

# СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ: новые грани света

## Лекция 10

### ЛАЗЕРЫ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Действие лазерного излучения на биоткань. Тепловые, фотохимические и нелинейные процессы. Типы лазеров, применяющихся в медицине. Лазерная диагностика. Лазерная терапия. Лазерная хирургия. Лазерный пинцет.

## Лазерное излучение в биологии и медицине

Традиционная фотобиология с использованием обычных (тепловых) источников света развивалась давно. Понимание процессов фотосинтеза растений и бактерий, выяснение природы зрения, фотопериодических явлений и пр. было достигнуто при помощи именно тепловых источников света. Есть свидетельства о том, что еще в Древнем Египте и Индии тысячи лет назад применялась фототерапия с помощью солнечного света и лекарственных препаратов растительного происхождения. Постепенно сформировались три направления: диагностика, терапия и хирургия.

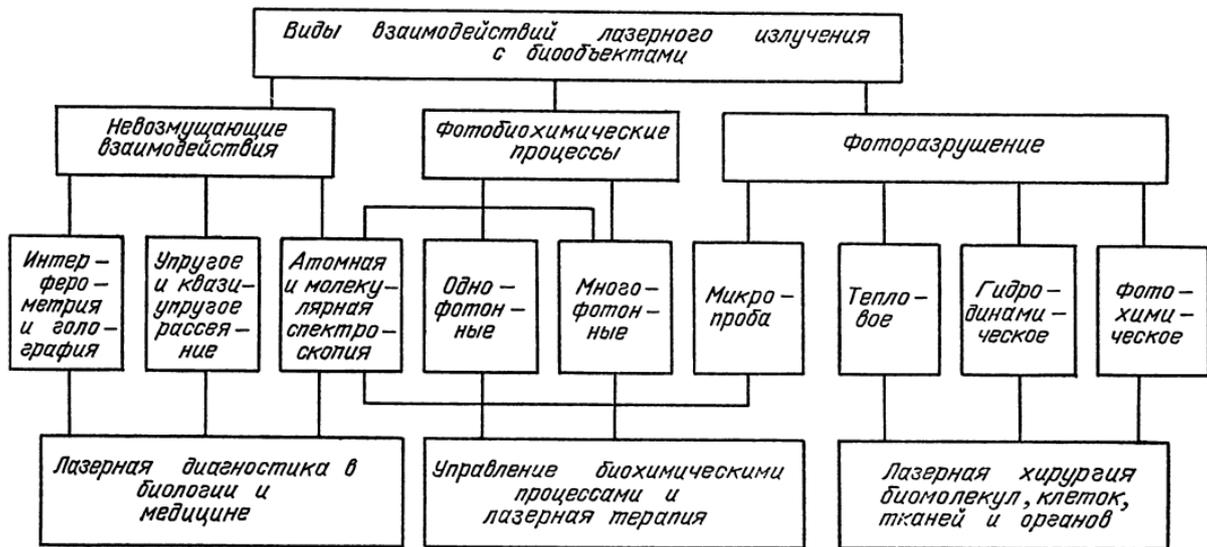
Появление лазера позволило поднять исследования на новый уровень, стимулировало постановку и решение проблем, которые раньше не ставились или решались косвенным путем.

Излучение лазерных источников обладает высокой степенью монохроматичности (временной когерентности) пространственной когерентности, направленности, поляризованности, интенсивности и яркости, сверхкороткой длительностью импульсов и перестраиваемостью длины волны.

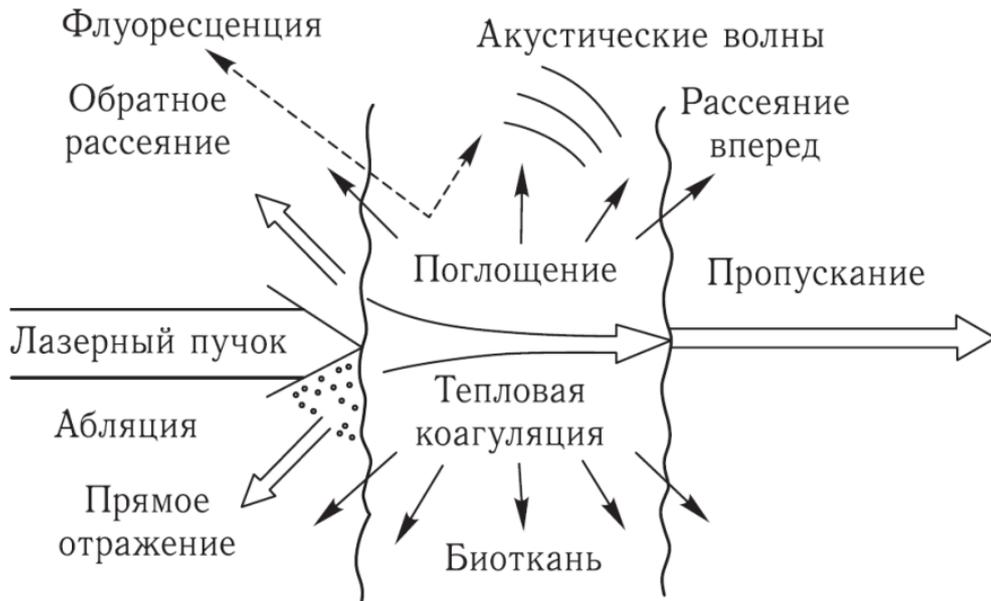
## Сравнение тепловых и лазерных источников света

Характеристика	тепловой источник	лазерный источник
<p>Монохроматичность <math>\delta\nu/\nu</math> или высокая спектральная плотность мощности <math>I/\delta\lambda</math>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- спектральный анализ</li> <li>- селективное возбуждение</li> <li>- голографические и интерферометрические методы</li> </ul>	<p><math>1,3 \cdot 10^{-4}</math> Вт/(нм см<sup>2</sup>) солнечный свет</p>	<p><math>1,7 \cdot 10^{-9}</math> <math>2,6 \cdot 10^7</math> Вт/(нм см<sup>2</sup>) P=1 Вт, <math>\delta\nu=1</math> МГц, d=4 мм, <math>\lambda=500</math> нм</p>
<p>Временная когерентность и длина когерентности <math>l=c\tau_k \approx c/\delta\nu</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- томография</li> </ul>	<p>3 см</p>	<p><math>3 \cdot 10^4</math> см</p>
<p>Пространственная когерентность, расходимость <math>\theta</math> (возможность фокусировки)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- min площадь воздействие</li> </ul>	<p><math>2\pi</math> рад</p>	<p><math>10^{-3}</math> рад</p>
<p>Сверхкороткая длительность импульсов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- молекулярная диагностика</li> </ul>	<p><math>\sim 10^{-9}</math> с</p>	<p><math>\sim 8 \cdot 10^{-15}</math> с</p>
<p>Спектральная яркость</p> <p><math>B_\nu = P/(\delta\nu \pi^2 w^2 \theta^2)</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- локализация вклада энергии</li> </ul>	<p><math>10^{-10}</math> Вт/(см<sup>2</sup> ср Гц) дуговая лампа, 1 кВт</p>	<p>1 Вт/(см<sup>2</sup> ср Гц) Ar лазер, 10 Вт</p>

