

Физические поля и электромагнитные излучения

Лекция 7

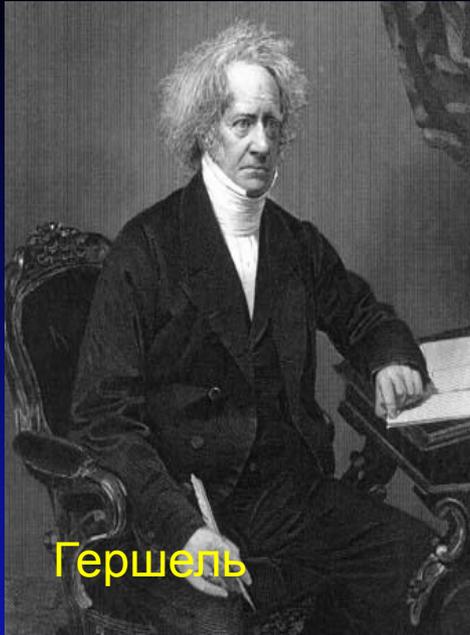


Гюйгенс

Первые волновые теории света (старейшие варианты теории электромагнитного излучения) восходят, по меньшей мере, к временам Гюйгенса, когда они получили уже и заметное количественное развитие. В 1678 году Гюйгенс выпустил «Трактат о свете» — набросок волновой теории света. Другое сочинение он издал в 1690 году; там он изложил качественную теорию отражения. Сформулировал так называемый принцип Гюйгенса, позволяющий исследовать движение волнового фронта, впоследствии развитый Френелем (принцип Гюйгенса — Френеля) и сыгравший важную роль в волновой теории света, и теории дифракции.



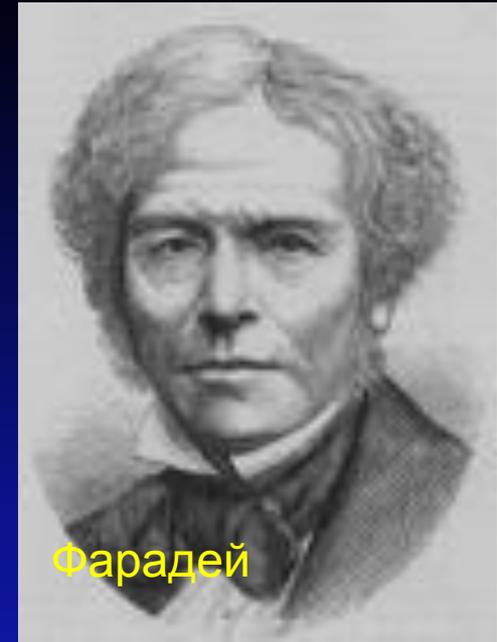
Френель



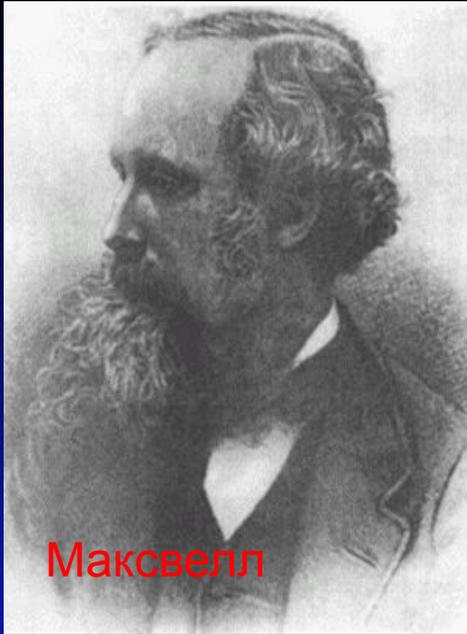
В 1800 году английский учёный У. Гершель открыл инфракрасное излучение.



В 1801 году Риттер открыл ультрафиолетовое излучение.

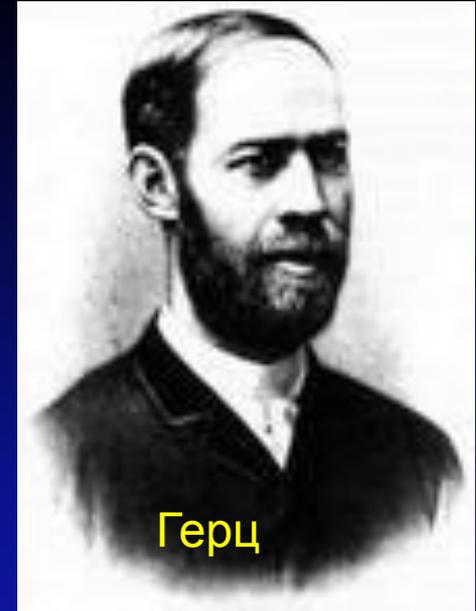


Существование электромагнитного излучения теоретически предсказал английский физик Фарадей в 1832 году.



Максвелл

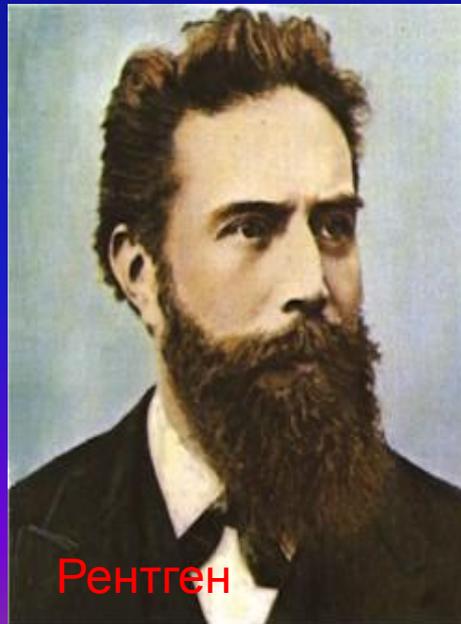
В 1865 году английский физик Дж. Максвелл завершил построение теории электромагнитного поля классической (неквантовой) физики, строго оформив её математически, а также предсказав существование электромагнитных волн.



Герц

В 1888 году немецкий физик Герц подтвердил теорию Максвелла опытным путём. Интересно, что Герц не верил в существование этих волн и проводил свой опыт с целью опровергнуть выводы Максвелла.

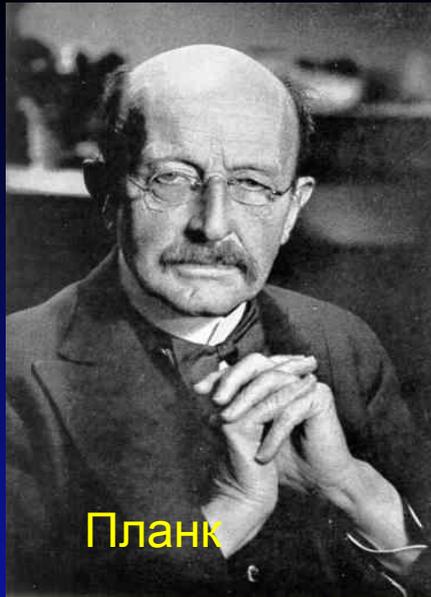
8 ноября 1895 года Рентген открыл электромагнитное излучение (получившее впоследствии название рентгеновского) более коротковолнового диапазона, чем ультрафиолетовое.



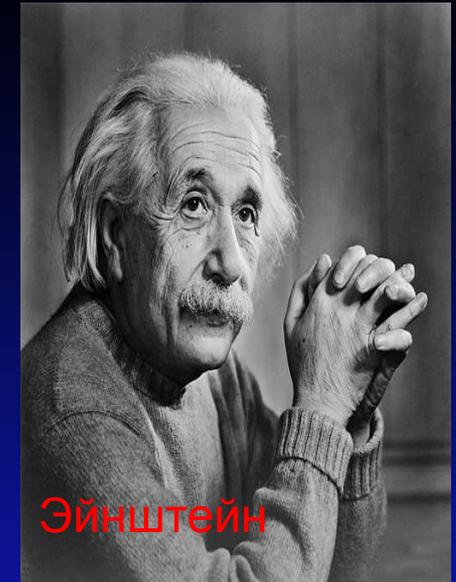
Рентген



В 1900 году Поль Виллард при изучении излучения радия открыл гамма-излучение.



В 1900 году Планк при теоретическом исследовании проблемы излучения абсолютно черного тела открывает квантовость процесса электромагнитного излучения. Эта работа стала началом квантовой физики.



Начиная с 1905 года Эйнштейн, а затем и Планк публикуют ряд работ, приведших к формированию понятия фотона, что стало началом создания квантовой теории электромагнитного излучения.

Дальнейшие работы по квантовой теории излучения и его взаимодействия с веществом, приведшие в итоге к формированию квантовой электродинамики в ее современном виде, принадлежат ряду ведущих физиков середины XX века, среди которых можно выделить: Бозе, Бора, Гейзенберга, де Бройля, Дирака, Фейнмана, Швингера, Томонагу, Планка и Эйнштейна.

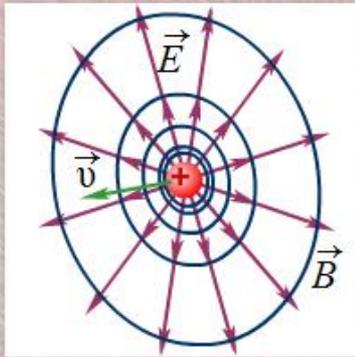
1. Магнитное поле

1.1. В пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое магнитным

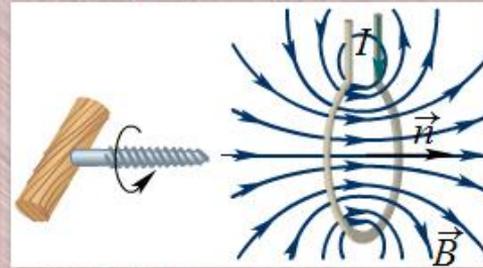
1.2. Постоянные магниты



1.3. Электрическое и магнитное поля



1.4. Правило буравчика



1.5. Магнитная индукция

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l} \quad 1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$$

1.6. Сила Ампера

$$F = IB\Delta l \sin \alpha$$

1.7. Напряжённость магнитного поля

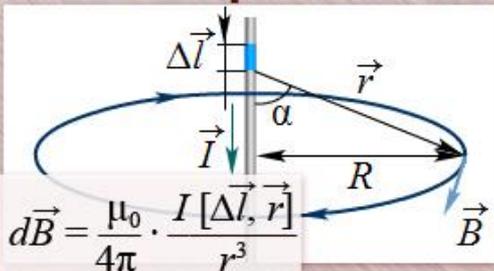
$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн}/\text{м}$ – магнитная постоянная

1.8. Сила Лоренца

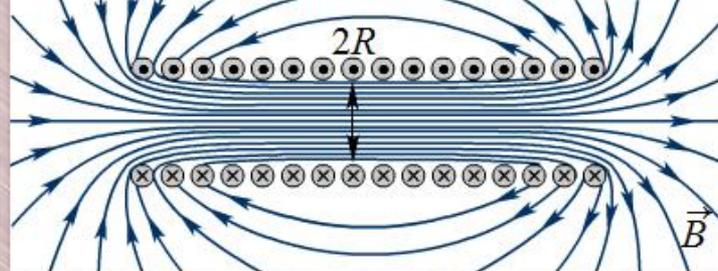
$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha$$

2. Закон Био–Савара–Лапласа

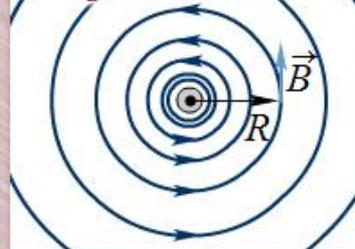


3. Магнитное поле проводников

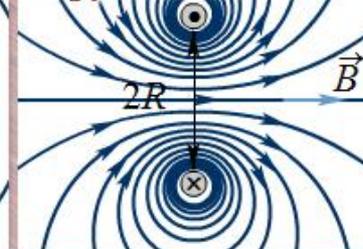
3.1. Магнитное поле соленоида



3.2. Магнитное поле прямого тока



3.3. Магнитное поле кругового витка



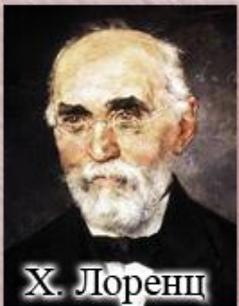
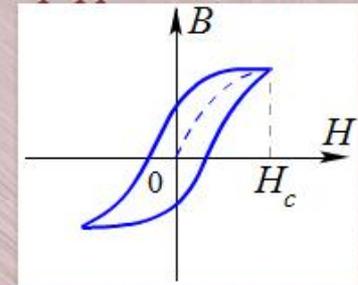
4. Магнитное поле в веществе

4.1. Магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

- $\mu < 1$ – диамагнетики
- $\mu > 1$ – парамагнетики
- $\mu \gg 1$ – ферромагнетики

4.2. Намагничивание ферромагнетиков



Напряженностью магнитного поля называют векторную величину \vec{H} , характеризующую магнитное поле и определяемую следующим образом:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}.$$

Напряженность магнитного поля заряда q , движущегося в вакууме равна:

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}$$

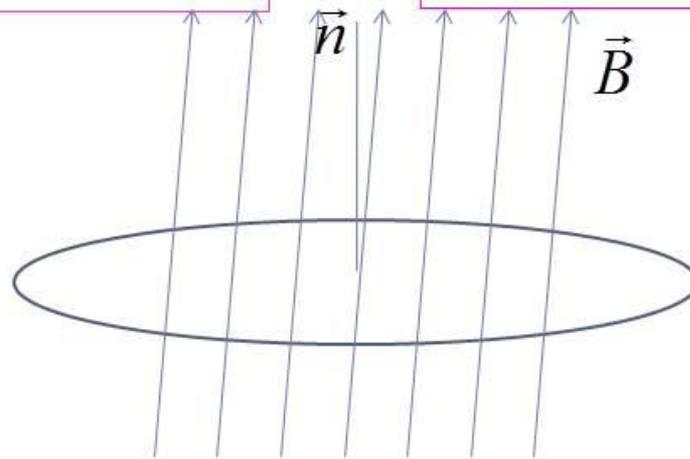
Закон Био–Савара–Лапласа для \vec{H}

Магнитный поток

Магнитным потоком Φ через поверхность площадью S называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции \vec{B} на площадь S и косинус угла α между векторами \vec{B} и \vec{n} .

