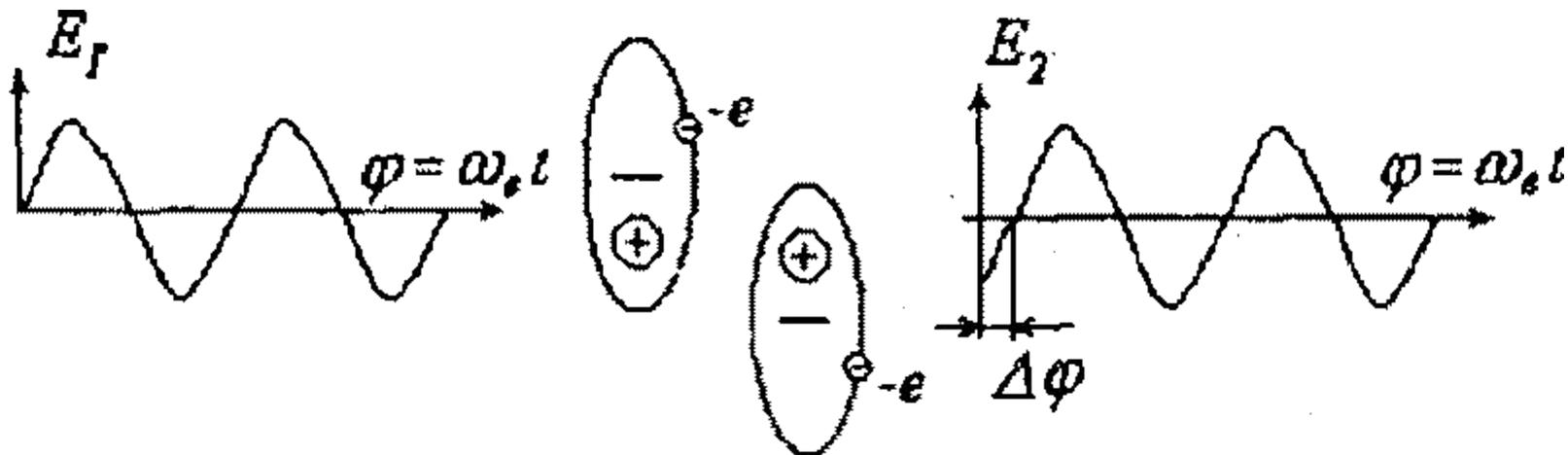
Концентрация раствора выражается как:

$$C = (D - a) / b,$$

где  $a$  и  $b$  – константы, определяемые по градуировочной характеристике.

# РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

**Резонансное поглощение** происходит при частотах, близких к собственным, энергия передается от действующего поля атомам вещества, и амплитуда их колебаний значительно возрастает. Заряженные частицы среды приводятся в колебательное движение электрическим полем действующей волны и повторно испускают свет той же частоты как у первичной волны.



# РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

При падении светового луча на вещество, энергия электромагнитных колебаний расходуется на возбуждение *вынужденных* колебаний электронной орбиты атомов

$$E_1 = E_m \sin \omega_e t$$

где  $E_1$  и  $E_m$  - текущая и максимальная напряженности электрического поля в электромагнитной волне,  $\omega$  - циклическая частота вынужденных колебаний.

$$E_2 = E_m \sin(\omega_e t - \Delta\varphi)$$

где  $\Delta\varphi$  - отставание фаза вынужденных колебаний электронных орбит относительно колебаний