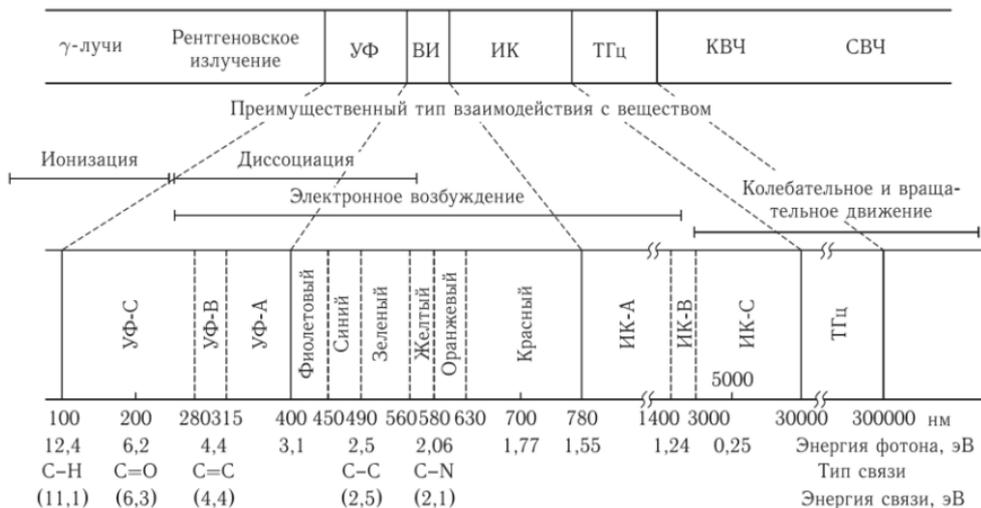
# Применения лазеров в биологии и медицине



# Виды взаимодействия лазерного излучения с биотканью



# Специфика взаимодействия света с биообъектами



Разнообразие процессов взаимодействия света (диапазон от УФ до ИК) с молекулами (диссоциация, электронное возбуждение, колебательное или вращательное возбуждение) обуславливает большую его специфичность по отношению к биологическим системам, чем рентгеновое и  $\gamma$ -излучение или излучение радиодиапазона. Действие фотонов малых энергий (дальнее ИК и терагерцовое излучение, излучение крайне высоких частот (КВЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ) радиодиапазона) сводится, в основном, к тепловому. Фотоны рентгеновского и более коротковолнового излучения могут с одинаковой эффективностью ионизировать любую молекулу.

# Виды взаимодействия света с молекулами

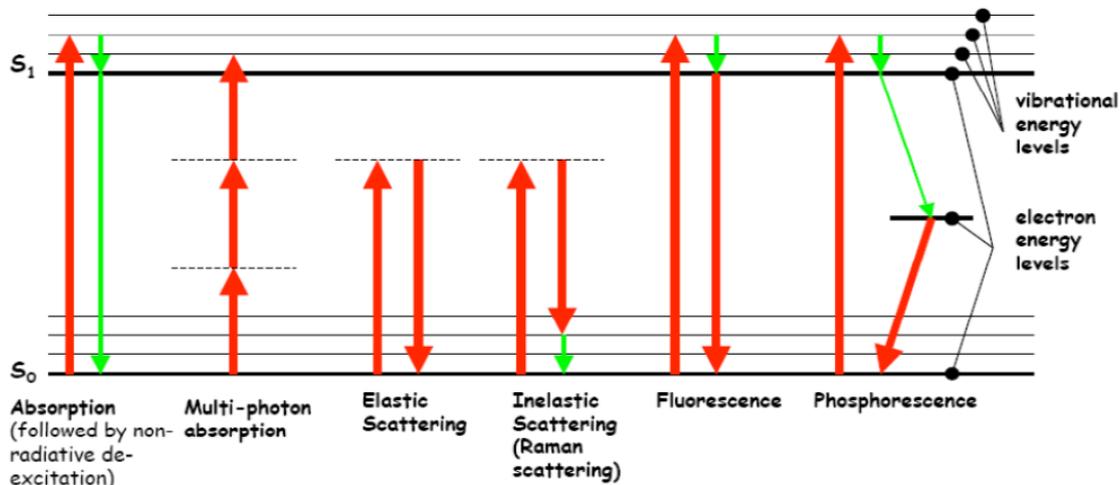
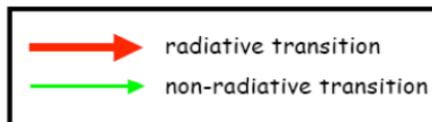
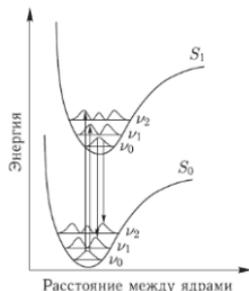
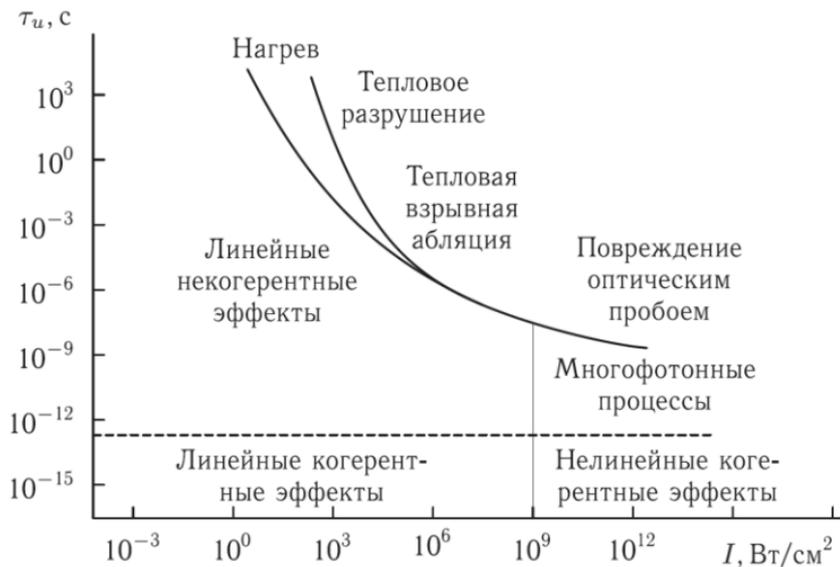


Диаграмма энергетических состояний взаимодействия света с молекулами (Яблонского)

