

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»**

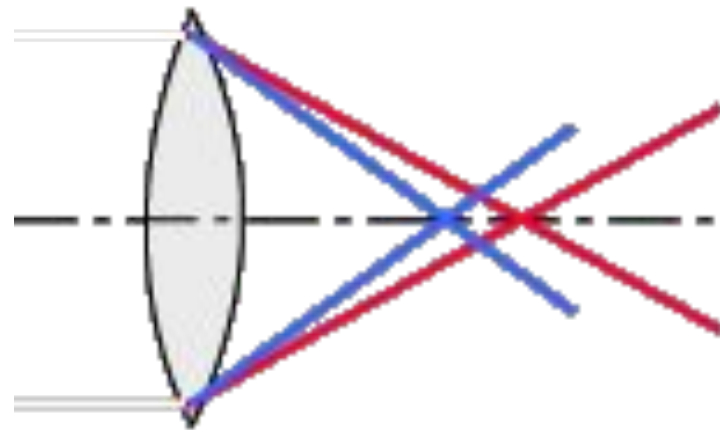
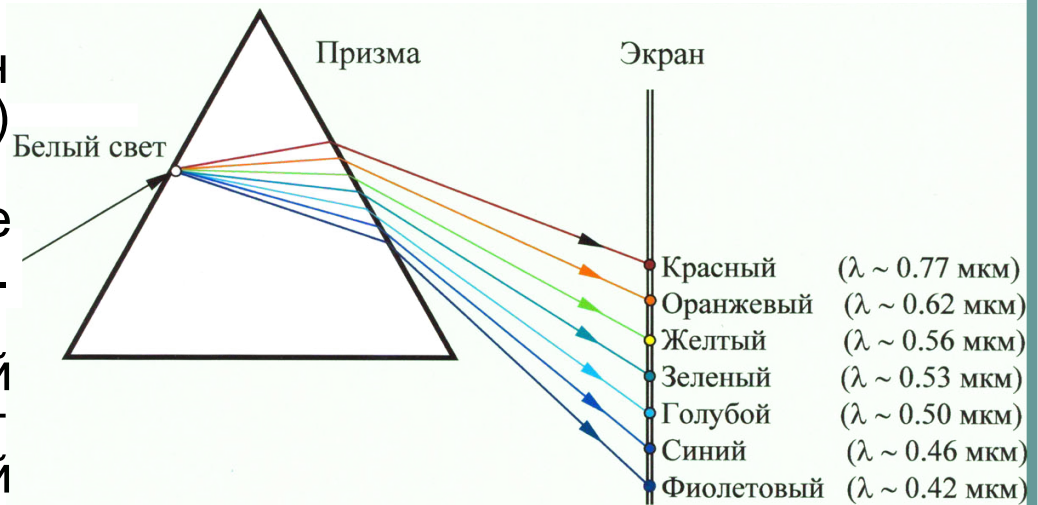
ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

- **Дисперсией света** называют явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества n от длины световой волны λ .
- 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 aberrацию 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.