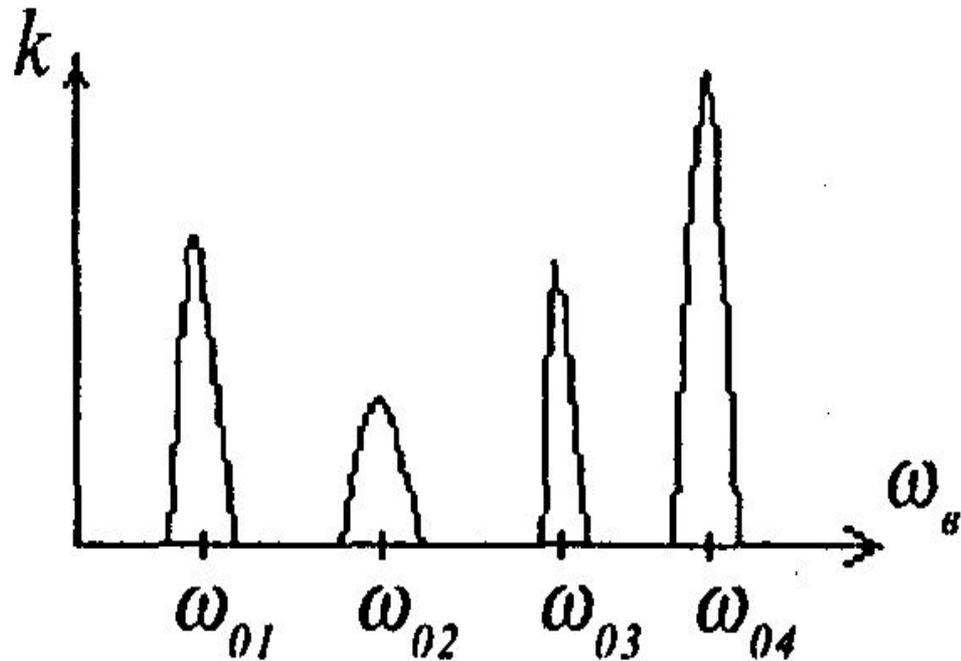
вынуждающей силы  $F_c = eE_1$ .

# РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

1. Электромагнитная волна, испускаемая переменным диполем, имеет частоту вынужденных колебаний, равную частоте вынуждающей силы. Изменений частоты света при переходе из одной среды в другую **не происходит**.
2. Отставание по фазе  $\Delta\varphi$  определяет задержку фазовой скорости света в среде относительно вакуума.
3. Если частота вынужденных колебаний совпадает с собственной частотой колебаний электронной орбиты атома, это сопровождается **резонансом** с резким увеличением поглощения энергии волны. Следовательно, зависимость коэффициента поглощения света  $k$  от его частоты **носит линейный характер**.

# РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

Величины  $\omega_{0i}$  – собственные частоты колебаний электронных орбит атомов вещества. Следующая характеристика называется **спектром**



на  
реакции,  
электронов и т.д.