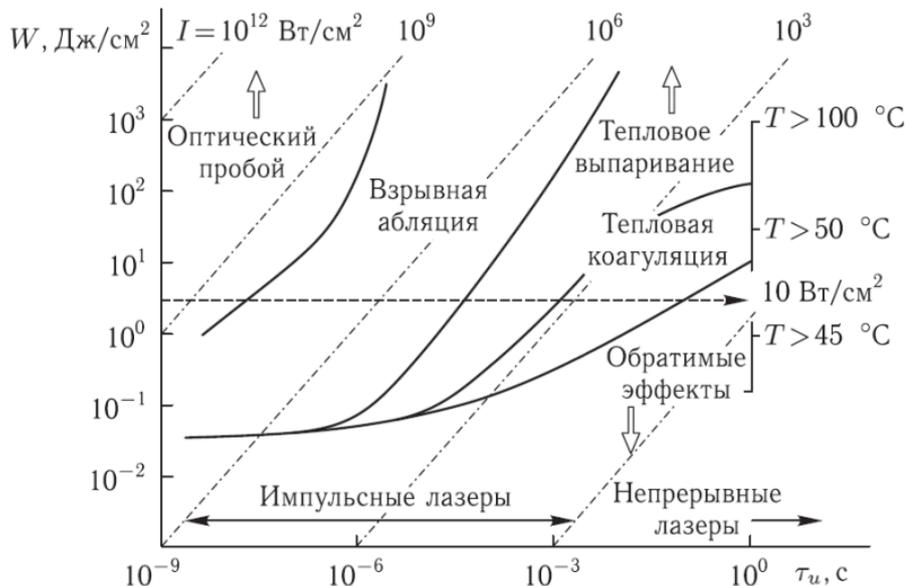


# Типы воздействия лазерного излучения на биообъекты



Лазерное излучение умеренной интенсивности оказывает неспецифическое тепловое, а высокой интенсивности – разрушающее (деструктивное) действия на биообъекты, т. е. проявляет себя как электромагнитное излучение любой другой природы.

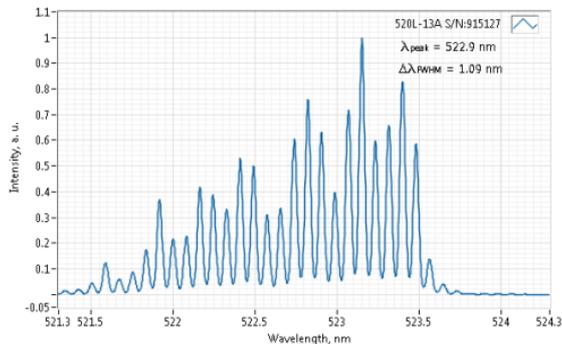
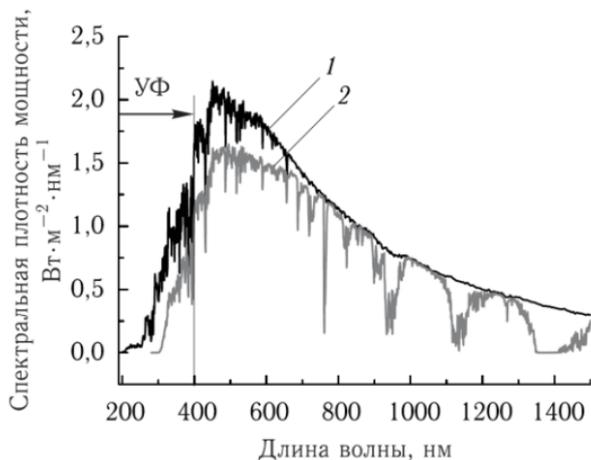
# Типы воздействия лазерного излучения на биообъекты



(пунктирная линия соответствует дозе облучения около 3 Дж/см<sup>2</sup>)

Поскольку мы имеем дело с живыми объектами, то помимо физико-химических проявлений светового излучения необходимо учитывать влияние света на функционирование живой материи, определяющееся степенью гомеостаза живого объекта.

# Оценка порога воздействия



Ориентировочно можно считать пороговыми значениями для низкоинтенсивного излучения параметры Солнца. Интегральная плотность мощности излучения Солнца в зените в диапазоне 250 – 2500 нм составляет  $85 \text{ мВт/см}^2$ , а спектральная плотность в максимуме кривой излучения ( $\lambda=500 \text{ нм}$ ) –  $0,15 \text{ мВт}/(\text{см}^2\text{нм})$

Пучок излучения непрерывного диодного лазера мощностью 1 мВт, диаметром 1 мм и шириной спектра излучения 1 нм на длине волны  $\lambda=523 \text{ нм}$ , имеет спектральную плотность мощности  $130 \text{ мВт}/(\text{см}^2\text{нм})$

## Специфика живых объектов

Для взаимодействия света с биологическими объектами являются важными:

время облучения

режим облучения (непрерывный или импульсный)

периодичность и длительность процессов.

В этом также может проявить себя гомеостазная природа живой материи. В зависимости от длины волны и интенсивности света пороговая длительность облучения, при которой начинают происходить морфологические изменения, может быть весьма различной для одного и того же объекта, т. е. для живого объекта произведение интенсивности на время облучения не является константой.

В зависимости от периодичности световых импульсов возможны резонансные явления в области частот, соответствующих периоду колебаний фотоотклика биологических систем, который изменяется в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^3$  с.

Следует отметить, что сложность исследования поведения биологических систем заключается в том, что из-за включения адаптационных и регуляторных механизмов их отклик является нелинейным даже при очень малых интенсивностях света.