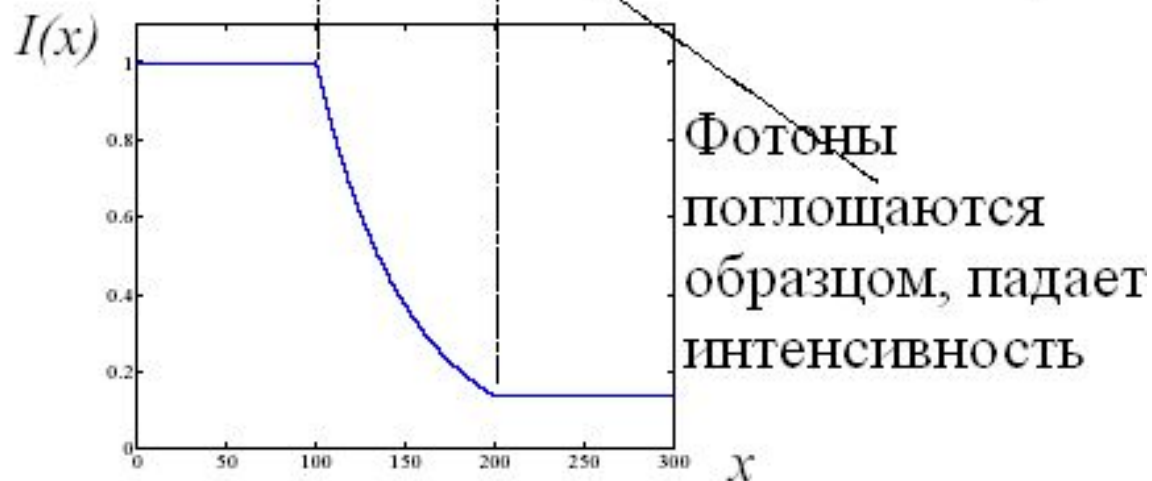
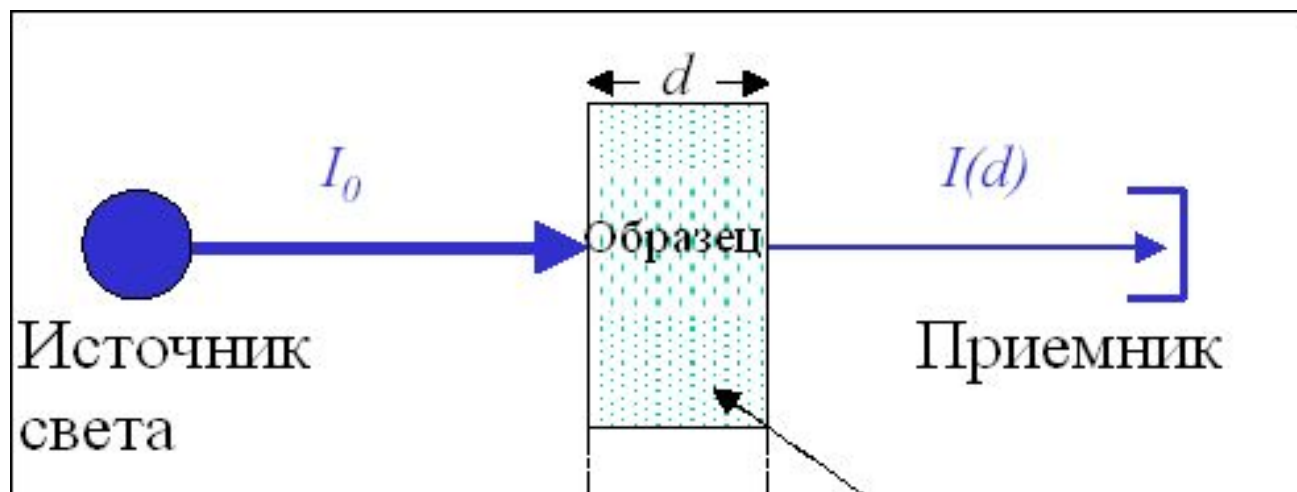
линия Фраунгофера	Цвет	Длина волны, нм	Прозрачное крон	Сверхплотное флинт
F	голубой(водород)	486.1	показатель преломления	
D	желтый(натрий)	589.3	1.5293	1.7378
C	красный(водород)	656.3	1.5230	1.7200
			1.5204	1.7130
$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = \text{число Аббе}$			v	
			59	29

- Малые значения v соответствуют большой дисперсии.