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

$$\Phi = [1B\sigma](\text{веббер})$$

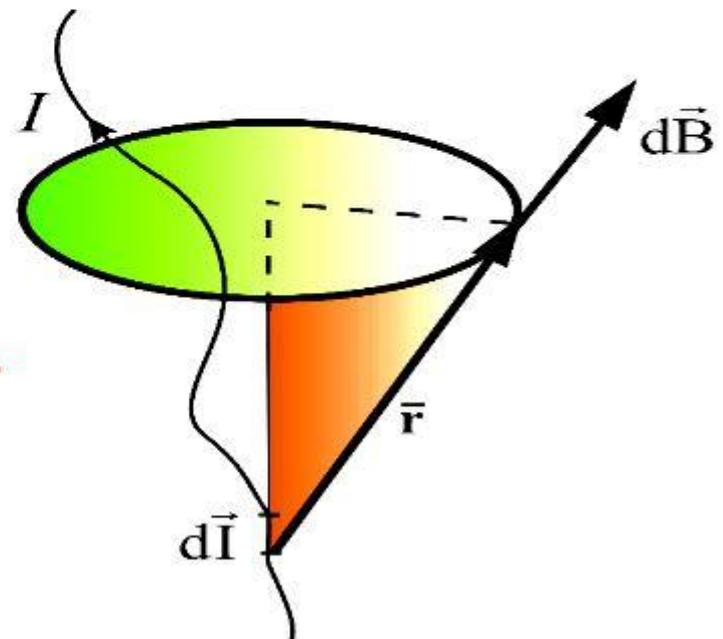


Закон Био-Савара-Лапласа

- Элемент тока длины $d\vec{l}$ (рисунок), создает поле с магнитной индукцией

$$d\vec{B} = k \frac{I d\vec{l}}{r^2}$$

- Это и есть **закон Био-Савара-Лапласа**, полученный экспериментально.



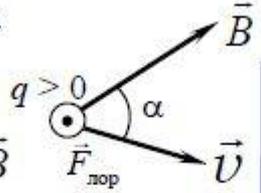
VIII. Магнитные явления

1. Магнитное поле — особая материя, возникающая вокруг любых движущихся электрических зарядов (токов).
действующая магнитными силами на движущиеся заряды (токи).

Сила Лоренца — сила, действующая со стороны магнитного поля на отдельные движущиеся заряды.

$$F_{\text{лор}} = |q| v B \cdot \sin \alpha$$

$$\vec{F}_{\text{лор}} \perp \vec{v}, \vec{F}_{\text{лор}} \perp \vec{B}$$



α — угол между \vec{v} и \vec{B}
модуль вектора \vec{B} — вектора магнитной индукции

Сила Ампера — сила, действующая со стороны магнитного поля на провод с током.

$$F_A = I l B \cdot \sin \alpha$$

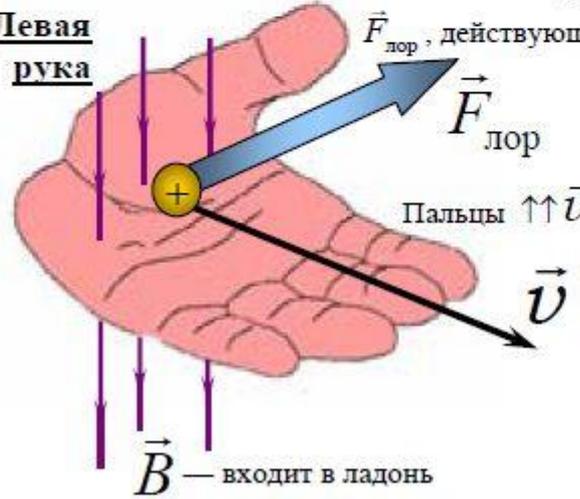
Провод прямолинейный находится в однородном магнитном поле.

$$\vec{F}_A \perp \text{току}$$

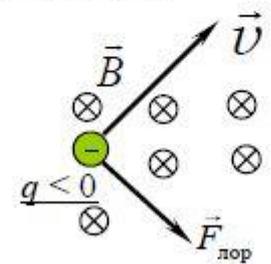
$$\vec{F}_A \perp \vec{B}$$

α — угол между током и \vec{B}
Длина провода
Сила тока в проводе

Левая рука

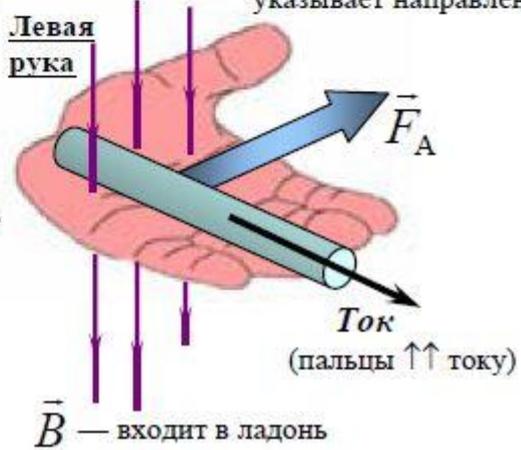


Большой палец указывает направление $\vec{F}_{\text{лор}}$, действующей на (+) заряд.
Пальцы $\uparrow \vec{v}$



$q < 0$

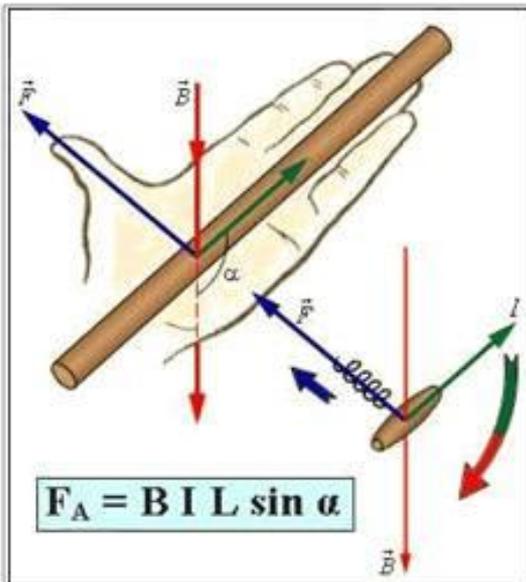
Левая рука



Большой палец указывает направление \vec{F}_A .

Если заряд летит параллельно \vec{B} , то $\vec{F}_{\text{лор}} = 0$

Единица измерения магнитной индукции в СИ: 1Тл



$$F_A = B I L \sin \alpha$$

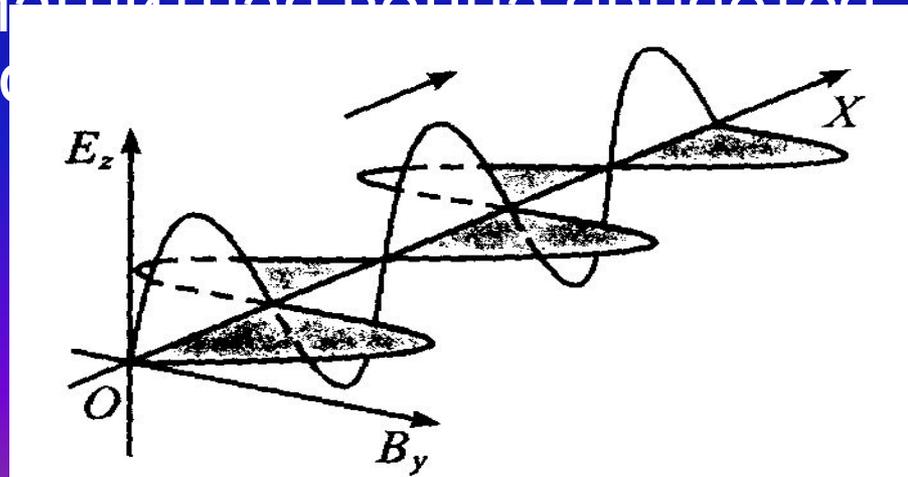
Индукция магнитного поля – величина, равная отношению максимальной силы Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле, к силе тока в этом проводнике и его длине в магнитном поле

$$B = \frac{F_{\max}}{I l}$$

$$[B] = Tл$$

1 Тесла – индукция такого однородного магнитного поля, в котором на проводнике длиной 1 м с током 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н

- Электромагнитное поле излучается заметным образом не только при колебании заряда, но и при любом быстром изменении его скорости. Причем интенсивность излучения волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.
- Векторы E и B в электромагнитной волне перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению распространения волны.
- Электромагнитная волна является поперечной

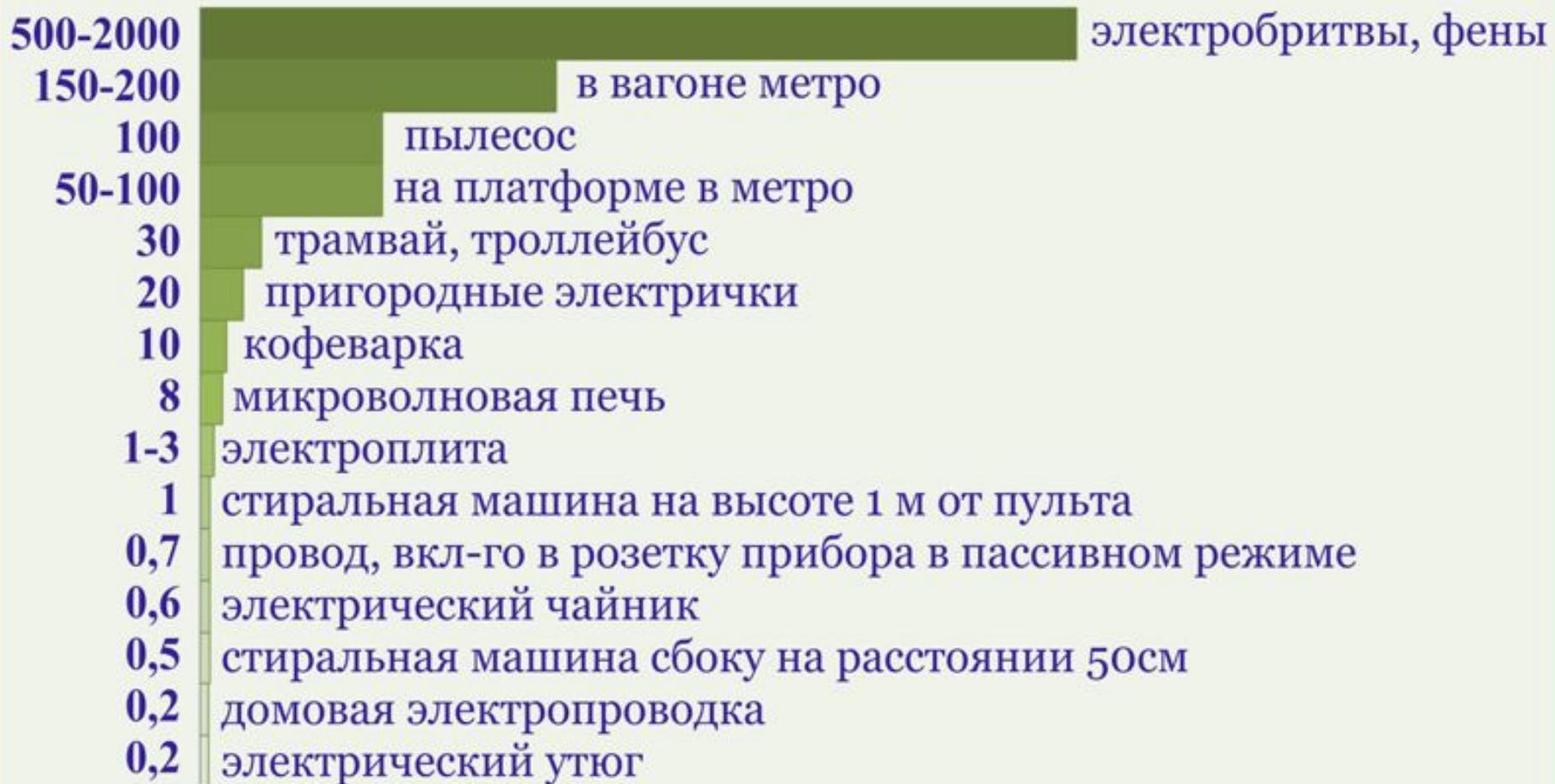


Некоторые значения магнитной индукции

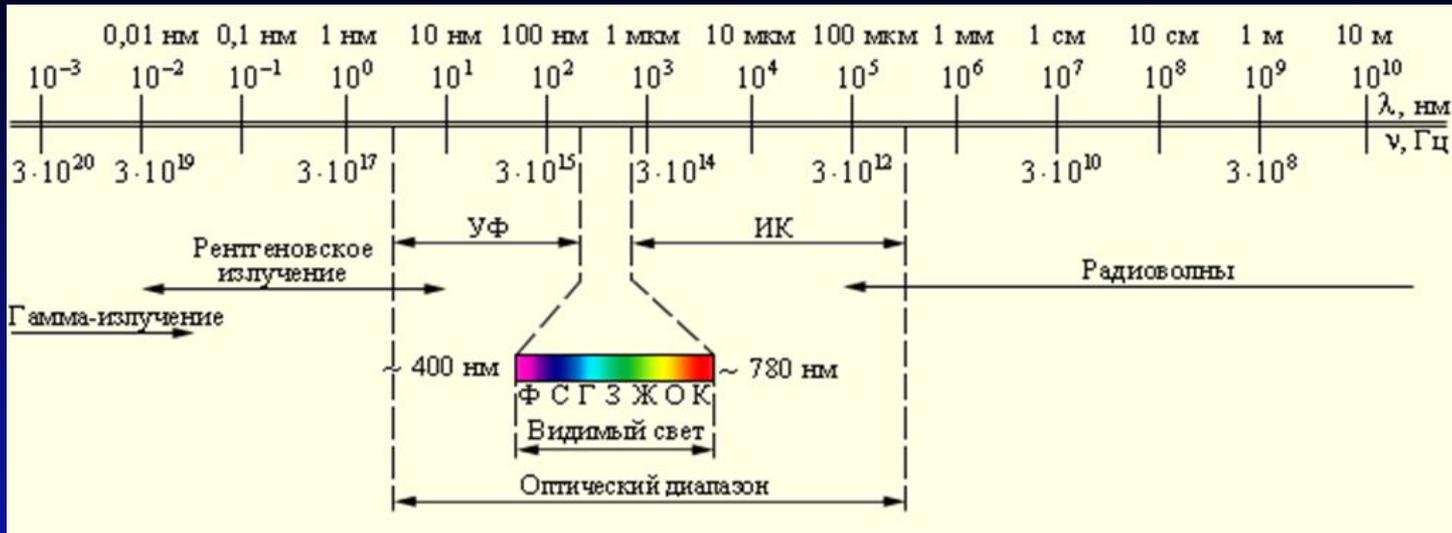
- Магнитное поле Земли в Европе – $2 \cdot 10^{-5}$ Тл
- Магнитное поле Земли максимальное – $7 \cdot 10^{-5}$ Тл
- Магнитное поле стрелок компаса – 0,01 Тл
- Магнитное поле подковообразного магнита – до 0,2 Тл
- Магнитное поле солнечных пятен – 0,4 Тл
- Магнитное поле ферромагнитного сердечника – до 1 Тл
- Магнитное поле в ускорителе – до 10 Тл
- Магнитное поле нейтронных звезд – 10 Тл



Индукция магнитного поля, мкТл



Электромагнитное излучение (электромагнитные волны) — распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля.