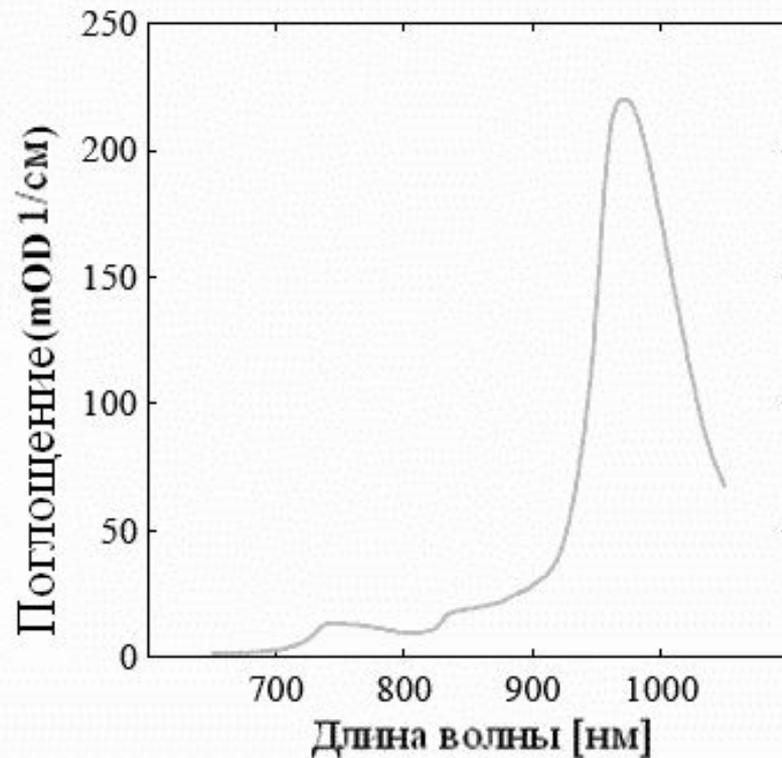
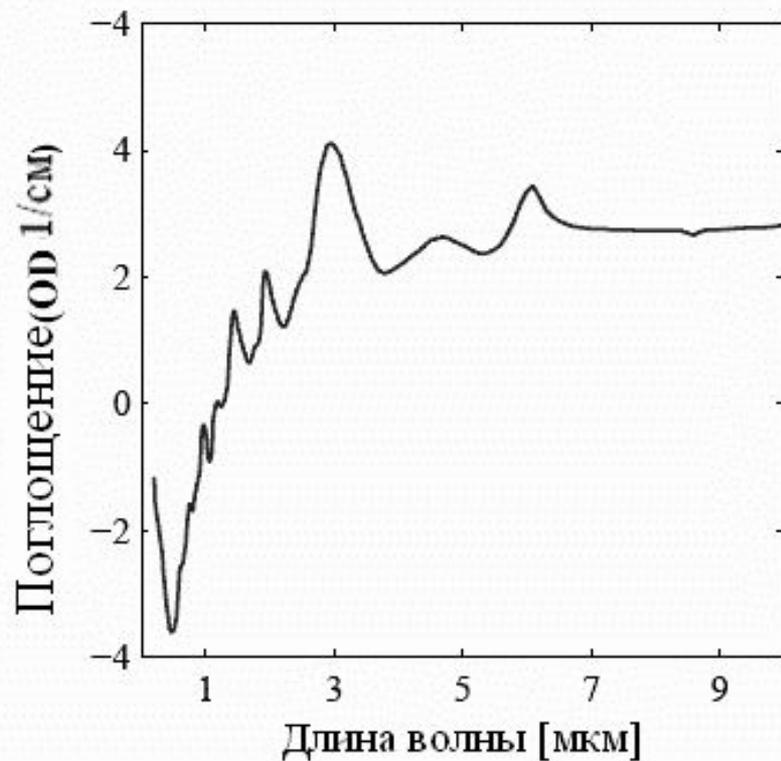
# ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ

- Есть много составляющих биологических тканей, поглощающих световое излучение, имеющих общее название **хромофоры тканей**, каждого из них имеет собственный уникальный спектр.
- **Полный коэффициент поглощения** смеси составов равен сумме их коэффициентов поглощения, с учетом их относительных концентраций. Поэтому, рассматривая ткань как гомогенную смесь составов, полное поглощение света в ткани для данной длины волны зависит от типа и концентрации имеющихся хромофоров.

# СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ ВОДЫ

- Вода - основное химическое вещество в человеческом теле, составляет 60 - 80% массы тела. Содержание воды меняется в зависимости от типа тканей и определяется возрастным и половым признаком. Например, у новорожденного мозг содержит до 90% массы воды, тогда как содержание воды во скелетной мышце взрослого составляет приблизительно 74%. Из-за ее высокой концентрации в большей части биологических тканей, вода является одним из самых важных хромофоров при измерениях спектроскопии тканей.
- Спектр поглощения воды показывают в диапазоне длин волн 200-10 000 нм и в увеличенном масштабе от 650 до 1050 нм. Между 200 и 900 нм существует область относительно низкого поглощения. Выше 900 нм коэффициент поглощения увеличивается довольно быстро до пика приблизительно в 970 нм.

# СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ ВОДЫ



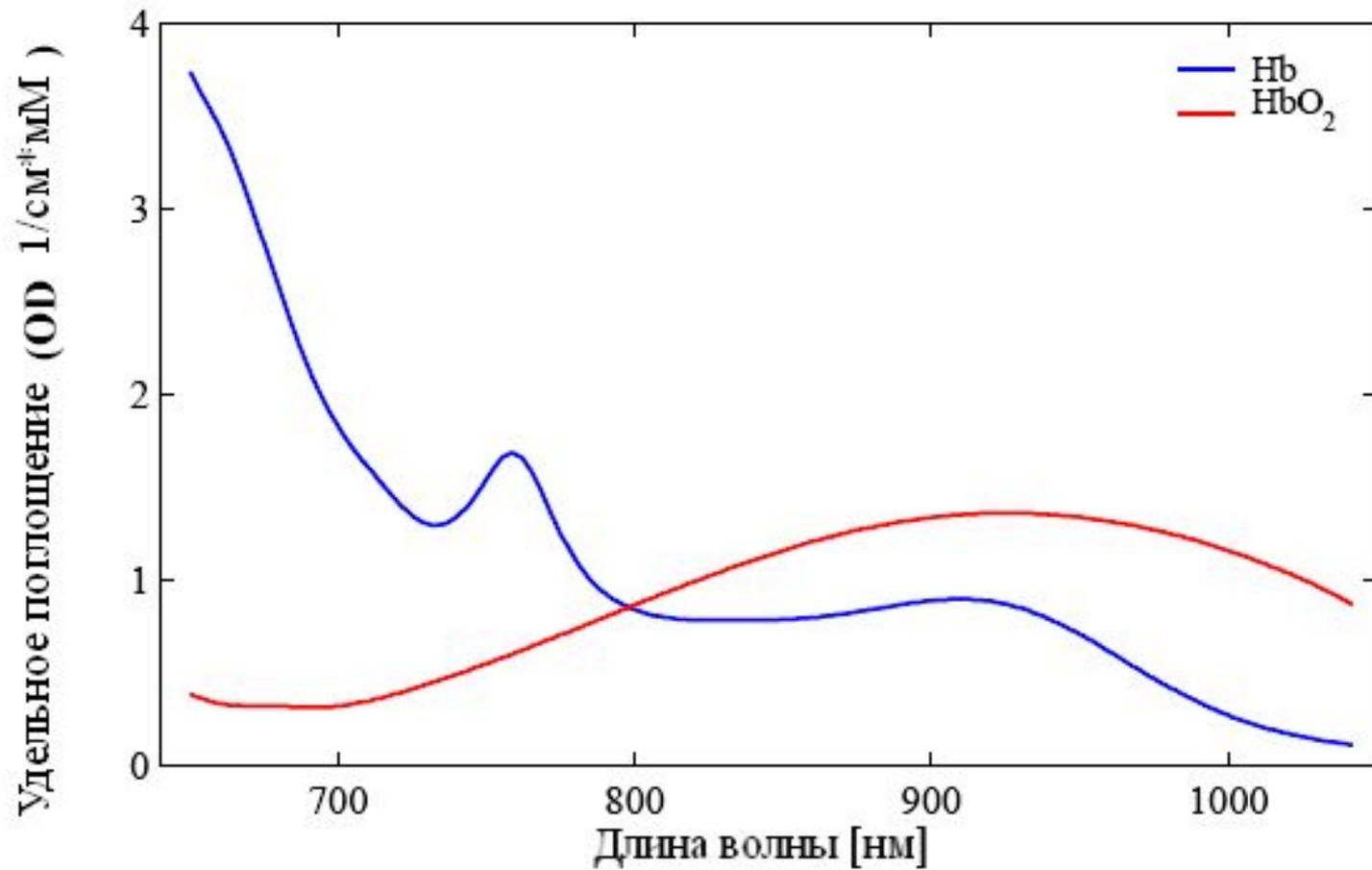
# ГЕМОГЛОБИН

- В окне прозрачности воды доминирует поглощение света близкого к инфракрасному **гемоглобином** в его различных формах.
- Гемоглобин содержится в эритроцитах и составляет приблизительно 40-45% цельной крови, обеспечивает перенос кровью кислорода от легких к тканям и транспорт углекислоты от тканей к легким. Другой функцией гемоглобина является поддержание кислотно-щелочного равновесия в организме.
- Молекула гемоглобина состоит из 1 молекулы простого белка **глобина** – белка типа альбуминов (содержит остатки аминокислот изолейцина и цистина) и 4 молекул железосодержащей небелковой группы – **гема**. Глобин придает гему способность связывать кислород. Гем обеспечивает устойчивость глобина к действию кислот, нагреванию, расщеплению ферментами и обуславливает его кристаллизацию. Молекула гемоглобина может нести четыре молекулы кислорода.