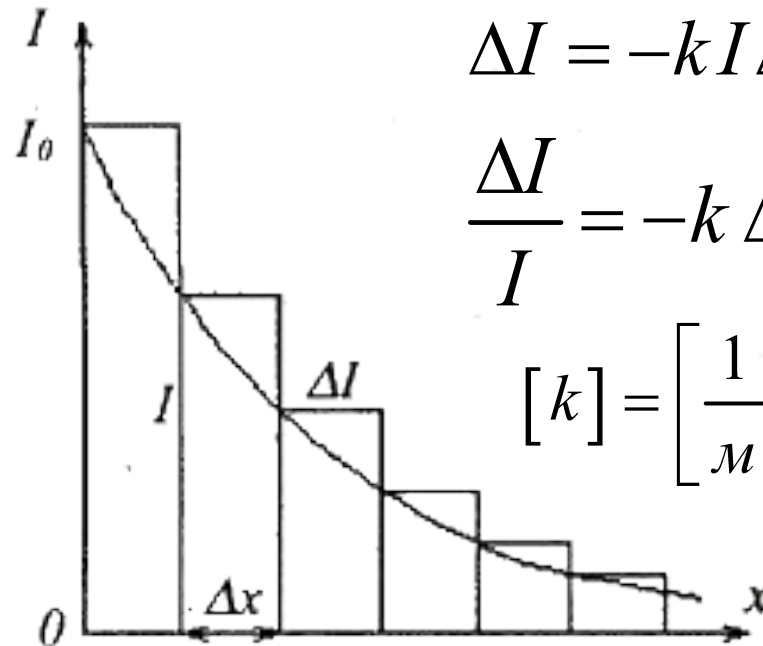
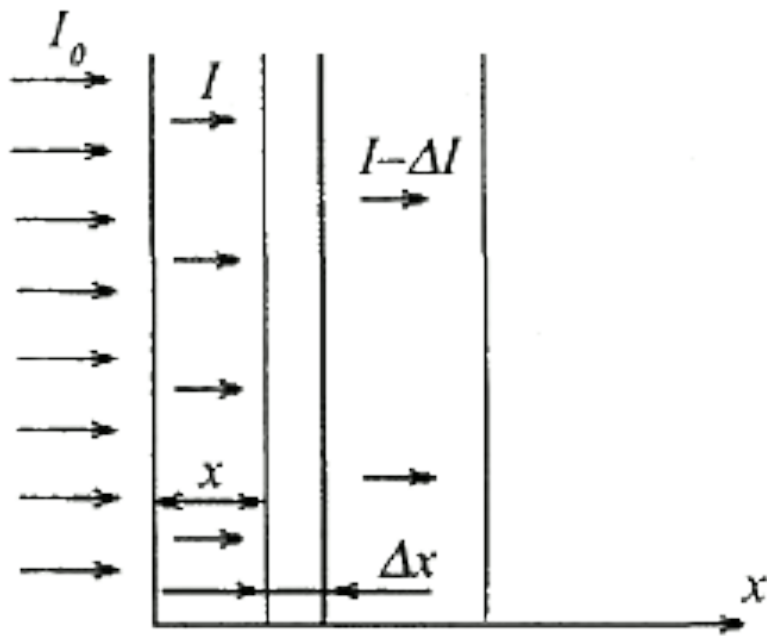
ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

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

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/I интенсивности I для постоянной k_λ , 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_λ - показатель поглощения, зависящий от свойств вещества и длины волны λ (частоты падающего света).

Интенсивность света уменьшается в геометрической прогрессии, если толщина слоя увеличивается в арифметической прогрессии. k_λ - 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 α_λ - мономатический коэффициент поглощения соответствующий концентрации вещества. α'_λ - 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_λ 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 Φ_0 проходящего через растворитель или контрольный раствор, и потока Φ_1 проходящего через исследуемый раствор. В колориметре световые потоки Φ_0 и Φ_1 преобразуются в электрические сигналы U_0 и U_1 , регистрируемые гальванометром как коэффициент передачи (τ), оптическая плотность (D) или концентрация.

КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ КОЛОМЕТРИЯ

- Коэффициент пропускания изучаемого раствора

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

- Оптическая плотность:

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

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

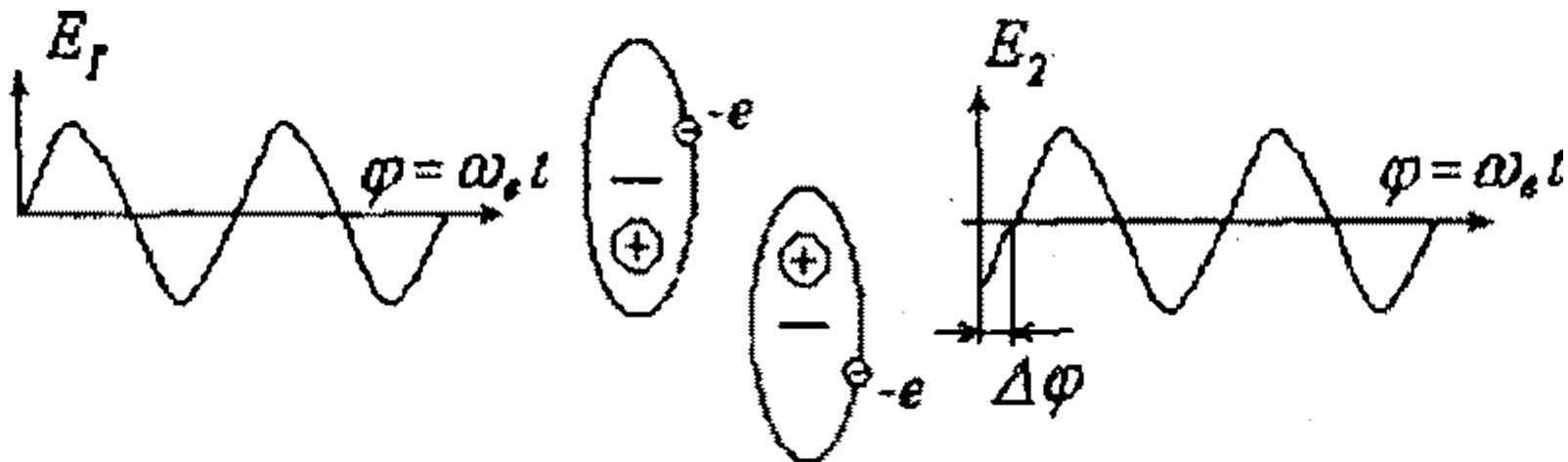
Концентрация раствора выражается как:

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

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, ω - 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

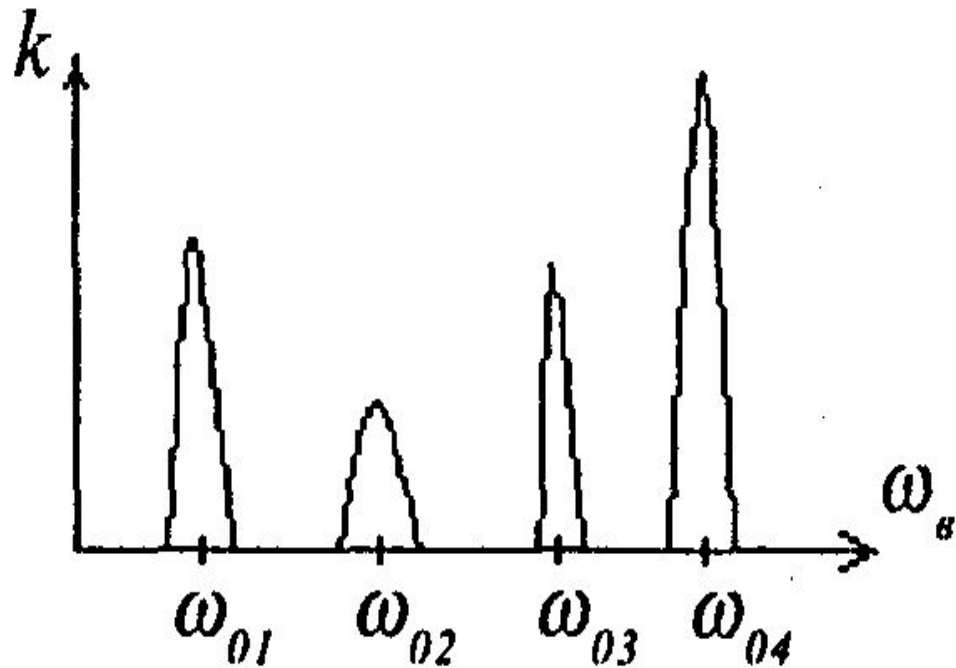
вынуждающей силы $F_c = eE_1$.

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 ω_{0i} – собственные частоты колебаний электронных орбит атомов вещества. Следующая характеристика называется **спектром**



на
реакции,
электронов и т.д.