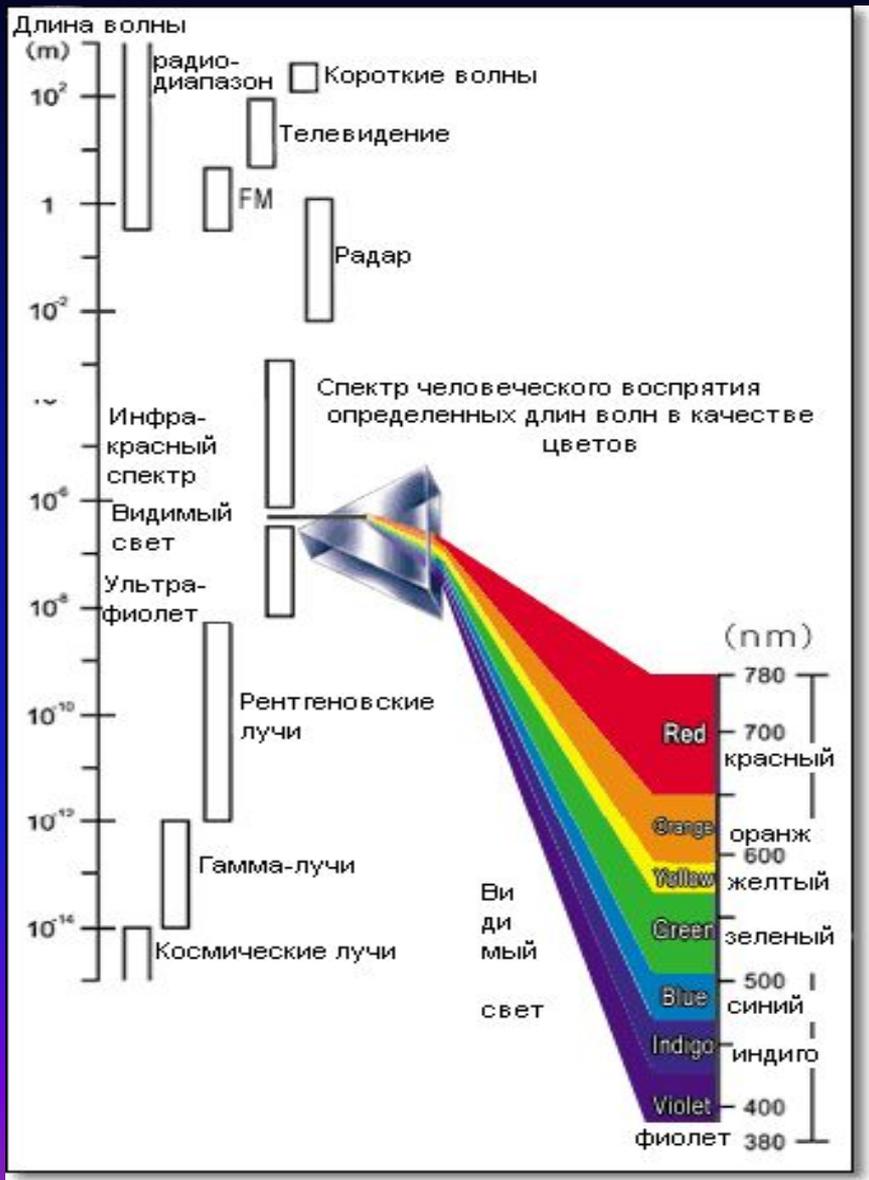


Радиоизлучение (радиоволны) - электромагнитное излучение с длинами волн $5 \cdot 10^{-5}—10^{10}$ метров и частотами, соответственно, от $6 \cdot 10^{12}$ Гц и до нескольких Гц

Инфракрасное излучение — электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света (с длиной волны $\lambda = 0,74$ мкм) и микроволновым излучением ($\lambda \sim 1—2$ мм).

Видимое излучение — электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом. Обычно в качестве коротковолновой границы принимают участок 380—400 нм (750—790 ТГц), а в качестве длинноволновой — 760—780 нм (385—395 ТГц)

Ультрафиолетовое 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).



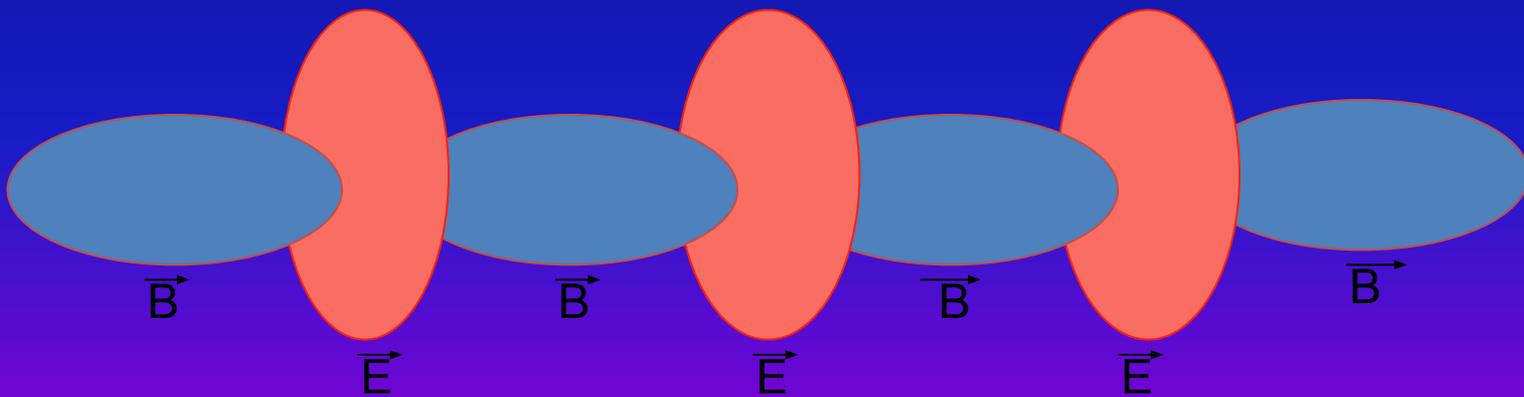
Для оптического излучения (вплоть до рентгеновского диапазона) применяют оптику (в частности, волновую оптику, квантовую оптику, геометрическую оптику).

Гамма-излучение чаще всего является предметом ядерной физики, с других — медицинских и биологических — позиций изучается воздействие электромагнитного излучения в радиологии.

Существует также ряд областей — фундаментальных и прикладных — таких, как астрофизика, фотохимия, биология фотосинтеза и зрительного восприятия, ряд областей спектрального анализа, для которых электромагнитное излучение и его взаимодействие с веществом играют ключевую роль.

Природа электромагнитной ВОЛНЫ

- Электромагнитная волна представляет собой распространение в пространстве с течением времени переменных (вихревых) электрических и магнитных полей.



Основные фотобиологические процессы.

Фотобиологический процесс – это процесс, который начинается с поглощения квантов света молекулами и заканчивается физиологической реакцией организма.

Фотосинтез – синтез органических молекул растениями или бактериями за счет энергии солнечного света

Фототропизм - поворот листьев или стеблей растений к источнику света

Фототаксис - движение микроорганизмов, например бактерий, к свету или от света

Фотопериодизм - регуляция суточных и годовых циклов животных путем циклических воздействий «свет - темнота»;

Зрение – превращение световой энергии в энергию нервного импульса в сетчатке глаза

Эффекты УФ-излучения -загар (потемнение кожи за счет синтеза в ней пигмента меланина под действием света), эритема (стойкое воспалительное покраснение кожи), синтез витамина Д, инактивация вирусов и бактерий, угнетение иммунитета, мутагенное и канцерогенное действия

Стадии фотобиологических процессов:

1. Поглощение фотона света молекулой-акцептором
2. Внутримолекулярный перенос энергии
3. Межмолекулярный перенос энергии
4. Первичный фотохимический акт (образование нестабильных фотопродуктов из возбужденных состояний S_1 или T_1)
5. Темновые реакции, приводящие к образованию стабильных фотопродуктов
6. Биохимические реакции с участием стабильных фотопродуктов
7. Физиологический ответ организма на действие света

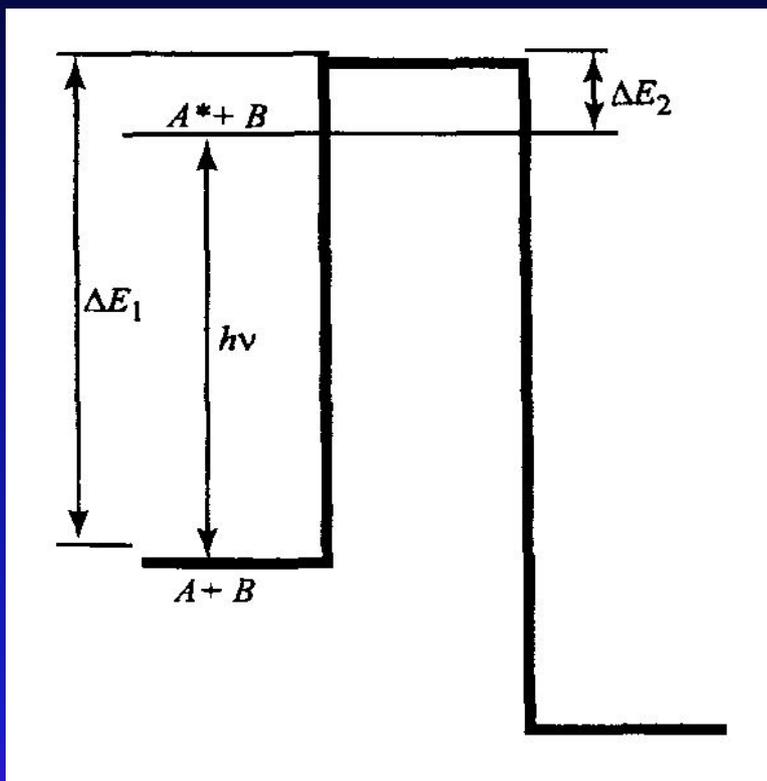


Владимиров и Проскурнина, 2007;
Суковатая и др., 2007

Основные стадии в действии излучений на биологические системы

Стадия	Процессы	Продолжительность стадии
Физическая	Поглощение энергии излучения; образование ионизированных и возбужденных атомов и молекул	$10^{-16} - 10^{-15}$ с
Физико-химическая	Перераспределение поглощенной энергии внутри молекул и между ними, образование свободных радикалов	$10^{-14} - 10^{-11}$ с
Химическая	Реакции между свободными радикалами, между радикалами и неактивированными молекулами. Образование широкого спектра молекул с измененными структурой и функциональными свойствами.	$10^{-6} - 10^{-3}$ с
Биологическая	Последовательное развитие поражения на всех уровнях биологической организации: от субклеточного до организменного; активация процессов биологического усиления и репарации повреждений.	Секунды – годы

Во всех фотобиологических процессах энергия света необходима для преодоления активационных барьеров химических превращений. Реакционная способность возбужденной светом молекулы определяется рядом факторов. Она зависит от положения возбужденного энергетического электронного уровня, что обеспечивает преодоление энергетического барьера



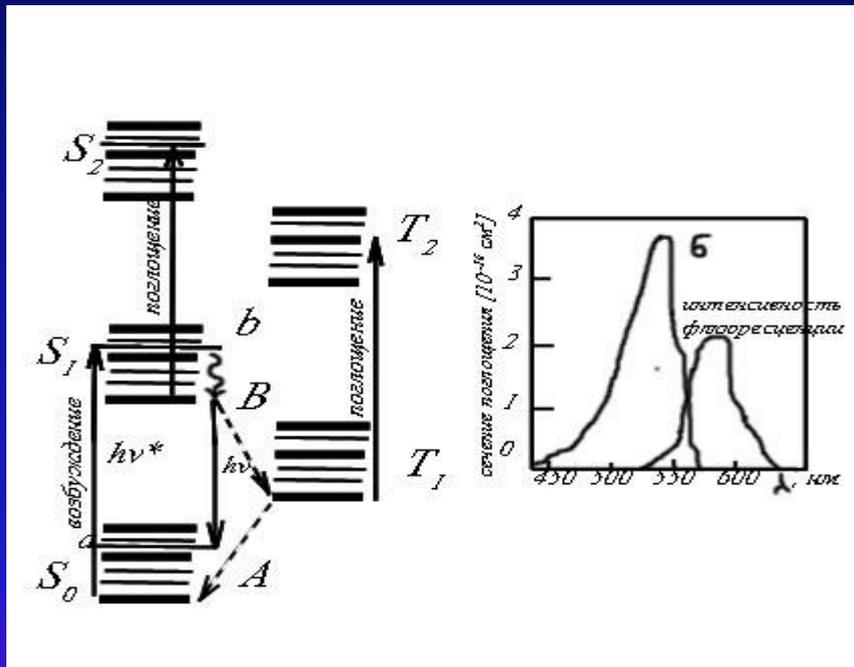
Энергетическая схема фотохимического процесса $A^* + B \rightarrow P$:

ΔE_1 — энергия активации темновой реакции;
 $A + B \rightarrow P$;

ΔE_2 — энергия активации фотохимической реакции $A^* + B \rightarrow P$ ($\Delta E_1 > \Delta E_2$) (Рубин А.Б., 2000).