# ГЕМОГЛОБИН

- В крови здоровых мужчин содержится от 13 до 16% гемоглобина (145 г/л). В крови здоровых женщин содержится в среднем от 12 до 14% гемоглобина (130 г/л).
- Гемоглобин синтезируется клетками костного мозга. При разрушении эритроцитов, после отщепления гема гемоглобин превращается в желчный пигмент **билирубин**, который с желчью поступает в кишечник и после превращений выводится с калом.
- В норме гемоглобин содержится в виде 2-х физиологических соединений. Гемоглобин, присоединивший кислород, превращается в **оксигемоглобин** — **HbO<sub>2</sub>**. Оксигемоглобин, отдавший кислород, называют **восстановленным (деоксигемоглобином)** — **Hb**.
- Удельные спектры поглощения **окси- и деоксигемоглобина**, показанные на слайде, значительно отличаются, особенно в красной области видимого и инфракрасного света.

# ГЕМОГЛОБИН



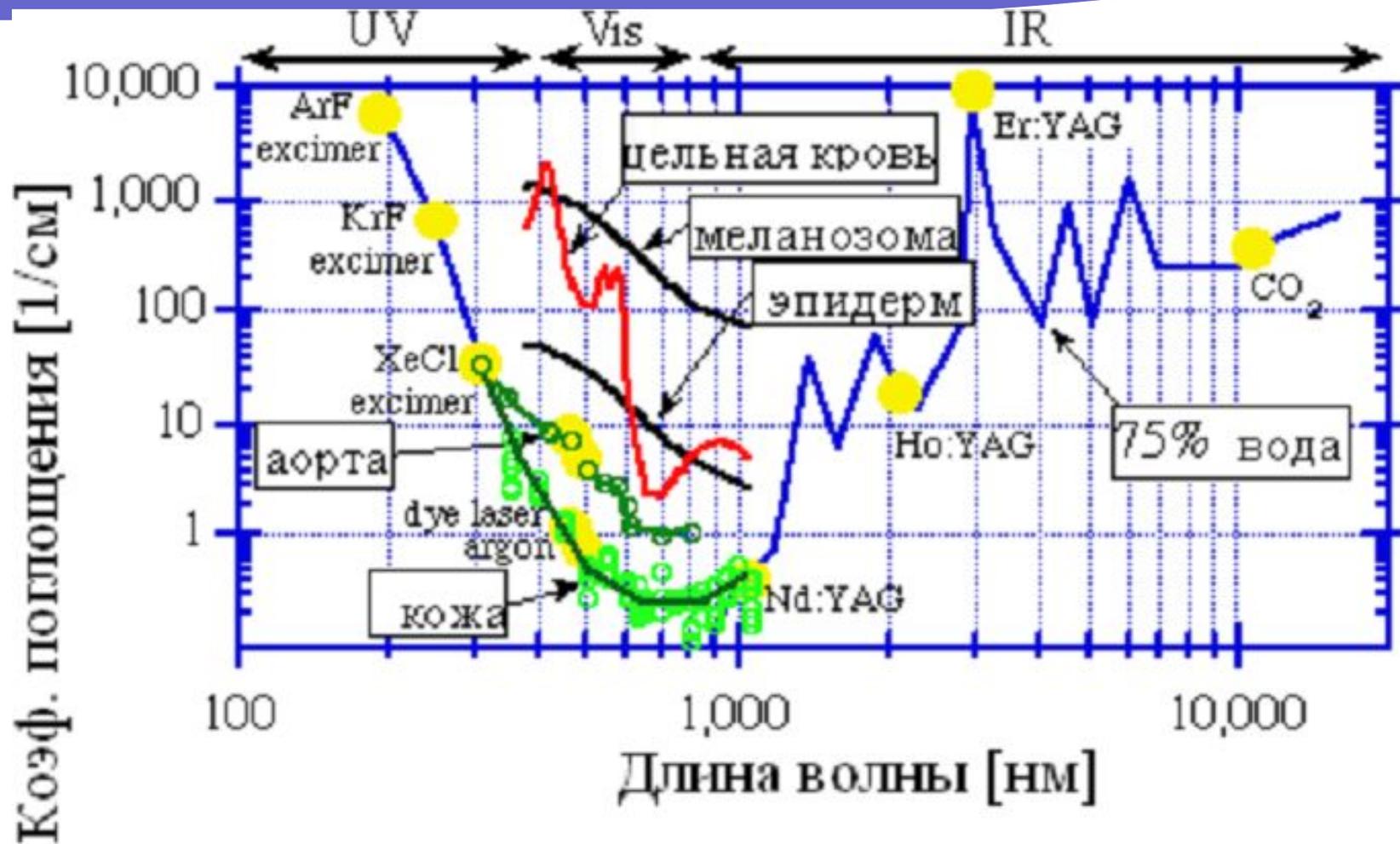
# ГЕМОГЛОБИН

- Это различие в поглощении объясняет видимые цветовые различия между венозной и артериальной кровью. Артериальная кровь, которая у взрослых обычно на 98% насыщена кислородом, ярко-красная, тогда как венозная кровь, у которой насыщение приблизительно 75%, выглядит темно-красной или фиолетовой.
- Хотя спектральные поглощательные способности для инфракрасного света имеют меньшие амплитуды чем в видимом диапазоне, спектры достаточно отличаются, чтобы различить две формы гемоглобина.

# МЕЛАНИН И МИОГЛОБИН

- Важные хромофоры тканей: меланин и миоглобин.