# Лазеры в биологии и медицине

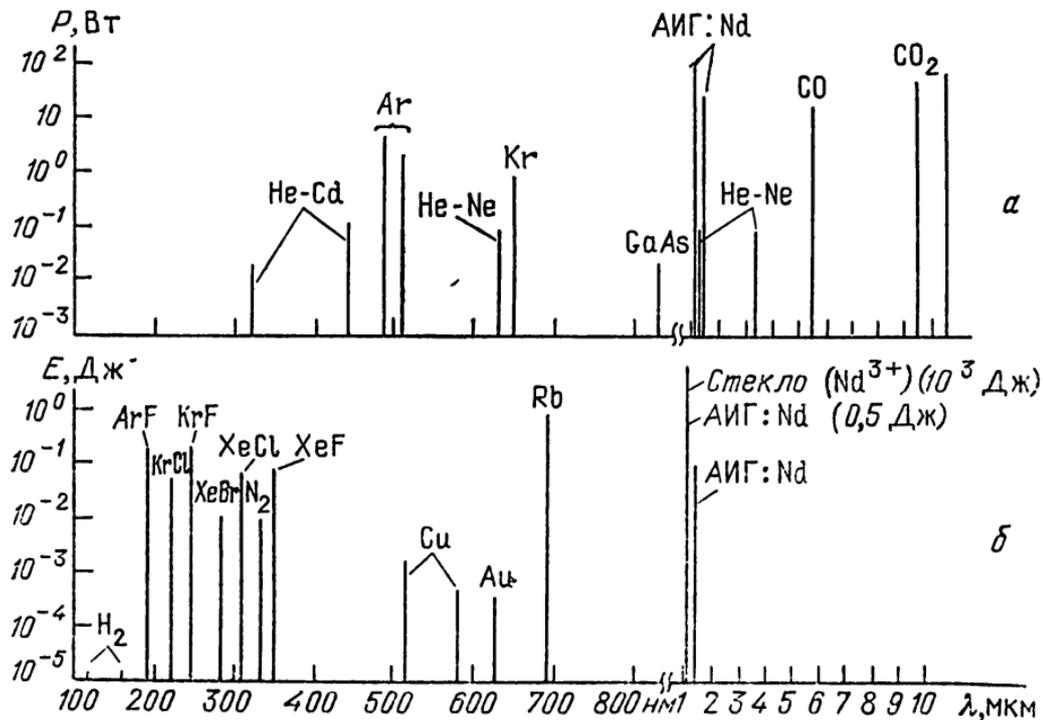
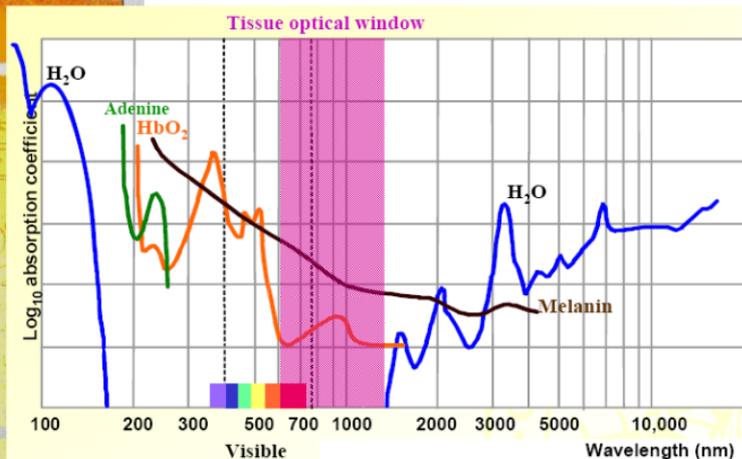
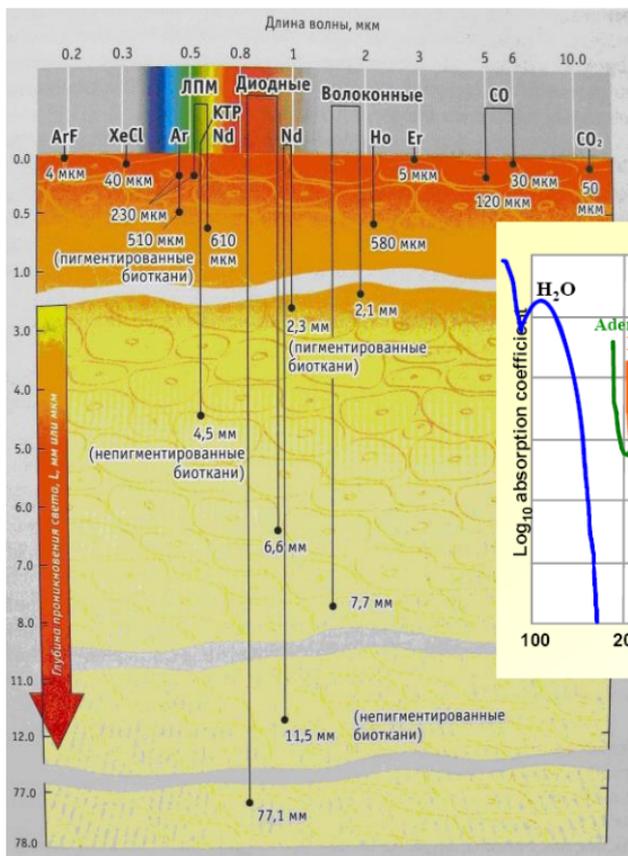


Рис. 1.4. Длины волн и энергетические параметры наиболее распространенных лазеров: а — непрерывных, б — импульсных

# Поглощение лазерного излучения биотканью



## Понятие критической температуры

При поглощении лазерного излучения в биоткани генерируется тепло, которое индуцирует целый ряд эффектов, соответствующих различным уровням вкладываемой мощности и приводящих либо к некоторому нагреву ткани в пределах физиологических температур, либо к обратимым или необратимым изменениям ее состояния.

Биологическая ткань повреждается при действии на нее высоких температур в течение некоторого времени, функция повреждения определяется, как:

$$\Omega(\tau) = \ln \frac{C(0)}{C(\tau)}$$

где  $\tau$  – время нагревания;  $C(0)$  и  $C(\tau)$  – начальная и остаточная концентрации неповрежденной ткани.

В случае использования лазерного излучения для неинвазивной диагностики или фототерапии необходимо удерживать температуру ниже порога повреждения ткани, ниже так называемой критической температуры  $T_{\text{crit}}$ . Эта температура определяется как температура, при которой скорость накопления повреждений,  $d\Omega/dt$ , равна единице

## Тепловое воздействие лазерного излучения

При повышении температуры выше критической,  $T_{crit}$ , возможны следующие виды необратимых повреждений ткани: коагуляция (денатурация клеточных и тканевых белков), является основой для лазерного сваривания ткани; выпаривание (дегидратация ткани и образование пузырьков пара (вакуолизация),  $T > 100^{\circ}\text{C}$ ), является основой для механической деструкции ткани; и пиролиз (при температурах  $T \approx 350\text{--}450^{\circ}\text{C}$ ). Комбинация выпаривания, вакуолизации и пиролиза приводит к тепловой абляции ткани – основы для лазерного хирургического удаления ткани.

Вызванные лазерным излучением тепловые эффекты в биотканях соответствуют следующим диапазонам температур,  $^{\circ}\text{C}$ :

Отсутствие необратимых изменений	37–43
Разделение слоев ткани (отек)	45–48
Сваривание ткани, денатурация белков	45–60
Коагуляция, некроз, обезвоживание	60–100
Испарение тканевой воды	100
Пиролиз, выгорание	100–300
Карбонизация твердых компонентов ткани	> 200
Испарение твердых компонентов ткани	> 300

## Фотохимическое воздействие лазерного излучения

Большинство фотохимических реакций происходит под действием света коротких длин волн ( $\lambda < 320$  нм). Многим биосистемам свойственны реакции:

- фотодиссоциация (расщепление молекулы на радикалы и ионы)
- фотоприсоединение (связывание двух мономерных молекул)
  - фотодимеризация – присоединение такой же молекулы, находящейся в невозбужденном состоянии
  - фотогидратация – присоединение молекулы воды
  - фотоокисдирование – присоединение молекулы кислорода.
- фотоокисление (под действием света возбужденная молекула отдает свой электрон невозбужденной молекуле)
- фотовосстановления (возбужденная молекула получает электрон)

Указанные реакции приводят к структурным изменениям биообъекта, включающим и процессы фоторазрушения.