Почти все фотохимические реакции протекают по одноквантовому механизму, что значит поглощение реагирующей молекулой всего одного кванта света. Исключение составляет лишь возбуждение в условиях действия мощного светового лазерного излучения, когда во время возбужденного состояния молекула успевает поглотить второй квант, так что становится возможным двухфотонное возбуждение одной молекулы и переход ее на верхние возбужденные уровни.

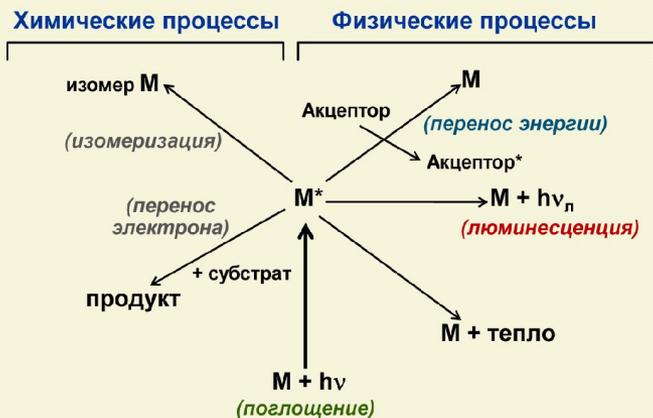
Для осуществления фотохимической реакции большое значение имеет время жизни возбужденного состояния, то есть тот промежуток во время которого сохраняется избыток энергии в молекуле. Поэтому во многих фотохимических реакциях участвуют молекулы находящиеся в триплетном возбужденном состоянии (T), где время жизни такой молекулы значительно больше, чем в синглетном состоянии (S).



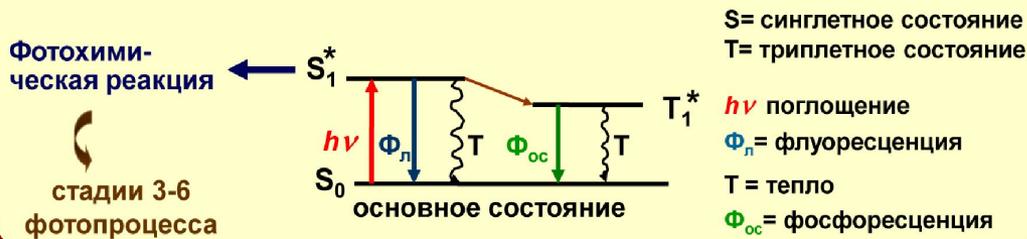
Состояние S_0 – основное, S_1, S_2, T_1, T_2 – возбуждённые, т.е. состояния, в которых один из электронов переведён на возбужденную орбиталь. Каждому из синглетных и триплетных состояний соответствует система колебательных (жирные линии) и вращательных подуровней. На синглетных состояниях (S) спин возбужденного электрона антипараллелен спину остальной части молекул, тогда как в триплетном состоянии (T) спины параллельны. Переходы между уровнями одинаковой мультиплетности разрешены правилами отбора и играют основную роль в полезном поглощении и флюоресценции. Разветвленная система колебательно-вращательных уровней молекул определяет большую ширину спектров поглощения и флюоресценции.

Имеется небольшая вероятность перехода $S_1 \rightarrow T_1$ в триплетное состояние T_1 . Время жизни молекулы в этом состоянии, ограниченное запрещенным переходом $T_1 \rightarrow S_0$, относительно велико. Поэтому триплетное состояние T_1 действует как ловушка для возбужденных молекул.

Первичные способы растраты энергии электронно-возбужденными молекулами



Пути растраты энергии при поглощении фотона света ($h\nu$)



Каждая возбужденная молекула растрчивает энергию путем только одного процесса (флуоресценции, фосфоресценции, фотохимической реакции или тепла)

Квантовый выход фотохимической реакции - это вероятность того, что молекула, поглотившая квант света, вступит в фотохимическую реакцию:

Число молекул, вступивших в реакцию

$$Q = \frac{\text{Число молекул, вступивших в реакцию}}{\text{Число молекул, поглотивших фотон}}$$

Число молекул, поглотивших фотон

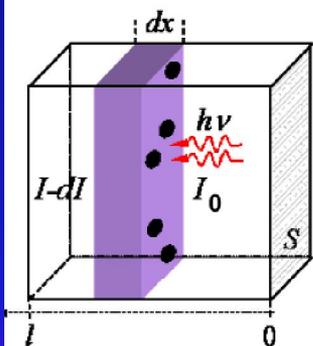
Эффективное сечение для фотохимического превращения:

$$\sigma = S * Q$$

Q - квантовый выход фотореакции

S: эффективное сечение поглощения

Закон поглощения света Бугера-Ламберта-Бера



$$\ln(I_0 / I) = S n l$$

n = концентрация молекул
 I_0 = интенсивность падающего света
 I = интенсивность света после поглощения
 S = эффективное сечение поглощения
 l = толщина образца

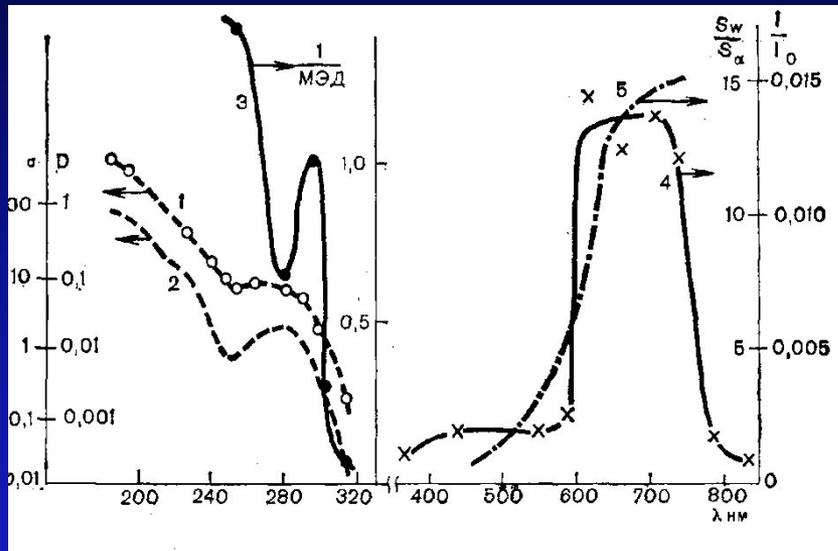
Эффективное сечение поглощения молекулы S - это площадь, при попадании в которую фотона, происходит захват его молекулой

Спектр поглощения – это зависимость эффективного сечения поглощения σ (или коэффициента поглощения) от длины волны света λ

Спектр действия – это зависимость:

а) Эффективного сечения фотохимических превращений σ от длины волны действующего света λ

б) зависимость фотобиологического эффекта от длины волны действующего света λ



Из уравнения $Q = \sigma / S$ напрямую следует, что спектр действия совпадает со спектром поглощения мишени для всех реакций, протекающих по одноударному механизму, если квантовый выход постоянен при всех длинах волн (закон Гротгуса–Варбурга). Сравнивая спектры поглощения и спектры фотобиологического действия можно определить молекулы, отвечающие за данный фотобиологический процесс

Спектры действия фотобиологических процессов:

1—спектр действия инактивации

2 — спектр поглощения трипсина (α —поперечное сечение инактивации, D — оптическая плотность).

3—спектр действия УФ-эритемы человека.

4 — спектр действия фотопериодической стимуляции полового созревания утят ($S_{\text{к}}/S_{\text{н}}$ — отношение размеров семенников конце и начале опыта),

5 — спектр пропускания (I/I_0) тканей головы утят со стороны глазных орбиталей до гипоталамуса



Фотохимические реакции молекул при их возбуждении ультрафиолетовым светом.

Первичные фотофизические и фотохимические процессы при действии УФ-излучения на белки

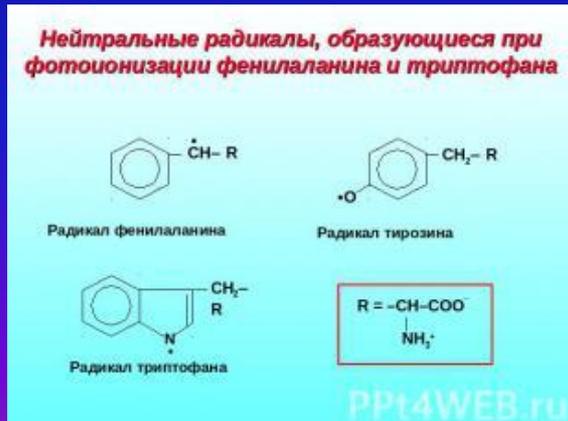
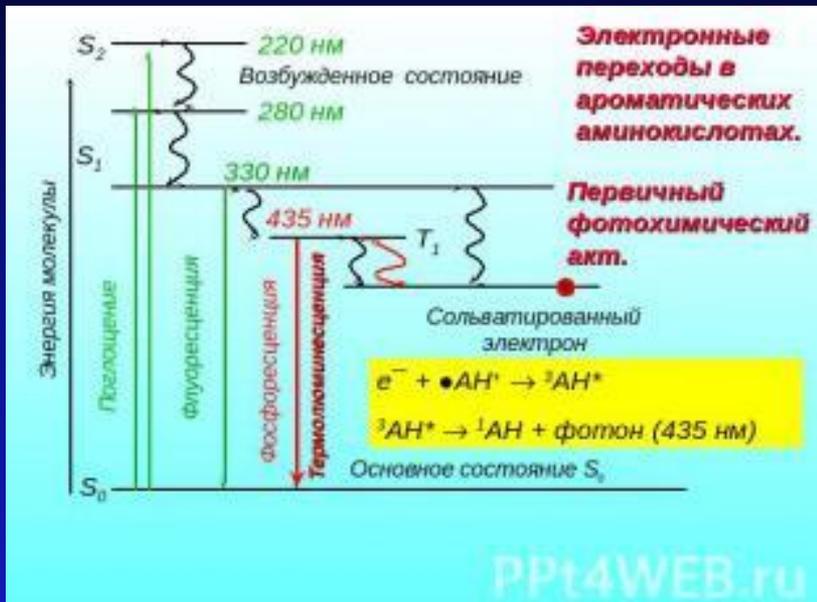


Схема фотохимических реакций в белках

Нативный белок

Ароматические группы (АН)

SH и -SS- группы

$\downarrow h\nu$ (280 нм)

$\downarrow h\nu$ (254 нм)

AOQ•

A• + H•

• AN• + e_s

S-S связи

Рекомбинация радикалов и хемилюминесценция

ДОФА, формил-кинуренин

-SH

Радикалы цистина

Фотолиз S-S или C-S связей

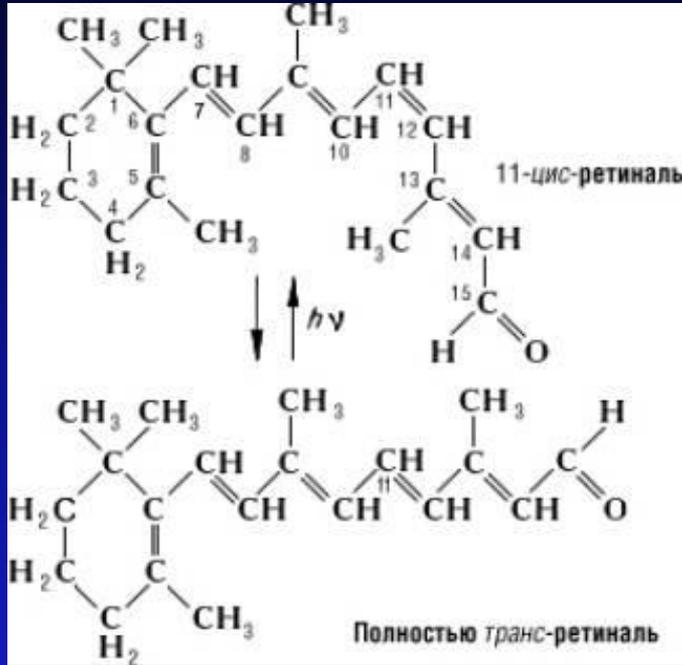
Поперечные сшивки между участками полипептидной цепи

Изменение конформации или разрушение активного центра

Инактивация

RPT4WEB.RU

Родопсин - основной структурно-функциональный компонент наружного сегмента палочек .



Родопсин, зрительный пурпур, основной палочек сетчатки позвоночных (кроме некоторых рыб и земноводных на ранних стадиях развития) и беспозвоночных животных. По химической природе родопсин - сложный белок, в состав которого входит 11-ретиаль (хромофорная группа), гликопротеид, и липиды (так называемая опсиновая часть). Молекулярная масса родопсина позвоночных около 40 000, головоногих моллюсков - около 70000. Зрительный акт начинается поглощением родопсином кванта света (максимум спектра поглощения 500 нм). При этом происходит изомеризация 11- ретиналя, что приводит к постепенному разложению (фотолизу) молекулы родопсина, изменению ионного транспорта в фоторецепторе и возникновению электрического сигнала, который передаётся нервным элементам сетчатки. Регенерация родопсина осуществляется или путём синтеза из 11- ретиналя и освободившегося после фотолиза опсина, или при поглощении второго кванта одним из промежуточных продуктов фотолиза, а также в процессе синтеза новых дисков наружного сегмента сетчатки (последний путь для палочек основной).