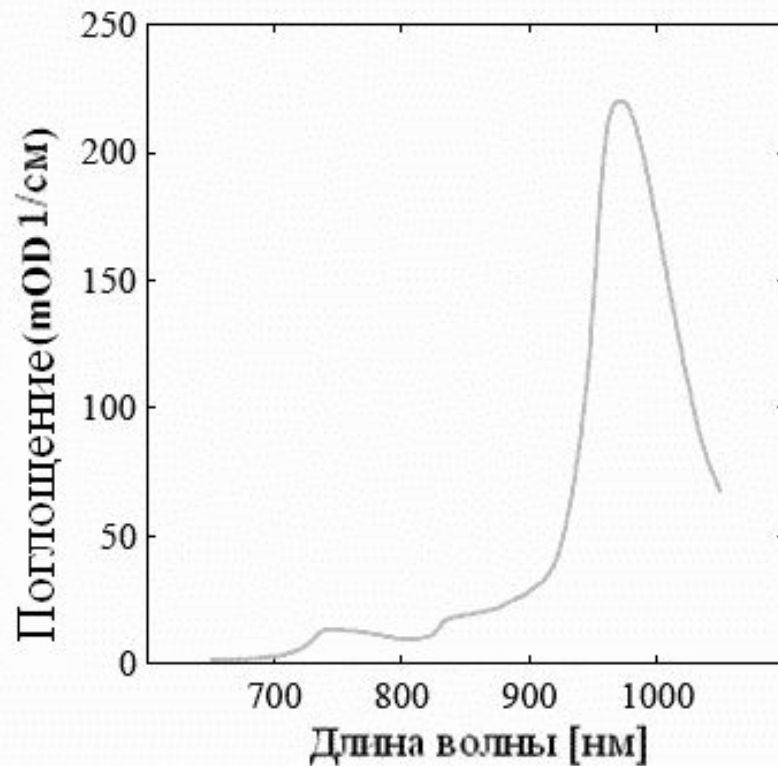
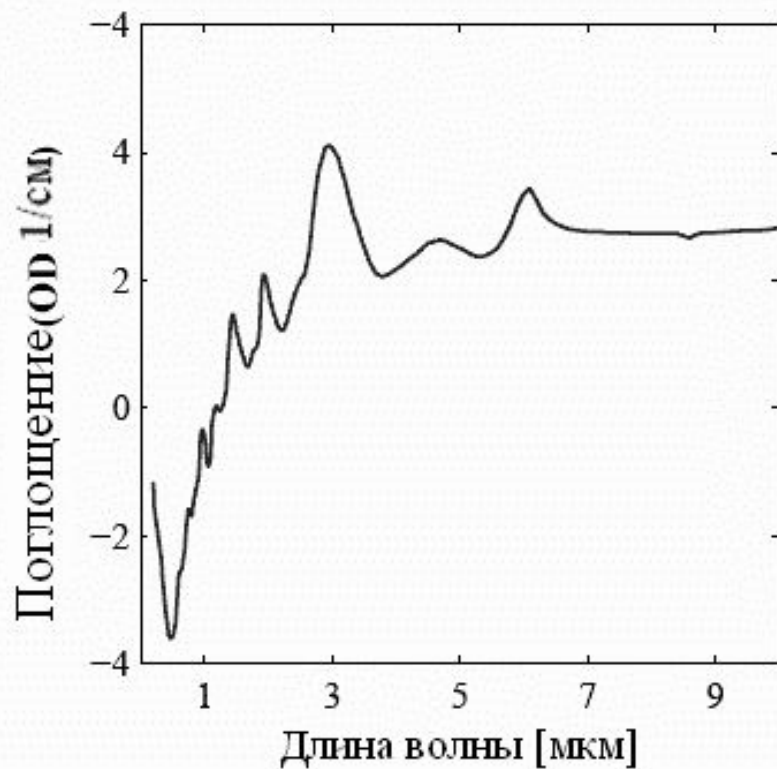
ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ

- 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



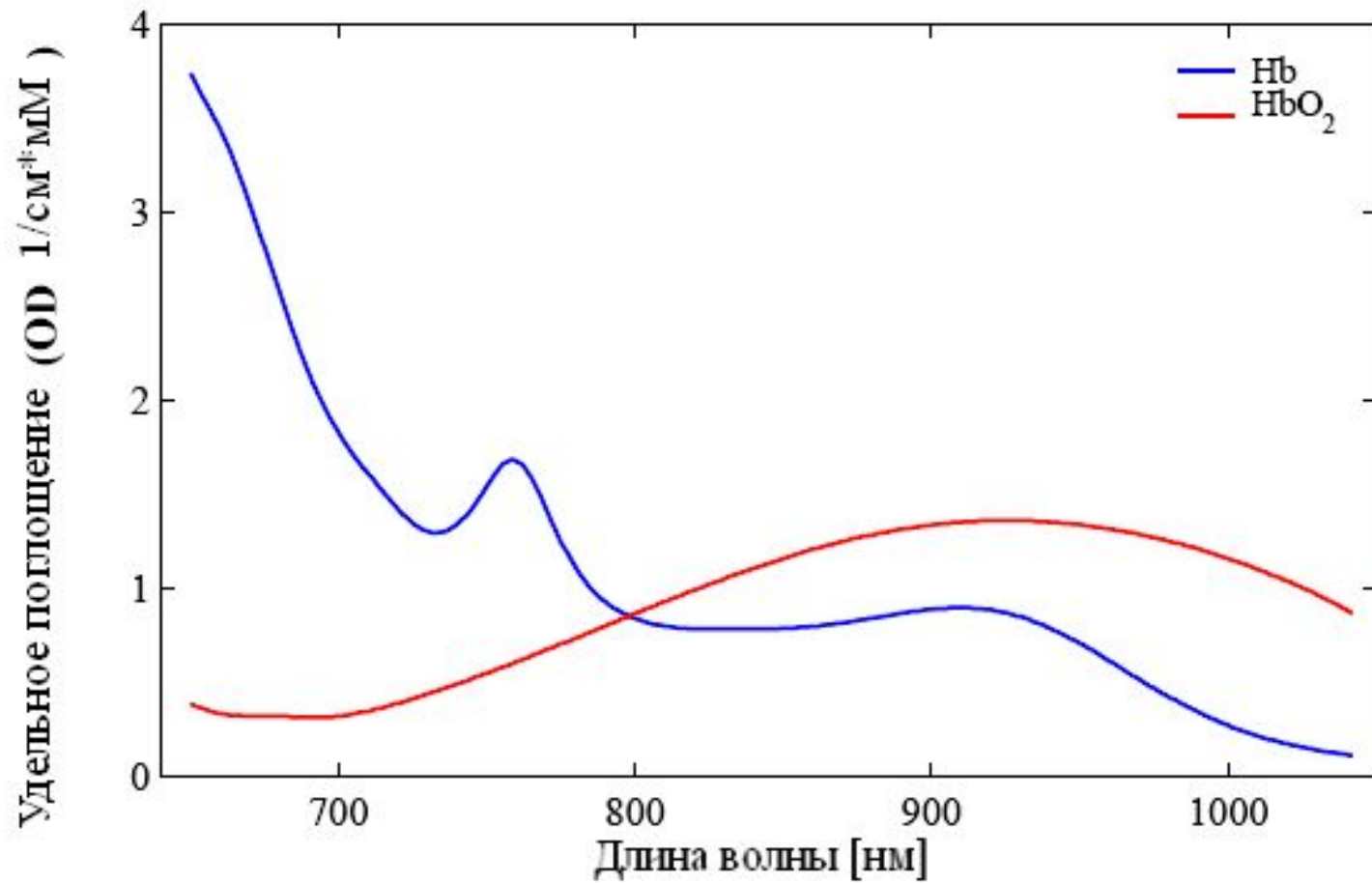
ГЕМОГЛОБИН

- 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** — **HbO₂**. 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