# Фотохимическое воздействие лазерного излучения

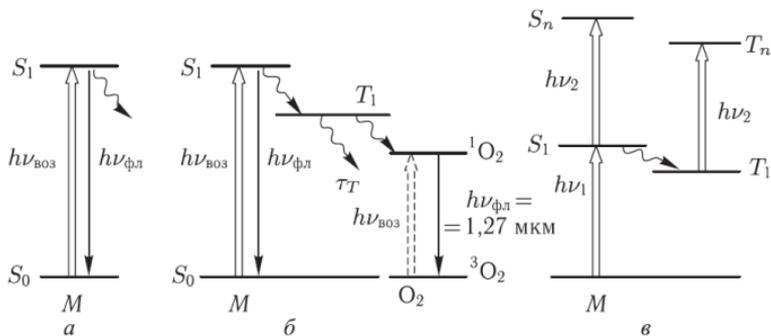


Рис. 1.33. Типы фотохимической модификации биомолекул: *a* — однофотонное возбуждение, сопровождающееся флуоресценцией и фотохимической реакцией; *б* — однофотонное возбуждение молекул сенсibilизатора, сопровождающееся флуоресценцией и передачей возбуждения на кислород с последующей модификацией биологической молекулы при ее взаимодействии с синглетным кислородом; *в* — двухфотонное возбуждение высоколежащих синглетных и триплетных уровней и последующая фотомодификация или перенос возбуждения другим молекулам [53]

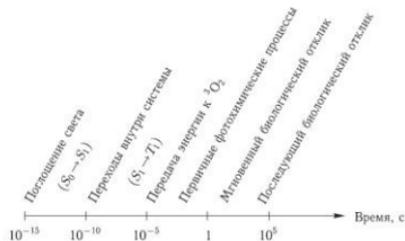


Рис. 1.35. Порядок величин временных интервалов для последовательности событий в фотодинамической терапии: поглощение света, переходы внутри системы, передача энергии кислороду, первичная фотохимия, мгновенный биологический отклик, последующий биологический отклик [306]

## Фотохимическое воздействие лазерного излучения

Требуемые для реализации фотодинамической терапии интенсивности света сравнительно невелики (меньше  $1 \text{ Вт/см}^2$ , для многих случаев плотность мощности около  $150 \text{ мВт/см}^2$  оказывается достаточной при дозе  $10\text{--}20 \text{ Дж/см}^2$ ) и могут быть обеспечены обычными источниками света. Использование лазеров оказывается очень полезным по следующим причинам.

Во-первых, лазерное излучение легко доставляется с помощью волоконных световодов в труднодоступные места, включая внутренние органы.

Во-вторых, высокая интенсивность лазерного излучения позволяет, по сравнению с тепловыми источниками, существенно снизить время облучения: именно поэтому лазеры дали новый толчок в развитии фотодинамической терапии.

В-третьих, с помощью лазеров необходимую дозу облучения можно обеспечить с помощью одного короткого импульса света, что важно в тех случаях, когда нужно исключить влияние света на последующие химические реакции.

## Нелинейные процессы

При облучении биотканей излучением с малой длительностью импульсов и высокой плотностью мощности имеют место нелинейные процессы, которые существенно отличаются от чисто термических или фотохимических.

В рамках биомедицинских применений лазеров наиболее обсуждаемые нелинейные процессы включают фотоабляцию, оптический пробой, генерацию плазмы и распространение ударных волны.

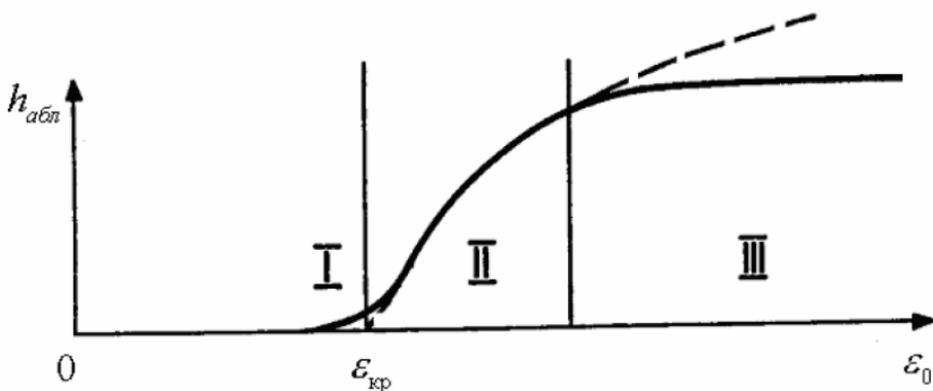


Рисунок 11. Качественный характер зависимости толщины удаленного слоя при фотоабляции от плотности энергии падающего излучения.

## Лазерная спектральная диагностика

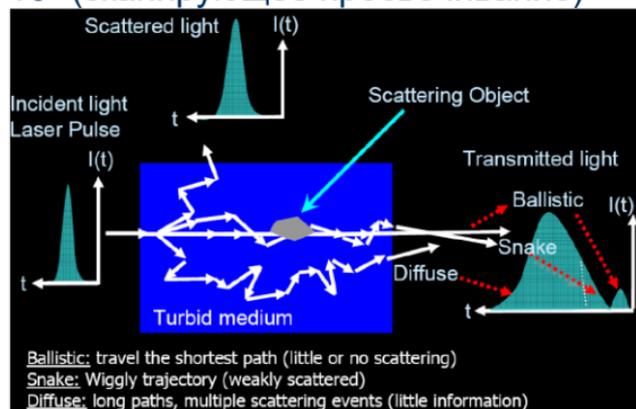
Мысль о том, что некоторые заболевания можно обнаружить по запаху изо рта, высказал еще Гиппократ. А сегодня тесты выдыхаемого воздуха на алкоголь или на наличие специфических продуктов расщепления питательных веществ, свидетельствующих о присутствии в организме тех или иных бактерий (например, *Helicobacter pylori*, отвечающей за развитие язвенной болезни), стали обычным делом

В воздухе, выдыхаемом человеком, содержатся следы около 600 летучих соединений, образуемых в организме

Молекула - биомаркер	Заболевание или стрессорная нагрузка
Оксид азота (NO)	<b>Хронические инфекционные воспаления</b> (гастрит, гепатит, колит, инфекция <i>Helicobacter pylori</i> ) Хроническая обструктивная болезнь легких Астма Инфекция верхних дыхательных путей Ринит
Изотопические модификации CO <sub>2</sub>	<b>Инфицирование бактерией <i>Helicobacter pylori</i></b> Прохождение пищи через желудочно-кишечный тракт Цирроз печени Избыточный рост бактерий Мальабсорбция Метаболизм желчи
Аммиак (NH <sub>3</sub> )	<b>Острая и хроническая лучевая болезнь</b> Метаболизм моноаминов в легких Почечная недостаточность: при нефритах, гипертонической болезни, атеросклерозе почечных артерий Недостаточность печени при желтухах, гепатитах, циррозе печени. Рак легкого
Ацетон	<b>Сахарный диабет</b> Функция поджелудочной железы при остром деструктивном панкреатите Рак легкого
Этан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	<b>Курящие и некурящие</b> Маркер витамина E у детей Маркер разрушений, вызываемых свободными радикалами
Метанол, Этанол	<b>Алкоголизм</b> Заболевания центральной нервной системы Сахарный диабет
Оксид углерода (CO)	<b>Инфекция дыхательных путей Астма</b> Анемии (гемолитическая, сидеробластическая, серповидно-клеточная) Карбоксигемоглобинемия Гипербилирубинемия новорожденных Гематомы, гемоглобинурия, приклампсия, инфекции