ПРЯМОЕ ДЕЙСТВИЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ



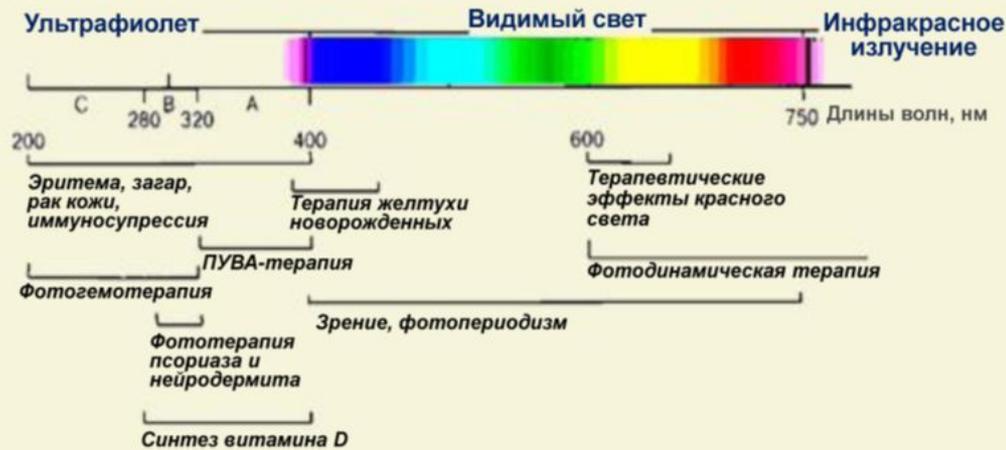
НЕПРЯМОЕ ДЕЙСТВИЕ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ



При поглощении квантов света молекулы переходят в нестабильное возбужденное состояние, что делает их более реакционноспособными. В результате могут образовываться как вполне устойчивые соединения, так и свободные радикалы и активные формы кислорода. Белки и нуклеиновые кислоты имеют максимум поглощения в УФ-области, поэтому они первыми испытывают на себе вредное воздействие УФ-излучения.

Затем, в результате свободнорадикальных реакций, повреждаются липидные структуры (липидные пласты эпидермиса и клеточные мембраны). Реакция окисления липидов с участием свободных радикалов (перекисное окисление липидов) имеет цепной характер и приводит к образованию большого количества активных форм кислорода, липидных гидроперекисей и других реакционноспособных молекул. Эти молекулы в свою очередь реагируют с белками и нуклеиновыми кислотами, повреждая их

Воздействие света разных длин волн вызывает разные фотобиологические эффекты



Инфракрасная область (длины волн более 750 нм) – тепловые эффекты.

Видимая область (400-750 нм) зрение, фотопериодизм.

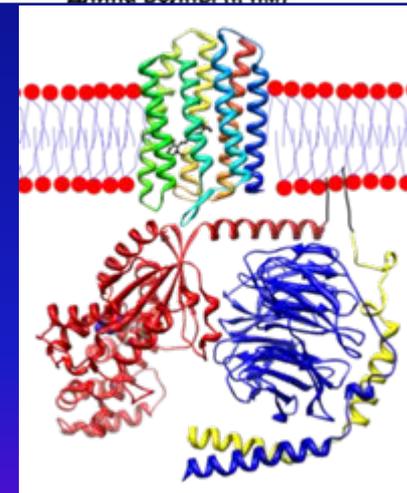
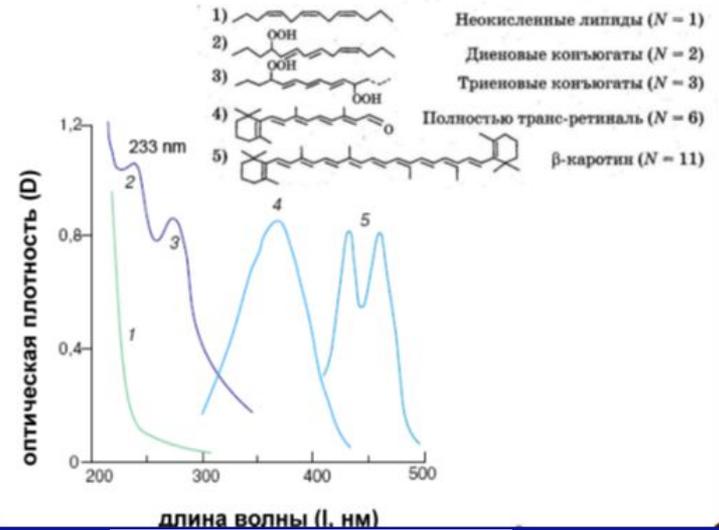
Ультрафиолетовая область (200-400 нм) разбивается на три участка:

УФ-А (315-400 нм) - загар, синтез витамина Д из провитаминов, фотоаллергические и сенсibilизированные фототоксические эффекты.

УФ-В (280-315 нм) - эритема, эдема, загар, ожог глаз, канцерогенез, синтез витамина Д

УФ-С (200-280 нм) - эритема, загар, канцерогенез, мутации, бактерицидный эффект.

Чем длиннее система сопряженных двойных связей, тем длинноволнее максимум поглощения



Спектр поглощения родопсина, содержит три основные полосы:

- α — (500 нм),
- β — (350 нм),
- γ — (280 нм).

Влияние электромагнитного поля

на:

Нервную систему

1. Нарушается передача нервных импульсов
2. Происходит угнетение высшей нервной деятельности
3. Ухудшается память
4. Нарушается структура капиллярного барьера головного мозга

Иммунную систему

1. Изменяется характер инфекционного процесса – течение инфекционного процесса отягощается аутоиммунной реакцией

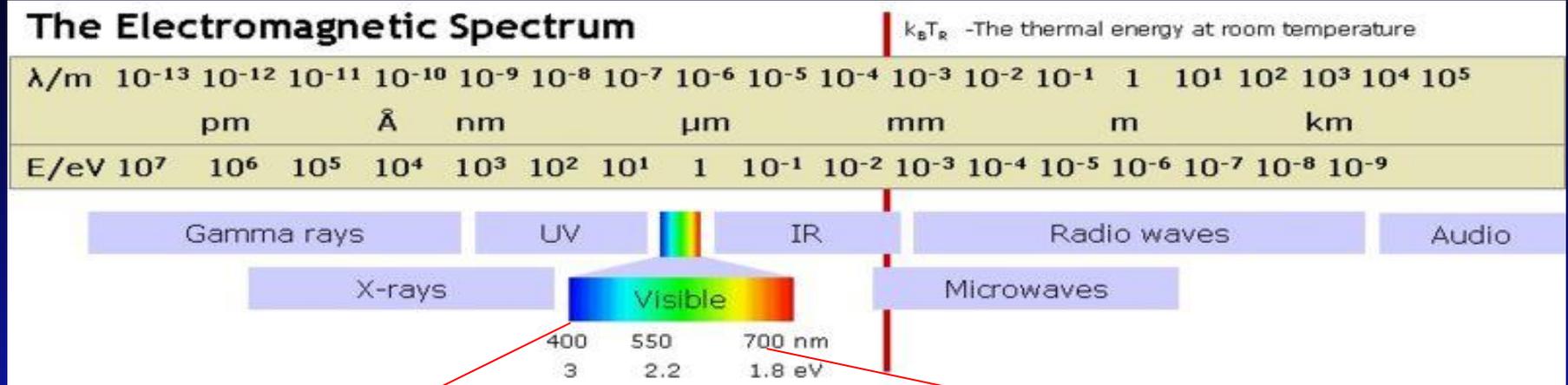
Эндокринно-регулятивную систему

1. Происходит стимуляция гипофиза, сопровождающаяся увеличением содержания адреналина в крови
2. Активизация процессов свертывания крови

Половую систему

1. Снижение активности половых клеток
2. Патология развития эмбриона на различных стадиях беременности
3. Преждевременные роды
4. Снижение скорости развития плода.

ЭФФЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ СВЕТА



В УФ области спектра (UVA, 315-400 нм):

- Повышение тонуса симпатико-адреналиновой системы и уровня неспецифического иммунитета
- Увеличение секреции ряда гормонов
- Образование витамина Д
- Увеличение риска возникновения рака кожи и ожога сетчатки
- Повреждение ДНК хромосом клеток кожи
- Деструкция коллагена.

В красной области спектра (630-700 нм):

- Активация метаболизма клеток и повышение их функциональной активности
- Стимуляция репаративных процессов
- Противовоспалительное действие
- Активация микроциркуляции крови и повышение уровня трофического обеспечения тканей
- Анальгезирующее действие
- Иммуностимулирующее действие.

Возможные механизмы влияния красного света:

- 1) **Неспецифическое действие излучения на биополимеры** (белки (Березин и др., 1983), липиды (Kaufmann R., 1980), мембраны (Козлов, 1997), ферменты (Kozlov et al., 1993), в результате которого меняется конформационное строение последних (Москвин и Ачилов, 2008) и их функциональное состояние (Овсянников и др., 1999).
- 2) **Образование АФК** (Захаров и др., 1989). Незначительное повышение концентрации вызывает множество откликов (Kaneko et al., 1990; Murphy et al., 1988; Gamaley and Klyubin I.V., 1999).
- 3) **Конверсия поглощенной энергии излучения в тепло** (Рогаткин и Черный, 1999).
- 4) **Действие на фотоакцепторы.**

Возможные фотоакцепторы в красной области спектра

- **Каталаза** → влияние на антиоксидантную систему организма с последующими физиологическими эффектами при тех или иных заболеваниях (Зубкова и Крылов, 1976)
- **Супероксиддисмутаза** → повышение антиоксидантного статуса в тканях и снижение уровня перекисного окисления липидов (Горбатенкова и др., 1988).
- **Церрулоплазмин**, катализирующий окисление полифенолов и полиаминов в плазме (Брилль Г.Е., 1999).
- **Порфирины**, входят в состав небелковой части молекулы гемоглобина, хлорофилла, ряда ферментов (Гамалея и др., 1987).
- **Цитохром с оксидаза** → увеличение энергетики клетки и др. (Кару и др., 1992).



фотон

Активация
цитохром с
оксидазы



Выработка
малых
концентраций
АФК, NO

- 1) Сверхрегуляция протеинкиназ
- 2) Активация различных факторов: увеличение внутриклеточной концентрации Ca^{2+} , активации мембранных ферментов Na^+/H^+ антипорта и Ca -АТФазы, освобождение арахидоновой кислоты и др.

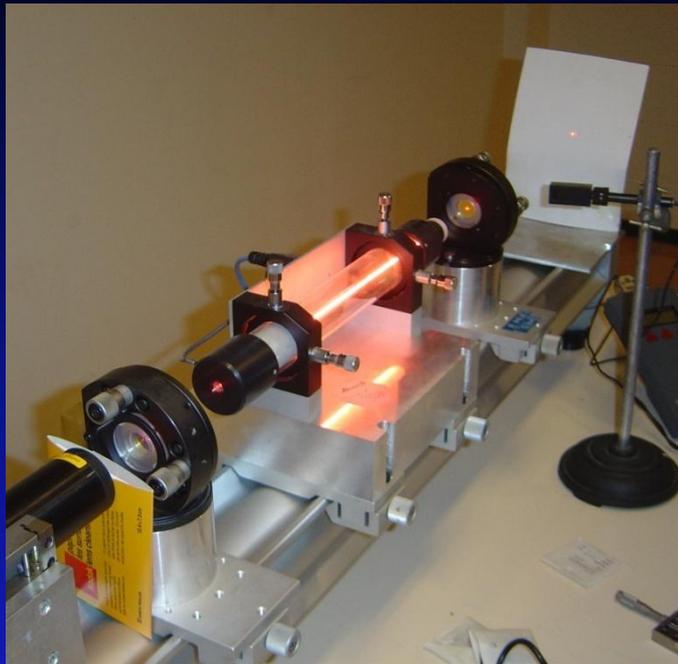
Запуск каскадов сигнальной
трансдукции

- TPKR/Ras/Raf/MEK/ERK/Muk1/eIF4E/циклин D-каскад.
- TPKR/PI3K/Akt/mTOR/eIF4E-каскад.
- PI3K/Akt/eNOS-каскад.
- TPKR/PLC- γ /PKC-каскад
- $\Delta\Psi_m$ /АТФ/цАМФ/JNK/AP-каскад.
- АФК/Src-каскад.

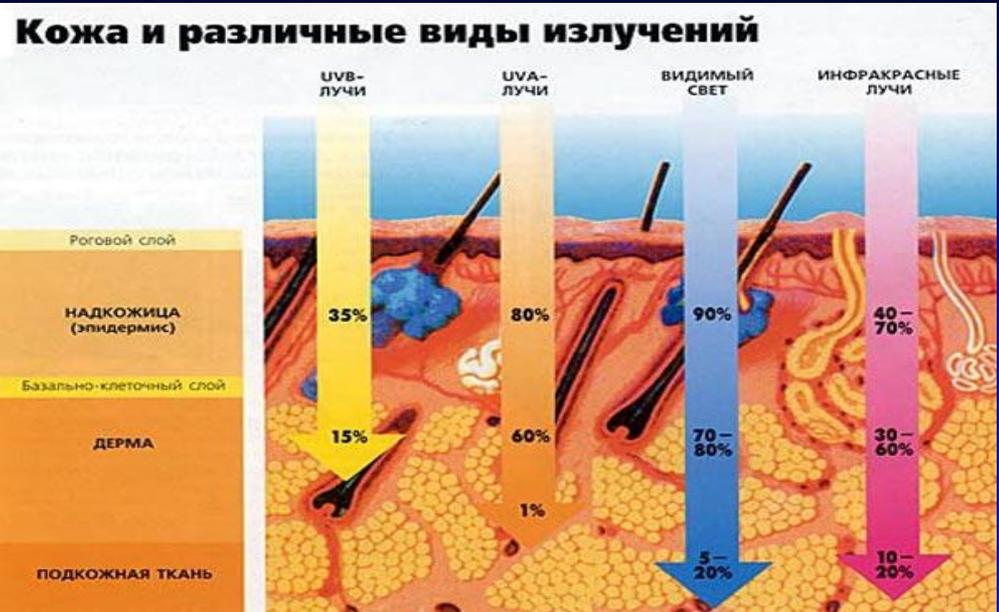
Увеличение
выработки
АТФ

- 1) Активация актин-миозинового комплекса
- 2) Активация белков-переносчиков
- 3) Индукция экспрессии и секреции регуляторных молекул.