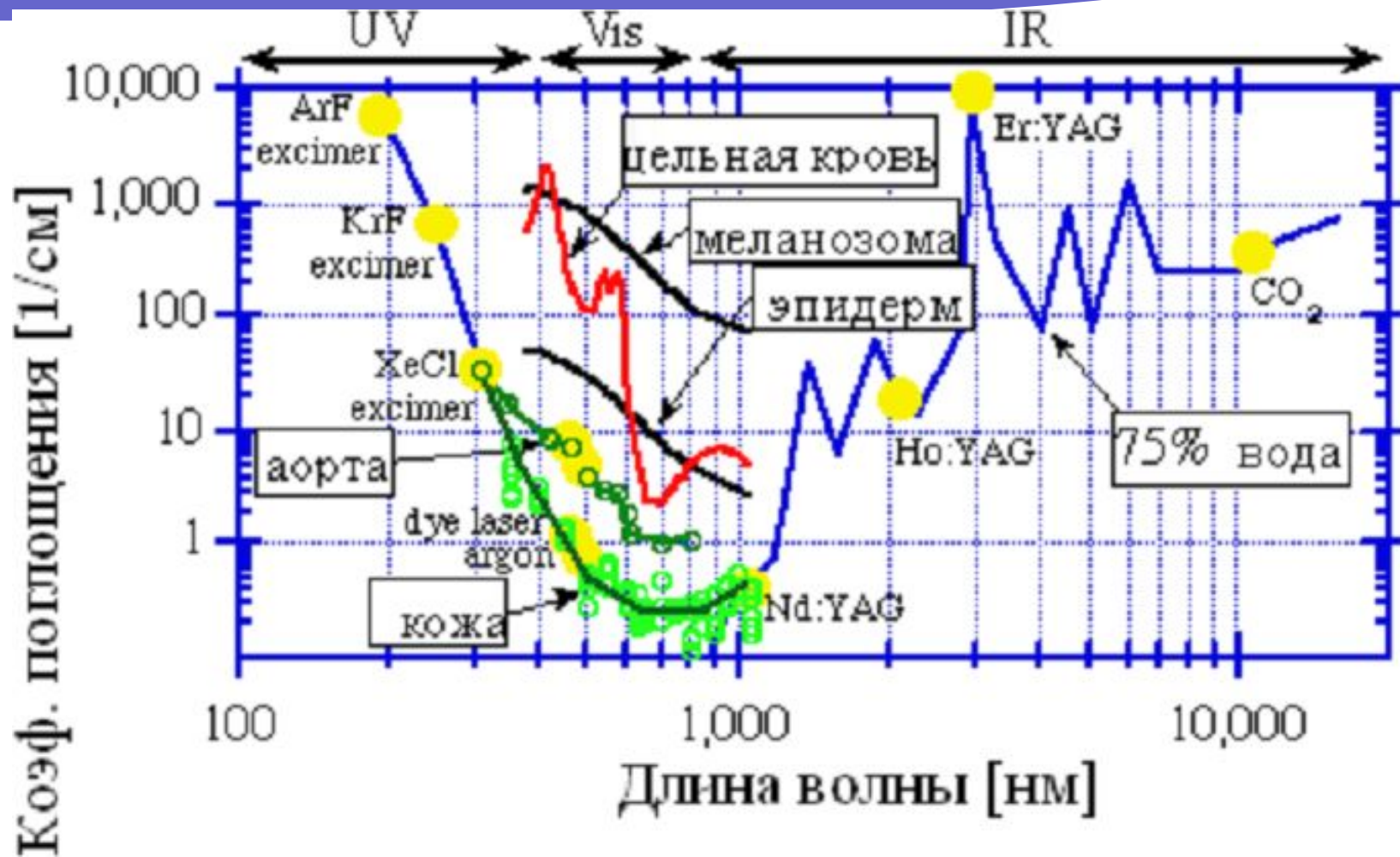
ГЕМОГЛОБИН

- 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

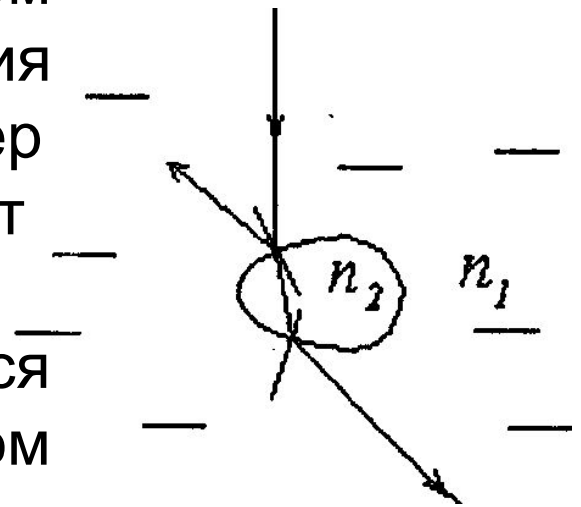
РАССЕЯНИЕ СВЕТА

- 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 Δ значительно превышает длину волны света λ ($\Delta \gg \lambda$).

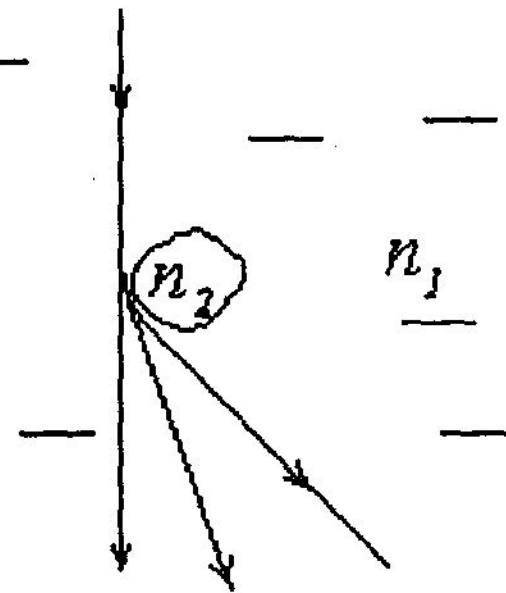
Например, в растворе находятся крупные коллоидные частицы. В этом случае интенсивность рассеянного света изменяется обратно пропорционально квадрату длины волны.