# Лазерная томография

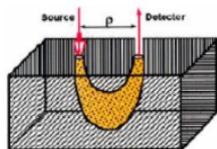
Томография (греч. tomos слой, кусок + graphiō писать, изображать) - метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта посредством многократного его просвечивания в различных пересекающихся направлениях, число которых достигает  $10 \cdot 10^6$  (сканирующее просвечивание)



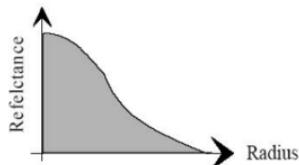
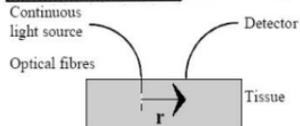
Распространение света через сильнорассеивающую среду



# Лазерная томография



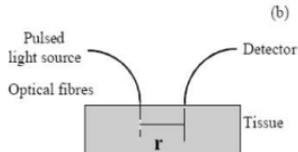
(a)



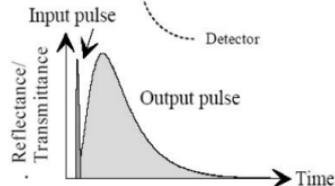
*пространственное разрешение*



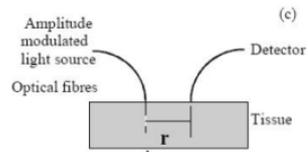
## Двухпараметрические методы определения оптических свойств биотканей



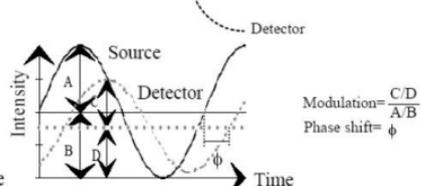
(b)



*временное разрешение*



(c)



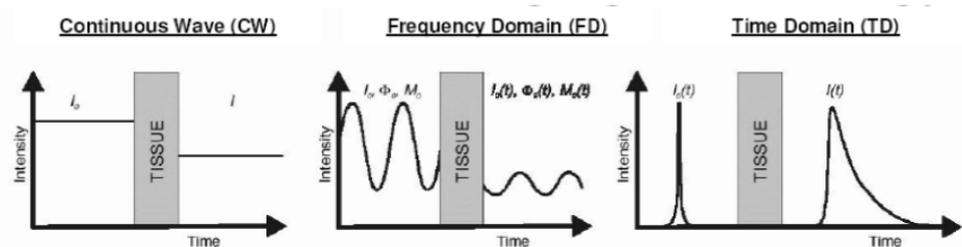
*частотное разрешение*



$$\text{Modulation} = \frac{C/D}{A/B}$$

$$\text{Phase shift} = \phi$$

# Лазерная томография



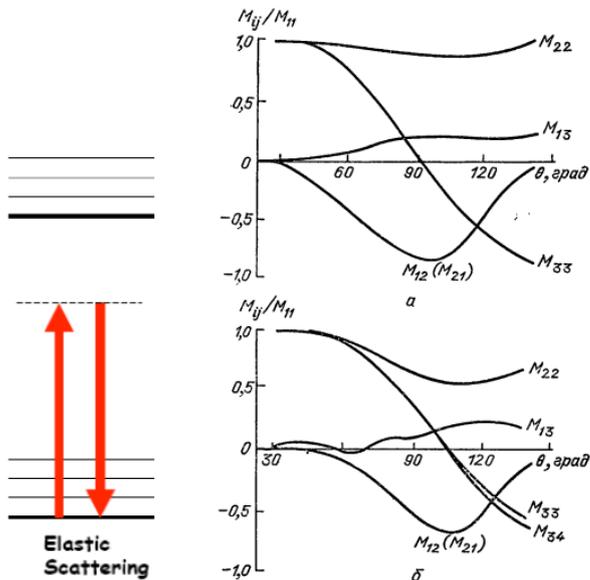
## Tissue Surface Apps Only

Excitation Method	Constant amplitude continuous
Characterize	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensity</li> </ul>
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Real time large FOV</li> <li>• Simple</li> <li>• Least expensive</li> </ul>
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No depth information</li> </ul>

## Detection up to 8 cm into Tissue

Excitation Method	Sinusoidal modulated (10-100MHz)	Pulsed light (picosecond)
Characterize	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensity</li> <li>• Lifetime</li> <li>• Quantum yield</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensity</li> <li>• Lifetime</li> <li>• Quantum yield</li> </ul>
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fast acquisition</li> <li>• Absorption &amp; scatter</li> <li>• Depth information</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher information content</li> <li>• Absorption &amp; scatter</li> <li>• Depth information</li> </ul>
Disadvantages	Noise susceptibility	Long acq time low SNR

# Лазерная нефелометрия – упругое рассеяние света



ис. 2.2. Индикатрисы элементов МРС нормального (а) и мутного (б) хрусталиков глаза человека

# Лазерная доплеровская спектроскопия – квазиупругое рассеяние света

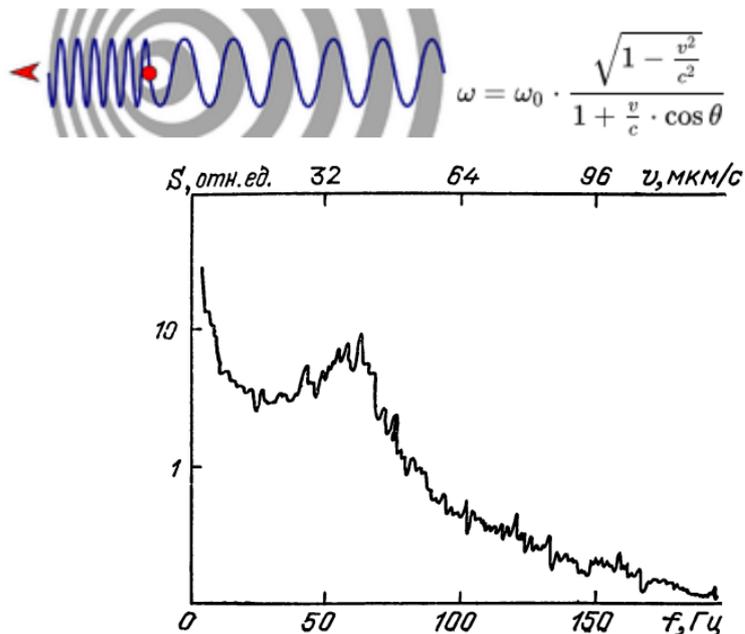


Рис. 3.12. Доплеровский спектр, полученный от живой клетки харовой водоросли со стационарным течением протоплазмы;  $\theta=45^\circ$ ,  $\tau=10$  с,  $T=20^\circ\text{C}$