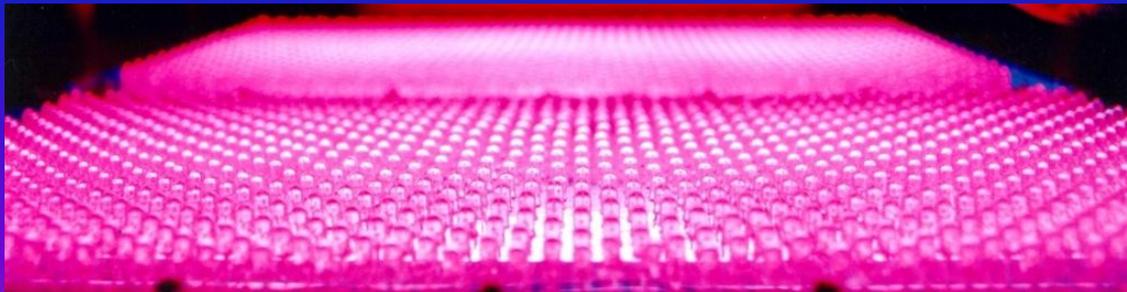
He-Ne лазер



В диапазоне длин волн от 650 до 1200 нм наблюдается оптическая прозрачность биологических тканей



LED



Фотомедицина – это раздел медицины, в котором световое излучение применяют для диагностики и лечения

Фототерапия - применение излучения (УФ, красного, ИК) для лечения кожных, аутоиммунных, онкологических заболеваний/ Свет, который применяется при фототерапии, поглощается специфическими хромофорами в тканях:

- Эндогенные хромофоры: ДНК, белки, гемоглобин
- Экзогенные хромофоры: фоточувствительные красители (фотосенсибилизаторы)

1. Ультрафиолетовая терапия, основанная на облучении поверхности тела УФ лучами.
2. ПУФО терапия – облучение поверхности кожи ближним ультрафиолетом после приема больными фурукумаринов (таких как псорален) с целью лечения псориаза и некоторых других кожных болезней.
3. УФО крови (фотоферез) – облучение крови больных УФ лучами с целью улучшения общего состояния больных сердечно-сосудистыми и некоторыми другими заболеваниями.
4. Фотодинамическая терапия раковой болезни – избирательное разрушение раковых клеток и ткани при облучении зоны опухоли после приема больным фотосенсибилизаторов, таких как порфирины или фталоцианины..
5. Лазерная терапия - ускорение заживления ран, улучшение микроциркуляции или общего кровообращения при облучении светом лазера раны или крови больного без использования экзогенных сенсбилизаторов.

Общая классификация неионизирующих электромагнитных излучений

Вид излучения	Диапазон длин волн	Диапазон частот	Энергия кванта
Ультрафиолетовое	100 - 400 нм	3000 – 750 ТГц	12.4 – 3.11 эВ
Оптическое	400 - 780 нм	750 – 385 ТГц	3.11 – 1.58 эВ
Инфракрасное	780 нм - 0.1 мм	385 - 3 ТГц	1.58 эВ- 1.24 мэВ
Гипервысокочастотное	0.1 - 1 мм	3000 – 300 ГГц	1.24 мэВ-1240 мкэВ
Сверхвысокочастотное или микроволновое	1 мм – 1 м	300 – 0.3 ГГц	1240 мкэВ-1240 нэВ
Радиочастотное	1 м – 1 км	300 – 0.3 МГц	1240 нэВ-1240 пэВ
Низкочастотное	1 – 10 км	300 кГц – 3 Гц	1240 пэВ-12.4 фэВ

- ЭМИ – более длинноволновые, по сравнению с ионизирующими (гамма- и рентгеновским)
- Границы диапазонов ЭМИ приняты условно (!)
- Радиочастотные и микроволновые ЭМИ наиболее широко используются человеком. От энергии ЭМИ зависит проникновение и взаимодействие с биологическими объектами

Оценка токсичности ЭМИ от бытового модема



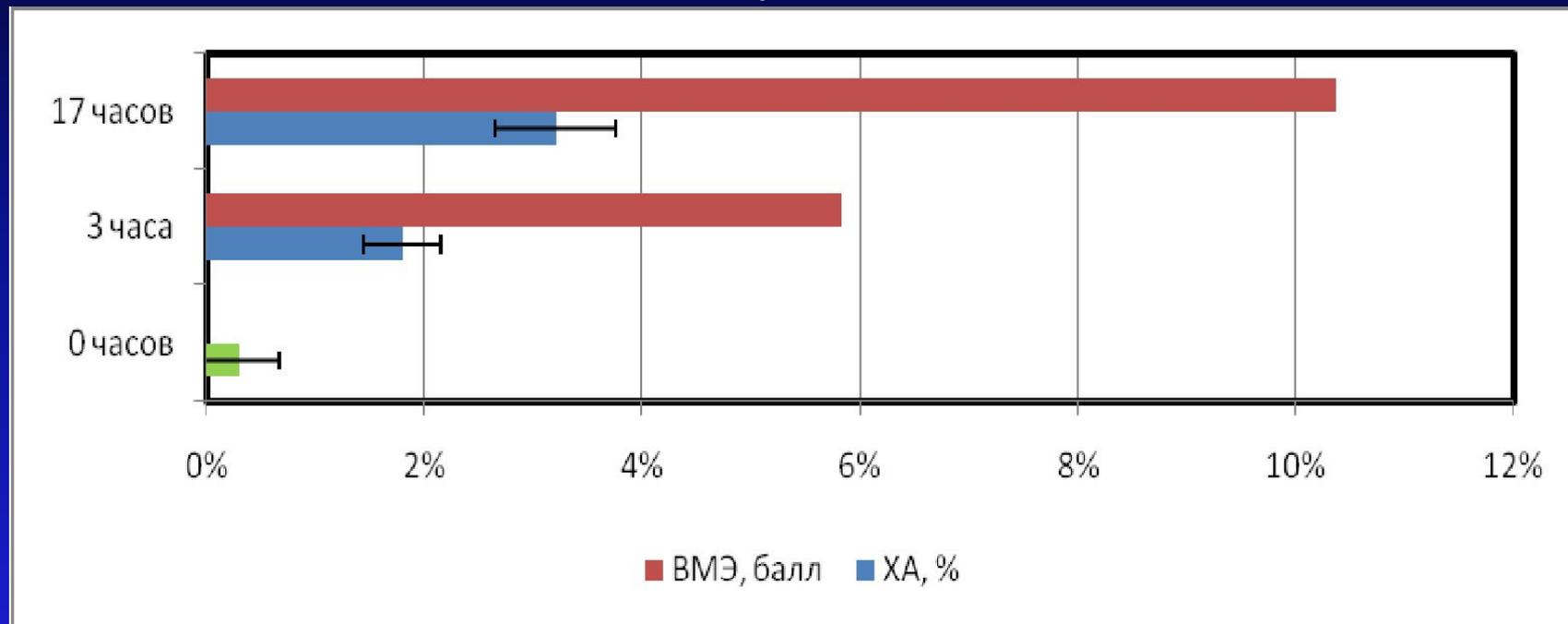
Проращивание
семян и рост
проростков (бытовое
исследование)

Слева - облученные семена, справа - необлученные
семена http://www.izluchenie.net/vliynie_izlucheniya.html

Оценка токсичности ЭМИ от сотового телефона

Motorolla C115 (0,88 Вт/кг), C650 (1.4 Вт/кг)

выполнена в Ярославском гос. ун-те. и ИБВВ РАН на проростках корешков
лука *



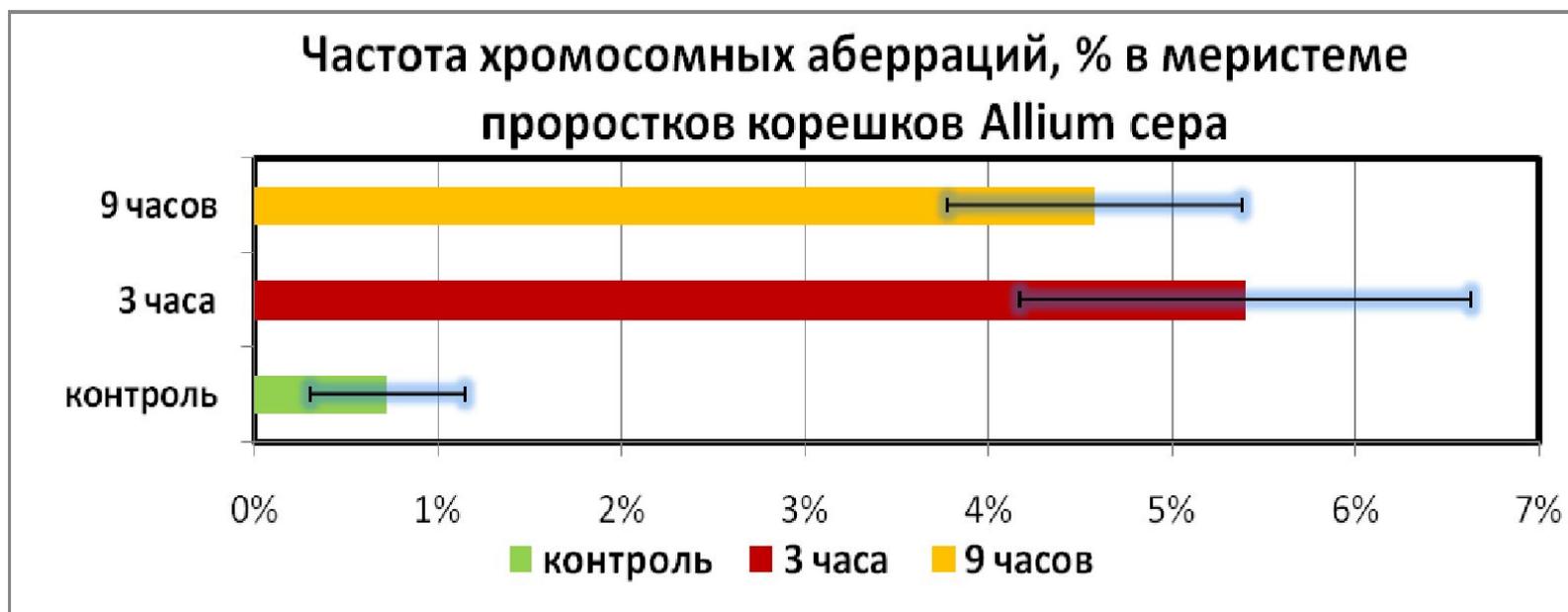
Уровень мутаций (ХА, доля аберрантных клеток) и выраженность мутагенного эффекта (VMЭ, доля аберрантных клеток от контроля) при 3 и 17 часовом облучении <http://www.izluchenie.net/Genom.pdf>

* Allium test, (Fiskesjo G. 1985. The Allium test as a standard in environment monitoring. Hereditas, 102: 99-112.)

Оценка токсичности ЭМИ от сотового телефона

Motorolla C115 (0,88 Вт/кг), C650 (1.4 Вт/кг)

выполнена в Ярославском гос. ун-те. и ИБВВ РАН на проростках корешков лука *



Хромосомные aberrации и отставания (*анателофазные мутации*)

<http://www.izluchenie.net/Genom.pdf>

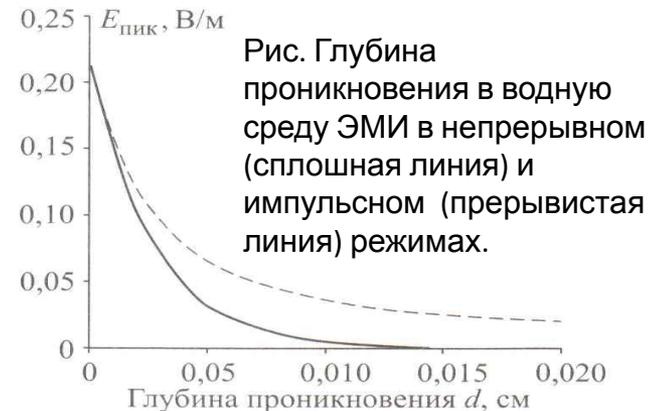
Взаимодействие ЭМИ с биологическими объектами

Биологические реакции зависят от:

- Характеристик излучения (интенсивности, частоты)
- Времени облучения
- Поляризации
- Вида модуляции (непрерывное, импульсное)
- Величины поглощенной энергии
- Свойств биологического объекта (содержание воды, размер и пр.)

В классической электродинамике взаимодействие ЭМИ с веществом определяется диэлектрической (ϵ) и магнитной проницаемостью (μ) среды, проводимостью (σ)

При взаимодействии ЭМИ с тканями главным образом принимают во внимание взаимодействие с электрической составляющей ЭМИ.



См. подробно Цыб с соавт., 2008.