- У **меланина**, пигмента, содержащегося в эпидермальном слое кожи человека, большой коэффициент рассеивания в УФ-диапазоне, он защищает кожу от разрушительной солнечной радиации; и значительный коэффициент поглощения красного УФ. Не зависящий от кислородонасыщения ткани, вклад меланина в полное ослабление света значителен.
- **Миоглобин**, содержащийся в клетках скелетных мышц, является красным пигментом, связывающим кислород, подобно гемоглобину в эритроцитах и со схожим спектром поглощения красного УФ.
- Миоглобин намного менее чувствителен к кислородонасыщению ткани, чем гемоглобин и кислородный транспорт должен значительно уменьшиться, прежде чем изменится спектр поглощения миоглобина

# СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ



# РАССЕЯНИЕ СВЕТА

**Рассеяние света** происходит при нерезонансных частотах, т.е. интенсивности рассеивания относительно невелики по сравнению с амплитудами вынужденных колебаний частиц при собственном резонансе. В большинстве жидкостей и твердых тел, однако, межмолекулярные взаимодействия расширяют частоты поглощения, так что рассеяние и поглощение света происходят для всех длин волн

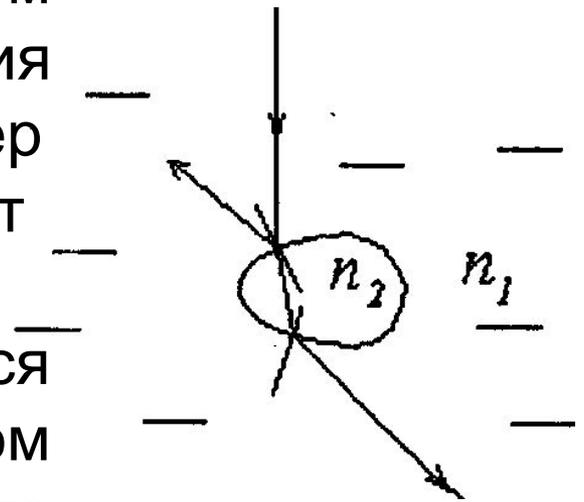
# РАССЕЯНИЕ СВЕТА

- Если в прозрачной среде с показателем преломления  $n_1$  имеются неоднородности (частицы) с иным показателем преломления  $n_2$ , чем основная среда, то световой луч отклоняется от своего первоначального направления и делится на множество лучей. Наблюдается рассеяние света.
- В зависимости от соотношения между размерами частиц и длиной волны падающего света различают три области рассеяния.

# ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ

**Геометрическое рассеяние** – это рассеяние, обусловленное в основном законами отражения и преломления света. Оно наблюдается, если размер частиц  $\Delta$  значительно превышает длину волны света  $\lambda$  ( $\Delta \gg \lambda$ ).

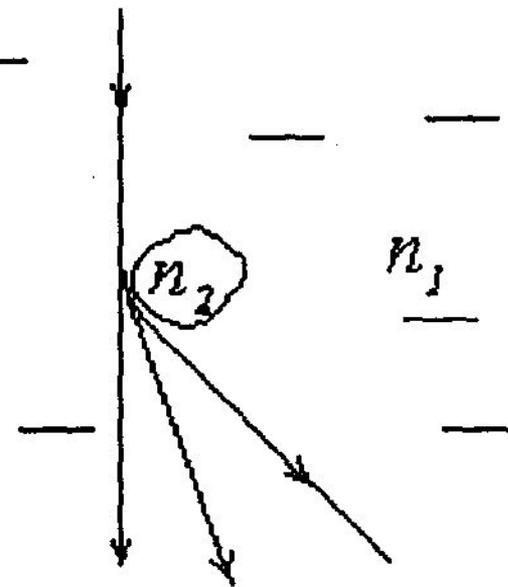
Например, в растворе находятся крупные коллоидные частицы. В этом случае интенсивность рассеянного света изменяется обратно пропорционально квадрату длины волны.



$$I_{scat} \sim \frac{1}{\lambda^2}$$

# ДИФРАКЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ

Если размеры частиц соизмеримы с длиной волны света  $\Delta \sim \lambda$  то основным явлением, вызывающим рассеяние, является дифракция света на частицах примеси. Это так называемое **дифракционное рассеяние**. При этом происходит как изменение направления светового луча, так и деление его интенсивности по различным порядкам дифракционных максимумов



# РАССЕЯНИЕ РЕЛЕЯ

Если частицы значительно меньше длины волны света, то есть ( $\Delta \ll \lambda$ ), интенсивность рассеянного света подчиняется **закону Рэлея**. В этом случае рассеяние связано в основном с взаимодействием квантов света с атомами и молекулами вещества. Интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны.

$$I_{scat} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

# РАССЕЯНИЕ РЕЛЕЯ

В случае однократного рассеяния, следовательно, существует новое экспоненциальное соотношение для интенсивности рассеивающегося пучка света  $I$ , в зависимости от исходной интенсивности  $I_0$ , прошедшего расстояние  $d$  в поглощающей среде при однократном рассеянии