# Лазерная интерферометрия и голография

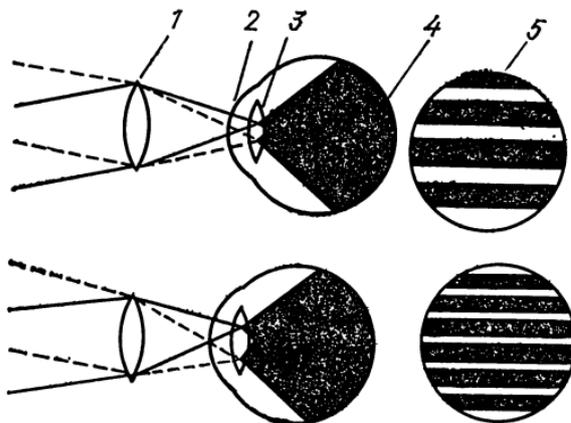
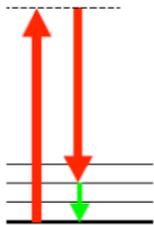


Рис. 4.1. Фокусировка лазерных пучков при ретинометрии для двух случаев ширины интерференционных полос на глазном дне:  
1 — объектив, 2 — роговая оболочка глаза, 3 — хрусталик, 4 — сетчатка, 5 — изображение на глазном дне

# Абсорбционная и калориметрическая диагностика



# Спектроскопия комбинационного рассеяния



Inelastic Scattering (Raman scattering)

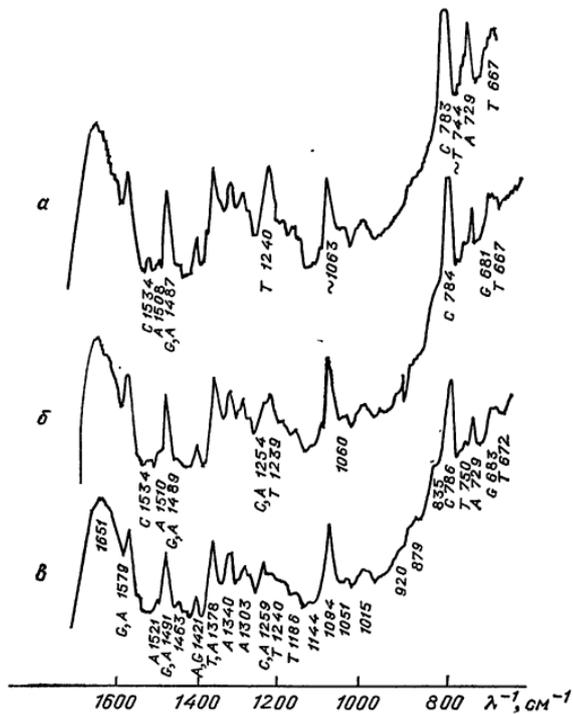


Рис. 6.8. КР-спектры водного раствора ДНК, выделенной из тимуса теленка при температуре 98 (а), 84 (б) и 25 °С (в); рН=7,0 [25]

# Лазерный флуоресцентный анализ

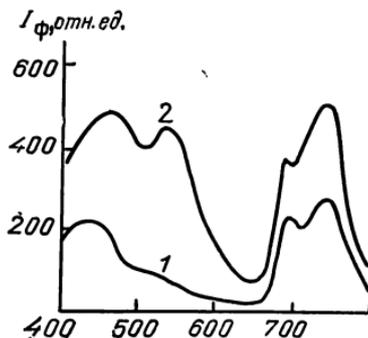
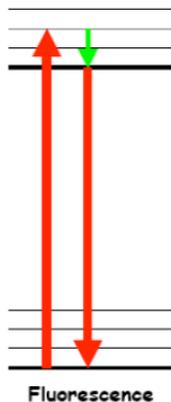


Рис. 7.10. Спектры флуоресценции растений при достатке (1) и недостатке (2) влаги в почве [28]

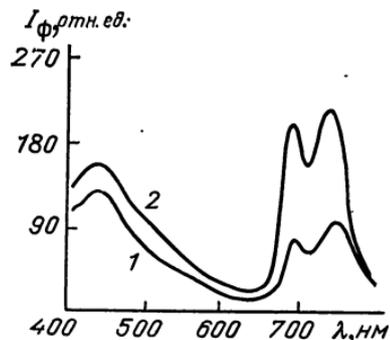


Рис. 7.11. Спектры флуоресценции растений в норме (1) и при обработке гербицидом (2) [28]

## Лазерная терапия

В основе лазерной терапии лежит управление биохимическими процессами с помощью света. Однофотонные фотобиохимические процессы лежат в основе терапии желтухи новорожденных, фототерапии или фотохимиотерапии различных заболеваний кожи и фотодинамической терапии (ФДТ) злокачественных опухолей и воспалительных заболеваний, а также подавления роста бактерий с использованием гематопорфирина, металлокомплексов порфиринов, фталоцианина, анионных красителей и других фотосенсибилизаторов.

## Низкоинтенсивная лазерная терапия (НИЛТ)

НИЛТ позволяет для ряда заболеваний получить терапевтический эффект без введения экзогенных фотосенсибилизаторов. Такая биостимуляция осуществляется в довольно узкой области длин волн, интенсивностей и доз облучения, а также длительностей и частот повторения импульсов. В литературе описаны многочисленные практические методики НИЛТ для лечения посттравматических, воспалительных и дегенеративно-дистрофических заболеваний. Также интенсивно обсуждаются проблемы и возможные механизмы НИЛТ, включая молекулы – первичные акцепторы света, такие как цитохром-с-оксидаза, порфирины и флавины; митохондрии как органеллы, ответственные за ряд первичных эффектов действия света; оксид азота как медиатор лазерного воздействия.

Одно из самых коварных свойств НИЛТ – резкая зависимость величины и даже знака эффекта от дозы облучения. Стимулирующее действие проявляется, как правило, в узком интервале доз облучения, а затем исчезает или даже сменяется угнетающим действием. Как до настоящего времени не объяснены механизмы терапевтического действия НИЛТ, так нет и научно обоснованного метода выбора доз облучения

## Фотодинамическая терапия

Порфирины (от греч. porphyreos — багровый, пурпурный) – азотосодержащие природные пигменты, являющиеся производными порфина, входящие, в том числе, в состав небелковой части молекулы гемоглобина, хлорофилла, ряда ферментов и обладающие крайне высокими коэффициентами поглощения света. Максимум поглощения варьируется для различных видов порфирина, но обычно лежит в красном диапазоне.

Еще в начале XX столетия было обнаружено, что раковая клетка обладает чрезвычайно интересным свойством - она может селективно накапливать и некоторое время удерживать окрашенные вещества, как находящиеся в организме (эндогенные порфирины), так и вводимые в него извне (экзогенные порфирины)

# Фотодинамическая терапия

Фотодинамический эффект - необратимое повреждение окрашенных биологических структур при освещении

Основным поражающим фактором ФД воздействия являются активные формы кислорода, но синглетный кислород  $^1O_2$  рассматривается как главный фактор ФДТ.  $^1O_2$  обладает значительно большей подвижностью и более активно окисляет внутренние элементы клетки.