Биогенный магнетизм

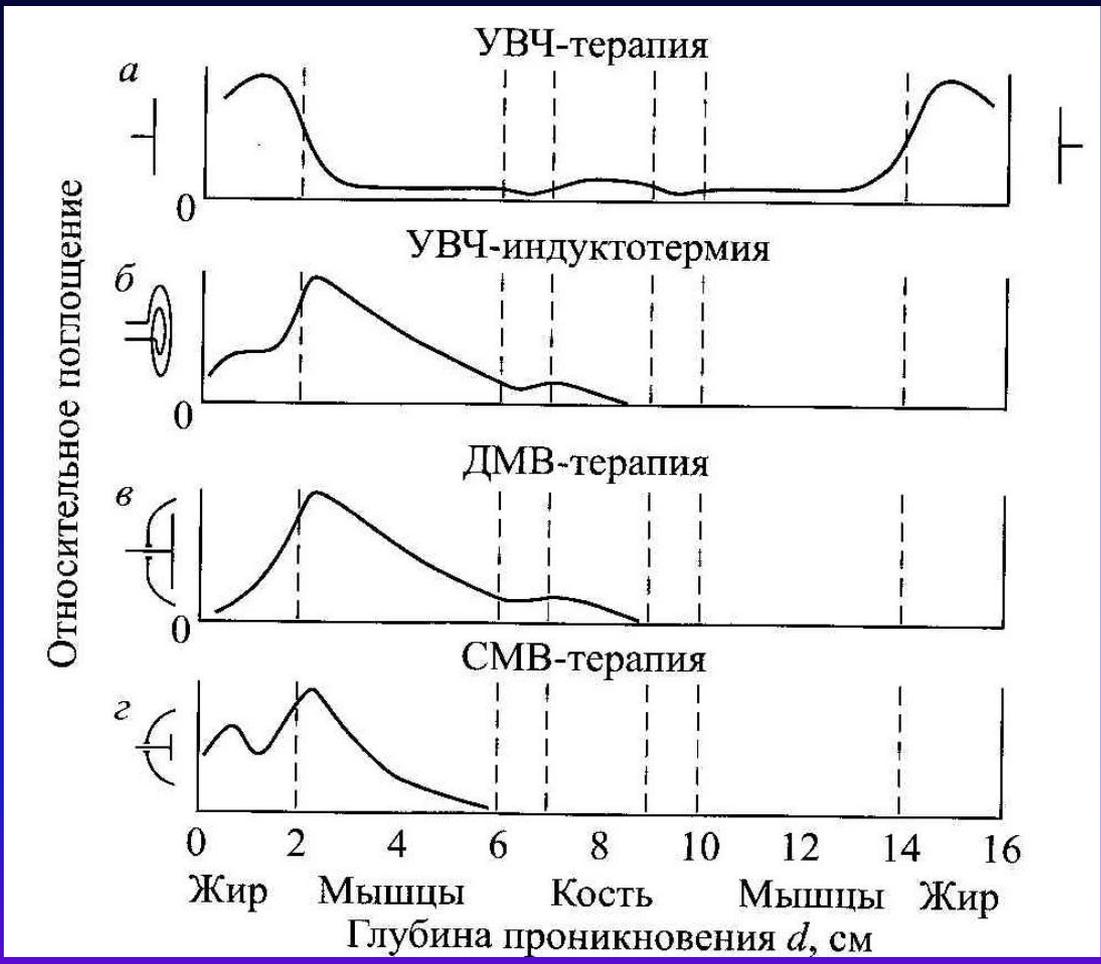
- Чувствительность к геомагнитному полю некоторых бактерий, рыб, птиц и высших животных
- Причина – скопление в тканях окисного железа (Fe_3O_4) в виде ферромагнитных кристаллов. Ферромагнитные кристаллы реагируют на изменение внешнего магнитного поля.
- В головном мозге человека в 1 г ткани содержится не менее 5×10^6 кристаллов магнетика.
- Животные используют биогенный магнетизм для навигации.

Применение ЭМИ в медицине

• **Терапия** (эффекты за счет усиления кровотока, увеличения скорости биохимических реакций, интенсификации метаболизма и др.)

Частоты (длины волн)	Области применения
13,56 МГц (22,12 м) 27,12 МГц (11,06 м) 40,68 МГц (7,38 м)	Ультравысокочастотная (УВЧ) терапия, гипертермия
433 МГц (6,93 дм)* 460 МГц (6,52 дм)** 915 МГц (3,28 дм)	Дециметровая (ДМВ) терапия, гипертермия
2450 МГц (12,2 см)	Сантиметровая (СМВ) терапия, гипертермия, микроволновая (МКВ) томография
42,19 ГГц (7,1 мм) 53,53 ГГц (5,6 мм) 61,25 ГГц (4,9 мм)	Миллиметровая (ММВ) терапия
* — используется в странах Евросоюза ** — используется в Российской Федерации	

Подробнее см. в Кудряшов и др., 2008



Глубина проникновения и структура распределения энергии ЭМИ в тканях в зависимости от частоты, способа облучения и используемых излучателей

В жировые ткани проникает глубже (!), т.к. в них нет воды

Механизмы взаимодействия ЭМИ с

Классификация плотности потока энергии (ППЭ) для ЭМИ МКВ-диапазона (300 МГц-300 ГГц) по биологическим эффектам. Принята в 1973 г.

Интенсивности ЭМИ	ППЭ, мВт/см²	Выраженность теплового эффекта
Высокие (встречаются чаще при ЧС на производствах)	> 10	Отчетливая выраженность
Средние	1 – 10	Слабая, но различимая
низкие	< 10	Отсутствие или неявная выраженность

- 1. Тепловой механизм** – образование тепла в объекте при его облучении ЭМИ высоких интенсивностей (ППЭ=10 и более мВт/см²). Образовавшееся тепло является причиной ответных биологических реакций;
- 2. Микротепловой механизм** - При слаботепловом действии нагревания всего объекта не происходит, но возможны локальные повышения температуры – «горячие пятна».
- 3. Нетепловой механизм (информационный)**– отсутствие повышения температуры при действии ЭМИ низкой интенсивности. Однако ответные биологические реакции возникают.

Отличие механизма теплового действия ИФК от УВЧ и СВЧ

- СВЧ и УВЧ проникает в ткани более глубоко
- ИФК – спектр волн, который индуцирует стохастические колебания молекул
- СВЧ и УВЧ - единственная частота – индуцирует упорядоченные синхронные колебания дипольных молекул
- В итоге - Эффективность нагрева ИФК значительно (в 3-5 раз) ниже
- Собственное ИФК- и СВЧ-излучение человека используется при термографии (от 0,1 оС между точками).
- ИФК-термография -(тепловидение) – распределение тепла в неглубоко расположенных органах)
- СВЧ-термография - в более глубоко расположенных органах

Тепловая концепция

- При тепловом (энергетическом) действии биологический эффект вызывает энергия ЭМИ, которая поглощается и утилизируется биологическим объектом. Величина ответной реакции пропорциональна энергии ЭМИ, т.е. интенсивности (ППЭ), поглощенной дозе и времени облучения.
- Тепловое действие для ЭМИ РЧ- и МКВ-диапазона начинается с величины ППЭ=1 Вт/м², которые сопоставимы с энергетическим обменом организма животного и человека.
- Для возникновения биологического эффекта необходима энергия больше или соизмеримая с тепловой энергией броуновского движения молекул.
- Специфика при облучении ЭМИ – температура повышается не в окружающей среде или на поверхности тела, а внутри организма.
- В зависимости от электрических свойств тканей тепло распределяется неравномерно.

Нетепловая концепция — организм воспринимает ЭМИ низких интенсивностей также, как другие внешние факторы (освещенность, температура, барометрическое давление и т.п.)

- **Сигнальное действие** – проявляется на уровне целостного организма.

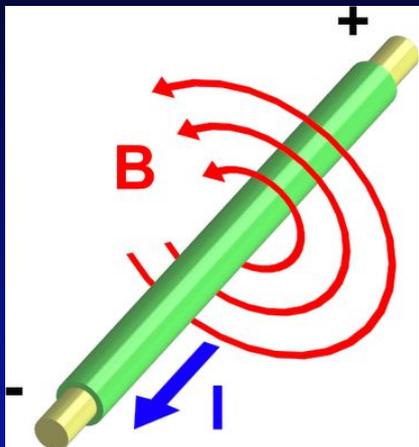
Эффект триггера – перевод системы из одного состояния в другое.

Изменение поведения животного (двигательная активность, ориентация в пространстве и времени – например, перелетные птицы). У человека проявляется в субъективных ощущениях, галлюцинации

- **Регулирующее действие** - изменение функционального состояния объекта. Реакция зависит только от параметров ЭМИ (вид модуляции и ее частота).
- **Дестабилизирующее действие** – увеличение отклонений любых показателей биологических реакций по сравнению с интактным объектом.

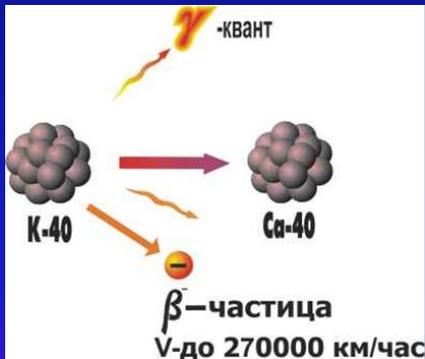
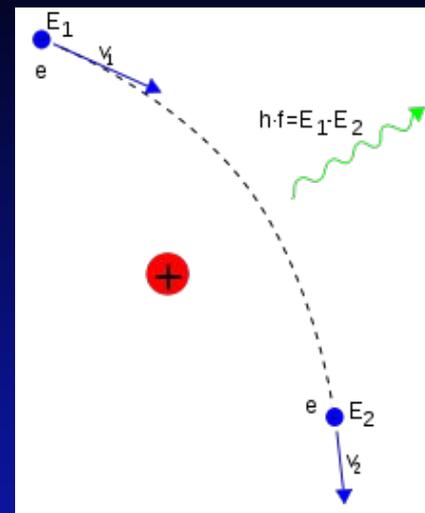
См.дополнительно Цыб и др., 2008)

Различают корпускулярное излучение, состоящее из частиц с массой отличной от нуля, и электромагнитное (фотонное) излучение. По характеру воздействия различают ионизирующее и неионизирующее излучения.



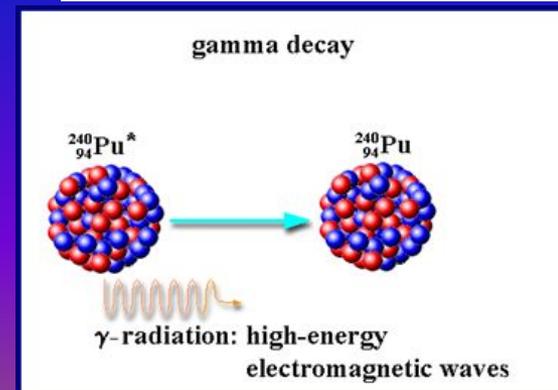
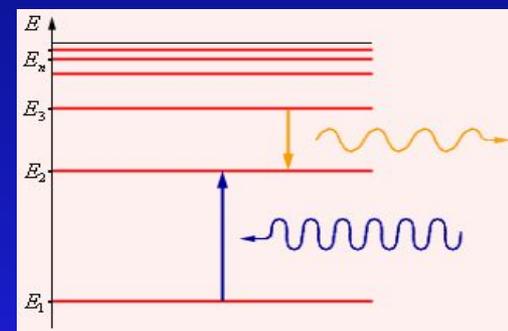
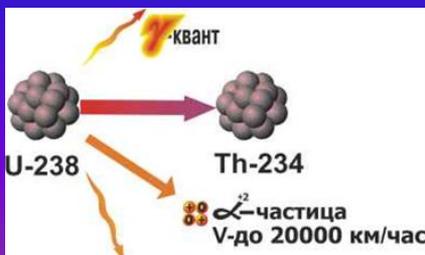
Тормозное излучение — электромагнитное излучение, испускаемое заряженной частицей при её торможении в электрическом поле

Синхротронное (или магнитотормозное) излучение — электромагнитное излучение, испускаемое заряженными частицами, движущимися с релятивистскими скоростями по траекториям, искривлённым магнитным полем



Дипольное излучение - излучение, обусловленное изменением во времени дипольного момента системы

Радиоактивный распад — спонтанное изменение состава или внутреннего строения нестабильных атомных ядер (заряда Z , массового числа A) путём испускания элементарных частиц, гамма-квантов и/или ядерных фрагментов



Ионизирующее излучение - излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков

Рентгеновское излучение — электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на шкале электромагнитных волн между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от 10^{-2} до 10^2 Å (от 10^{-12} до 10^{-8} м). Рентгеновские лучи испускаются при торможении ускоренного потока заряженных частиц (тормозное излучение) или же при возникновении высокоэнергетичных переходов в электронных оболочках атомов (характеристическое излучение).

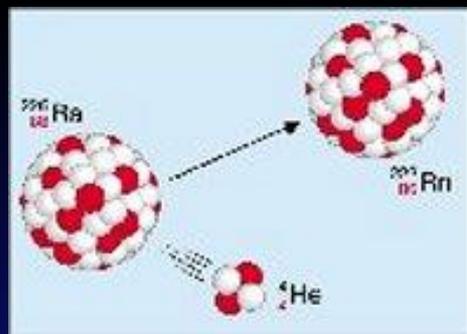
Гамма-излучение (γ -лучи) — вид электромагнитного излучения с чрезвычайно малой длиной волны — менее $2 \cdot 10^{-10}$ м — и, вследствие этого, ярко выраженными корпускулярными и слабо выраженными волновыми свойствами. Гамма-излучение испускается при переходах между возбуждёнными состояниями атомных ядер.

Альфа излучение - положительно заряженные ядра гелия ${}^4\text{He}^{2+}$ (2p,2n), испускаемые при распаде ядер урана, радия, радона, полония и плутония или при ядерных реакциях, превращениях

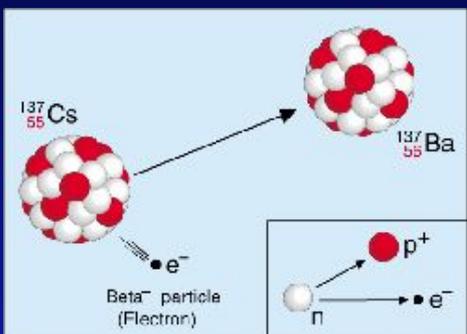
Бета-излучение – это быстрые электроны или позитроны (β^- или β^+ - частицы), возникающие при распаде ядер и нестабильных частиц. В качестве источников чистого β^- -излучения применяются ${}^{32}\text{P}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{90}\text{Sr}$ и др.

Протонное излучение – образуется в процессе самопроизвольного распада нейтроннодефицитных атомных ядер или как выходной пучок ионного ускорителя (например, синхрофазотрона).

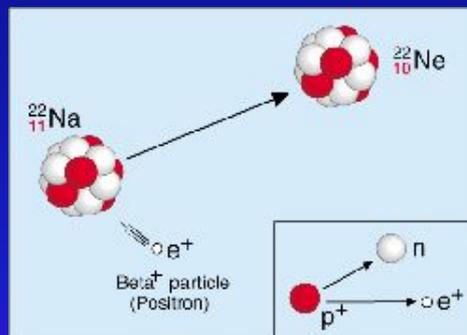
Нейтронное излучение — это поток нейтронов, которые вследствие отсутствия заряда свободно взаимодействуют с ядрами атомов, вызывая ядерные реакции. Нейтронное излучение образуется при работе ускорителей элементарных частиц, ядерных реакторов и т. д. Нейтронное излучение обладает наибольшей проникающей способностью.



Альфа-распад - это испускание из ядра атома альфа-частицы, которая состоит из 2 протонов и 2 нейтронов. Альфа-частица имеет массу 4 единицы, заряд +2 и является ядром атома гелия. Альфа-распад - характерный вид радиоактивного распада для естественных радиоактивных элементов шестого и седьмого периодов таблицы Д. И. Менделеева (уран, торий и продукты их распада до висмута включительно) и особенно для искусственных - трансурановых - элементов. Альфа частицы заряжены положительно.