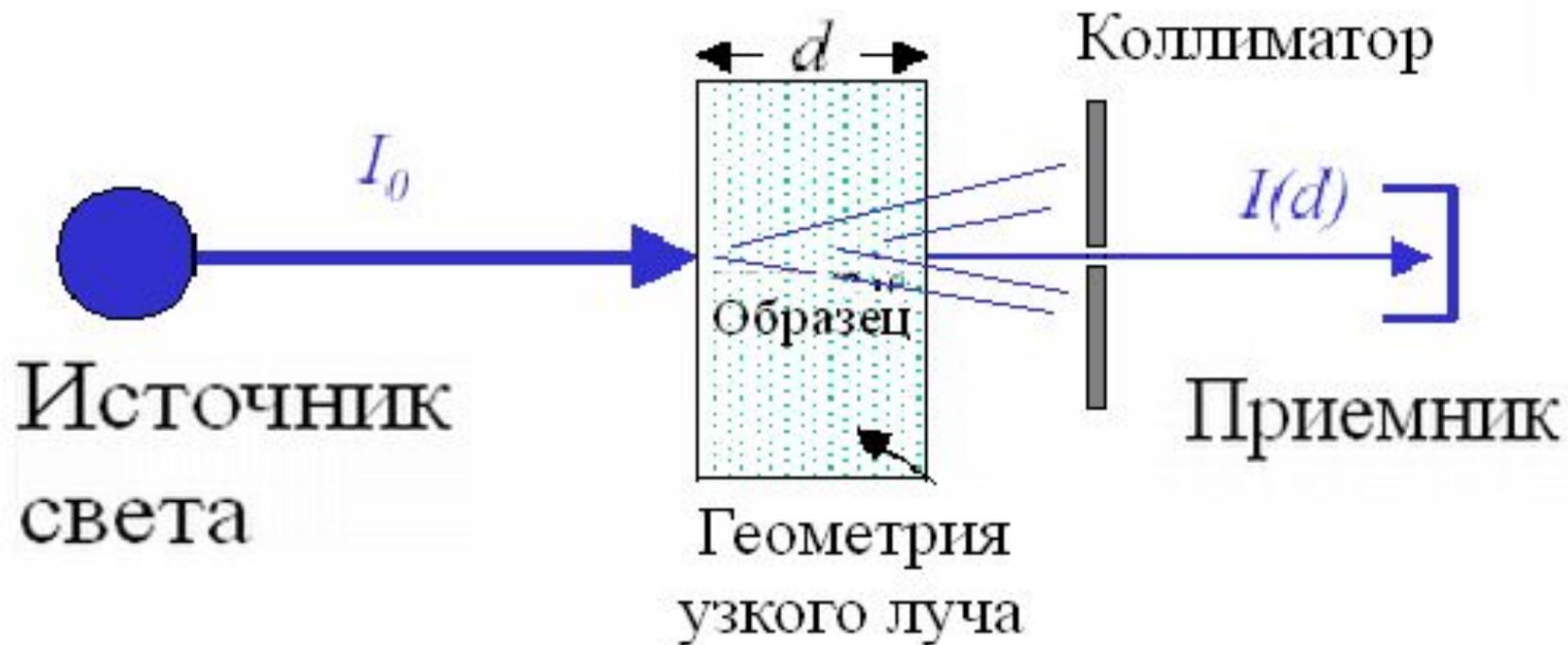
$$I = I_0 \cdot e^{-k_t \cdot d}$$

где  $k_t$  - полный показатель ослабления, найденный как

$$k_t = k_a + k_s$$

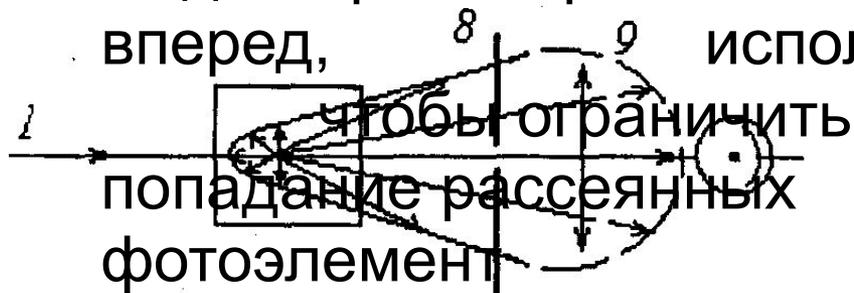
and  $k_s$  - показатель рассеяния.

# РАССЕЯНИЕ РЕЛЕЯ



# ТУРБИДИМЕТРИЯ

- Нефелометрия и турбидиметрия – это методы определения концентрации частиц в коллоидном или суспендированном, содержащем дисперсные непрозрачные частицы, делающие среду мутной.
- Метод измерения концентрации суспензии в проходящем свете называется **турбидиметрией**. Главная задача - выделить лучи, не взаимодействовавшие с частицами раствора. Индикатриса рассеяния  $\theta$  сильно вытянута вперед,



лучей на

# НЕФЕЛОМЕТРИЯ

- В **нефелометрии** проводят измерение интенсивности света 3, рассеянного в кювете с исследуемым раствором 4, перпендикулярно падающему лучу 1. Рассеяние идет на частицах 2 во все стороны, поэтому для регистрации фотоэлементом 6 используется лишь незначительная часть рассеянного света, который собирается линзой 5. Это ограничивает чувствительность метода.