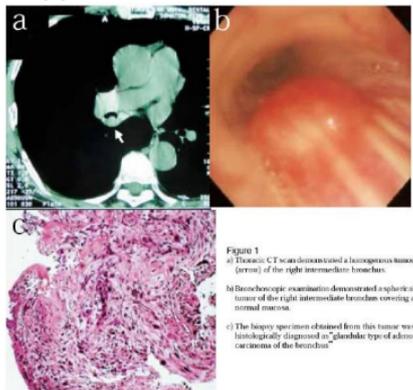


Figure 1  
a) Transaxial CT scan demonstrated a homogeneous tumor (arrow) of the right intermediate bronchus.  
b) Bronchoscopic examination demonstrated a spherical tumor of the right intermediate bronchus covering a normal mucosa.  
c) The biopsy specimen obtained from this tumor was histologically diagnosed as "glandular type of adenocarcinoma of the bronchus"

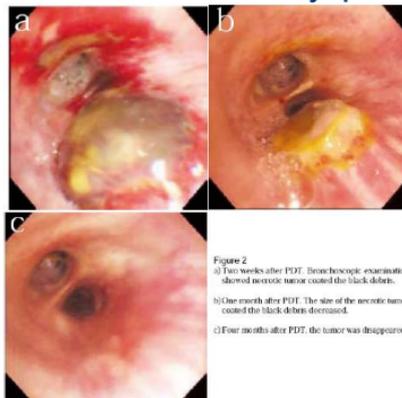


Figure 2  
a) Two weeks after PDT. Bronchoscopic examination showed necrotic tumor coated the black debris.  
b) One month after PDT. The size of the necrotic tumor coated the black debris decreased.  
c) Four months after PDT, the tumor was disappeared.

Рис 2.13 ФДТ аденосаркомы бронха ( Photofrin облучается лазером на красителе 660 нм с накачкой эксимером) [34]

Рис. 1 а) Сканирующая грудная СТ демонстрирует однородную опухоль (стрелка) правого среднего бронха. б) Бронхоскоп показывает сферическую опухоль правого среднего бронха, покрытую нормальной слизистой оболочкой. в) Гистология биопсийных образцов, взятых из опухоли диагностирует "аденосаркому бронха"

Рис. 2 а) Две недели после ФДТ. Бронхоскоп показывает некротическую опухоль, покрытую черными пятнами. б) 1 месяц после ФДТ. Размер некротической опухоли, покрытой черными пятнами, уменьшился. в) 4 месяца после ФДТ, опухоль исчезла без рецидивов в течение 3 лет.

# Лазерная термотерапия

37°	не имеется необратимых повреждений
40 - 45°	активация ферментов, сращивание стенок, изменение мембран и в зависимости от времени, смерть клеток
60°	денатурация протеина, начало коагуляции и некрозы
80°	денатурация коллагена, дефекты мембраны
100°	обезвоживание
свыше 150°	обугливание
300°>	выпаривание, газообразование

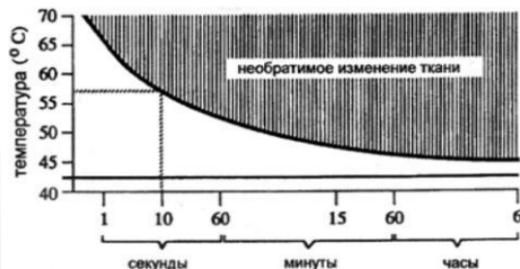
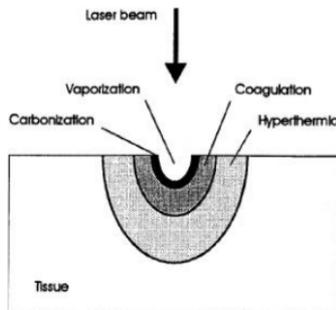
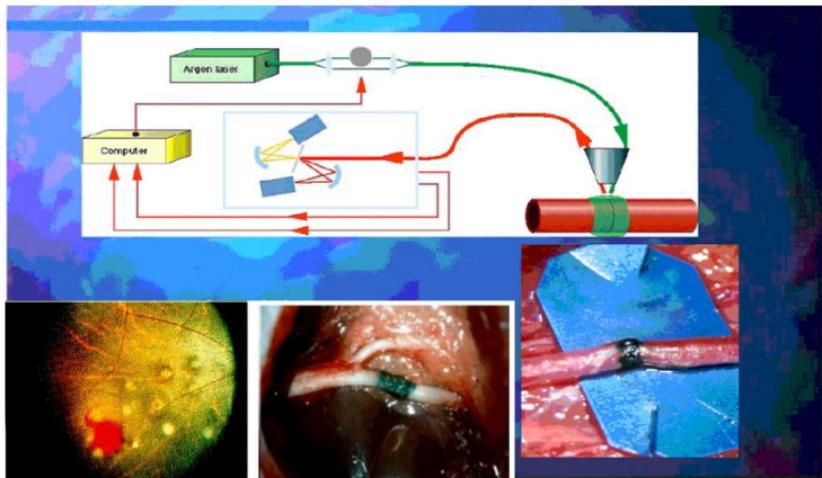


Рис.3.2 Влияние температуры и времени на необратимые изменения ткани (формализм Arrhenius)

Приварка (точечная коагуляция) сетчатки глаза (внизу, слева) и сварка сосудов Ar лазером



## Лазерная гипертермия (Hyperthermia)



Косметические результаты: подтяжка кожи, ретикулярный (сетчатый) варикоз, эпиляция, татуировка

## Коррекция формы хрящей наружной лазеротерапией



Метод основан на релаксации напряжений в хрящевой ткани, происходящей при кратковременном локальном нагреве до температуры 65-75°C, при которой внутритканевая вода переходит из связанного в свободное состояние.

В начале лазерного воздействия хрящ упругий, в конце воздействия становится пластичным и ему можно придать любую желаемую форму, которая после остывания ткани стабильна во времени.

Благодаря такому нагреву происходит стимуляция роста хрящевых клеток, восстановление межпозвонкового диска.

## **Внутриканевая (interstitial) лазерная коагуляция**

По этой методике к поврежденному участку ткани лазерный луч (обычно излучение с большой глубиной проникновения: диодный лазер 800-900 нм или, что чаще, cw Nd:YAG) доставляется волокном через подкожную иглу с одновременным визуальным контролем места воздействия.

При малой мощности (нет испарения ткани) больная ткань мягко коагулируется за несколько минут таким образом, что мертвая ткань рассасывается при заживлении, без необходимости дальнейшего вмешательства.

Нет воздействия на вышележащую нормальную ткань, нет кумуляции токсичности (т.е. обработка может быть повторена в случае необходимости).

Ключ к успеху лежит в правильном позиционировании волокна, и подборе мощности лазера, обеспечивающей зону некроза, ограниченную размером облученной ткани.

## Лазеры в хирургии

Дерматология – удаление и коагуляция кожных новообразований, удаление татуировок

Эндоскопические операции – использование волоконной доставки лазерного излучения позволяет добиться большей миниатюризации

Открытая хирургия – использование лазерных ИК-коагуляторов позволяет снизить кровопотери, уменьшить травматичность операции

Хирургия конечностей – лазерное испарение костных новообразований препятствует их повторному возникновению

# Лазерный пинцет