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

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

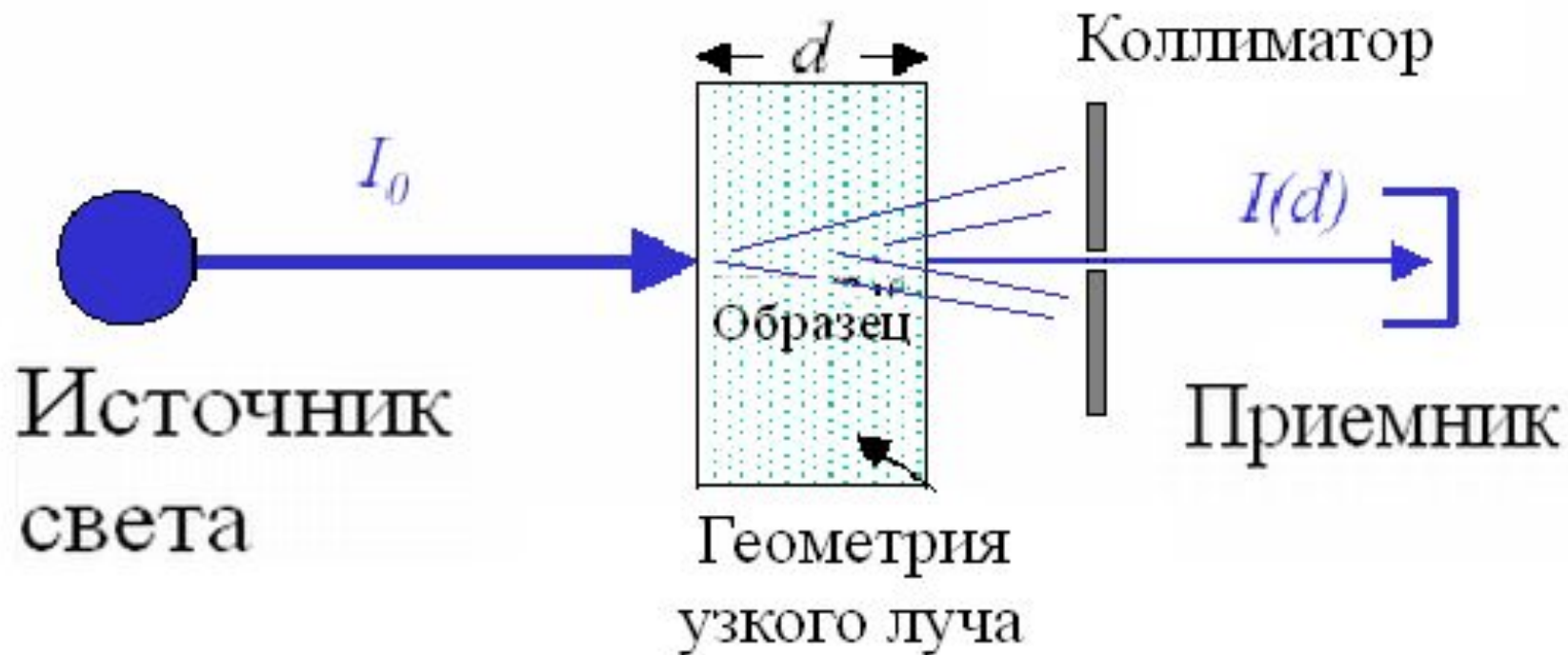
$$I = I_0 \cdot e^{-k_t \cdot d}$$

где k_t - полный показатель ослабления, найденный как

$$k_t = k_a + k_s$$

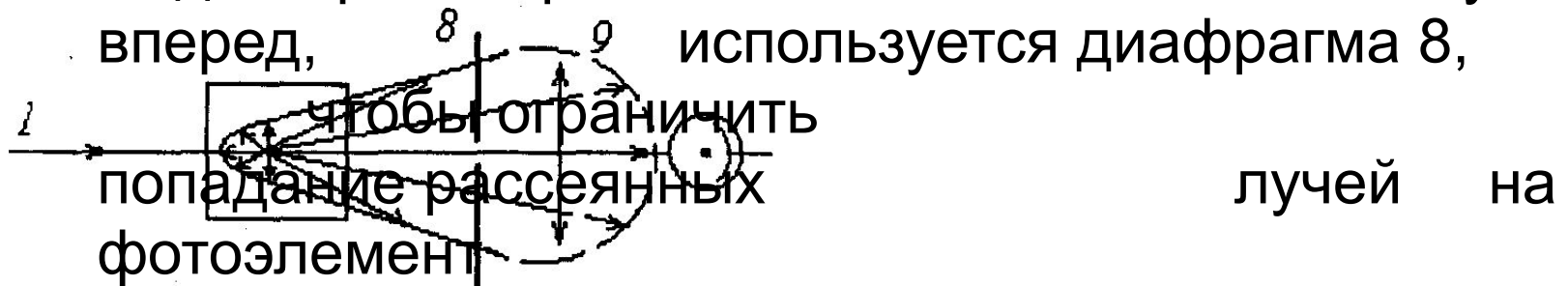
and k_s - показатель рассеяния.

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 θ сильно вытянута вперед,



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.