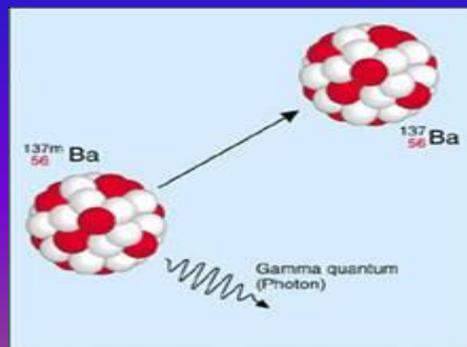


Бета-минус распад - это выбрасывание (испускание) из ядра бета-минус частицы (электрона) или бета-плюс частицы (позитрона) в результате самопроизвольного превращения одного из нейтронов в протон и электрон.



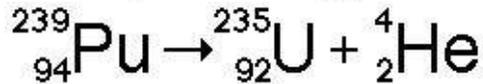
Бета-плюс распад - это выбрасывание (испускание) из ядра бета-плюс частицы (позитрона) в результате самопроизвольного превращения одного из протонов в нейтрон и позитрон.

Захват электрона, как правило, классифицируется как тип бета-распада и включает в себя поглощение ядром орбитального электрона в результате самопроизвольного превращения одного из протонов в нейтрон

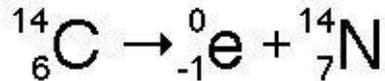


Мягкое гамма-излучение образуется при энергетических переходах внутри атомных ядер, более жесткое — при ядерных реакциях. Гамма-кванты сверхвысоких энергий рождаются при столкновении заряженных частиц, разогнанных мощными электромагнитными полями

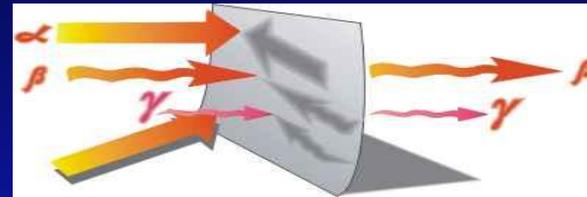
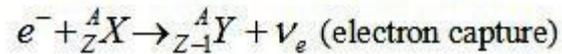
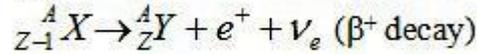
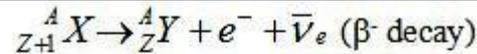
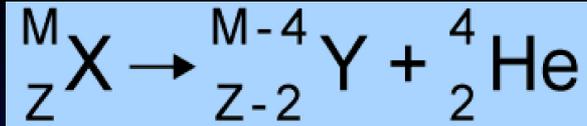
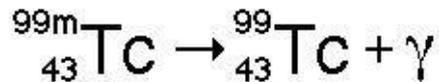
α - decay



β - decay



γ - decay



Пробег альфа-частиц зависит от начальной энергии и обычно колеблется в пределах от 3-х до 7 (редко до 13) см в воздухе, а в плотных средах составляет сотые доли мм Из-за своей массы и заряда альфа-частицы обладают наибольшей ионизирующей способностью, они разрушают всё на своём пути. И поэтому альфа-активные радионуклиды являются наиболее опасными для человека и животных при попадании внутрь.

Проникающая способность бета-частиц, образовавшихся при радиоактивном распаде, в воздухе достигает 2-3 м, в воде и других жидкостях измеряется сантиметрами, в твёрдых телах - долями см. В ткани организма бета-излучение проникает на глубину 1-2 см. Из за малых размеров, массы и заряда бета-частицы обладают гораздо меньшей ионизирующей способностью, чем альфа-частицы.

Пробег γ -кванта в воздухе может достигать десятков и сотен метров (также в зависимости от энергии), но при меньшей ионизирующей способности. Для 10-кратного ослабления гамма-излучения кобальта-60 ($E = 1,17$ и $1,33$ Мэв) требуется защита из свинца толщиной порядка 5 см, а для 100-кратного - 9,5 см; защита из бетона должна быть, соответственно, около 33 и 55 см, а толщина слоя воды - 70 и 115 см

Физические механизмы действия излучений на молекулы и клетки

Проникающие в ткани организма заряженные альфа- и бета-частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, близ которых они проходят. Гамма-излучение и рентгеновские лучи передают свою энергию веществу несколькими способами, которые в конечном счете также приводят к электрическим взаимодействиям.

Электрические взаимодействия. За время порядка десяти триллионных секунды после того, как проникающее излучение достигнет соответствующего атома в ткани организма, от этого атома отрывается электрон, т.е. происходит ионизация. Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы.

Физико-химические изменения. И свободный электрон, и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и в течение следующих десяти миллиардных долей секунды участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционноспособные, как "свободные радикалы"

Химические изменения. В течение следующих миллионных долей секунды образовавшиеся свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и могут вызвать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки

Биологические эффекты. Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток, или такие изменения в них могут привести к раку

Величина ЛПЭ (линейная передача энергии) – важнейшая радиобиологическая характеристика излучения, показатель его биологической эффективности или «качества».

Физическая природа частиц или квантов не сказывается на специфике биологического действия, например, при равных ЛПЭ наблюдают одинаково эффективное подавление размножения клеток как в результате рентгеновского облучения, так и при действии α -частиц

$$L = \frac{\text{энергия, переданная частицей к веществу, кэВ}}{\text{расстояние, пройденное частицей, мкм}}$$

Пробег частицы – длина ее пути в веществе до полной остановки, т.о. величина ЛПЭ в кэВ/мкм зависит от плотности вещества. Чем выше значение ЛПЭ, тем больше энергии оставляет частица на единицу пути, тем плотнее распределены создаваемые ионы вдоль трека.

Линейной плотностью ионизации (ЛПИ) называют отношение L/W , где L – ЛПЭ, W – энергия, необходимая для образования одной пары ионов.

На различных биологических объектах было проведено сопоставление эффективности различных типов ионизирующих частиц и введены коэффициенты, которые для каждой конкретной биологической системы называют эффективностью данного типа излучения по сравнению с выбранным стандартным излучением.

Коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) определяется из соотношения:

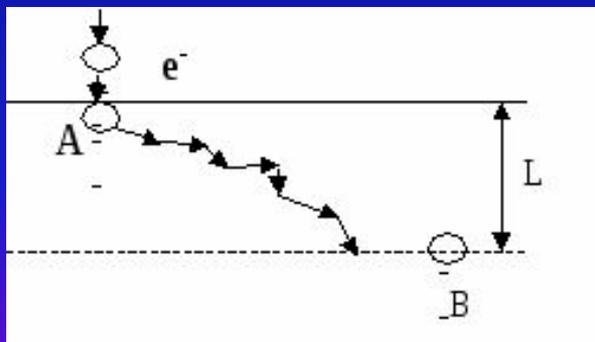
$$\text{ОБЭ} = \frac{\text{биологическая эффективность исследуемого излучения}}{\text{биологическая эффективность рентгеновского излучения с энергией примерно 200кэВ}} = \frac{\text{поглощенная доза, необходимая для получения данного биологического эффекта при воздействии рентгеновским излучением 200кэВ (в грях)}}{\text{поглощенная доза исследуемого излучения, необходимая для получения того же биологического эффекта (в грях)}}$$

Длина пробега, потеря энергии и число первичных ионов при прохождении α -частиц в тканях плотностью 1г/см^3 .

Длина пробега, потеря энергии и число первичных ионов, вызываемых электронами в ткани плотностью 1 г/см^3 .

Энергия α -частиц, МэВ	ЛПЭ, КэВ/мкм	Длина пробега, МКМ	Число пар ионов/мкм
1	263,9	5,3	6207,0
3	134,6	16,8	2031,0
6	82,01	47,0	1109,0
9	60,41	91,6	775,4
10	55,71	108,4	706,4

Энергия электронов, КэВ	Длина пробега, мкм	Потеря энергии, КэВ/мкм	Число пар ионов/мкм
0,1	0,003	33,23	1697
0,2	0,006	28,71	843,1
0,8	0,038	14,17	285,3
2,0	0,1595	7,680	127,8
9,5	2,303	2,367	31,90
22,5	10,51	1,233	15,06
45,0	35,76	0,7255	8,452
90,0	118,0	0,4462	4,986
150,0	278,1	0,3278	3,567
450,0	1508,5	0,2108	2,166



Истинная и практическая длина пробега электронов в веществе. Путь от А до В – истинная длина пробега, L – практическая длина пробега (проникновения).

При одинаковых поглощенных дозах различные виды радиации производят неодинаковое биологическое воздействие на организм. Обусловлено это тем, что более тяжелая **частица** (например, протон) производит на единице пути в ткани больше ионов, чем легкая (например, электрон). При одной и той же поглощенной дозе радиобиологический разрушительный эффект тем выше, чем плотнее ионизация, создаваемая излучением.

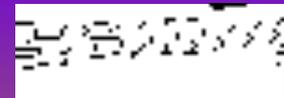
Излучение	Q (Зв/Гр)
Рентгеновские и γ -лучи до 3Мэв	1
Электроны и позитроны, β -лучи до 3Мэв	1
Медленные нейтроны (до 20кЭв)	3
Протоны и дейтроны (0,5-10Мэв)	10
Быстрые нейтроны до (0,1-10 Мэв)	10
Тяжелые ионы	20
α -излучение с энергией меньше 10МэВ	20

В системе СИ единицей измерения экспозиционной дозы D является кулон, деленный на килограмм (Кл/кг). Внесистемная единица — рентген (Р): $1 \text{ Кл/кг} = 3880 \text{ Р}$
 На всех современных радиометрах единицы измерения - зиверты : $1 \text{ Зв} = 100 \text{ Р}$

За единицу измерения поглощенной дозы в системе СИ принят грэй (Гр). 1 Гр — это такая доза, при которой массе 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж. Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад.

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад.}$$

Для оценки возможного ущерба здоровью при хроническом воздействии ионизирующего излучения произвольного состава введено понятие **эквивалентной дозы (H)**. Эта величина определяется как произведение поглощенной дозы D на средний коэффициент качества излучения Q (относительная биологическая эффективность) в данной точке ткани человеческого тела, т. е.:



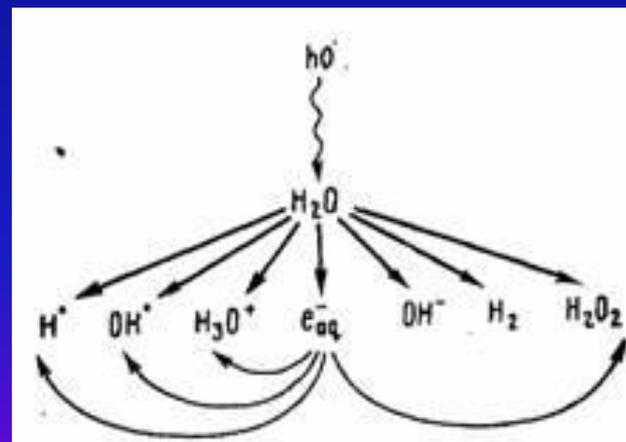
Первичные процессы, приводящие к инактивации макромолекул при действии ионизирующих излучений

В механизме действия ионизирующих излучений на живые объекты можно условно выделить две основных стадии. Первая определяется как первичное (непосредственное) действие излучения на биохимические процессы, функции и структуры органов и тканей. Вторая стадия – опосредованное (косвенное) действие, которое обусловлено нейрогенными и гуморальными сдвигами, возникающими в организме под влиянием радиации

Прямое действие излучения – это непосредственное взаимодействие ионизирующего излучения с критическими молекулами, которые превращаются в свободные радикалы



При косвенном действии ионизирующего излучения наиболее существен процесс радиолита воды.

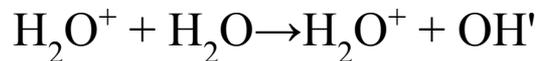


Продукты радиолита воды: тонкими стрелками показаны возможные реакции гидратированного электрона

При радиолизе воды молекула ионизируется заряженной частицей, теряя при этом электрон:



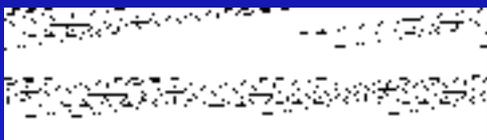
Ионизированная молекула воды реагирует с другой нейтральной молекулой воды, в результате чего образуется высоко реактивный радикал гидроксила OH'



«Вырванный» электрон очень быстро взаимодействует с окружающими молекулами воды; возникает сильно возбужденная молекула H_2O^* , которая, в свою очередь, диссоциирует с образованием двух радикалов: H' и OH'



Эти свободные радикалы отличаются чрезвычайно высокой реакционной способностью. Время их жизни в воде не более 10^{-5} с. За этот период они либо рекомбинируют друг с другом, либо реагируют с растворенным субстратом.



В присутствии кислорода образуются и другие продукты радиолиза, обладающие окислительными свойствами: гидропероксидный радикал пероксид водорода H_2O_2 и атомарный кислород

Кроме этих окислительных продуктов в процессе радиолиза воды возникает стабилизированная форма электрона — гидратированные электроны. Они также обладают высокой реакционной способностью, но уже в качестве восстановителя, а потому реагируют с продуктами радиолиза и другими легко восстанавливаемыми веществами, в частности с дисульфидными группами. Другим восстановителем, образующимся в процессе радиолиза воды, является атомарный водород.

Этапы воздействия ионизирующих излучений на биологические объекты.

Ионизация и возбуждение являются первичными процессами. Вторичными процессами могут быть увеличение скорости молекулярно-теплового движения частиц вещества, характеристическое рентгеновское излучение, радиолуминесценция, химические процессы

№ стадии	Явление	Длительность этапа
1.	Физико-химическая стадия (перенос энергии в виде ионизации и возбуждения на первичной траектории)	10 ⁻¹² –10 ⁻⁸ с
2.	Химические повреждения (свободные радикалы, возбуждённые молекулы- до теплового равновесия)	10 ⁻⁷ с – несколько часов
3.	Биомолекулярные повреждения (белки, нуклеиновые кислоты и др.)	Микросекунды – несколько часов
4.	Ранние биологические эффекты (гибель клеток, гибель животных)	Часы-недели
5.	Отдалённые биологические эффекты, в том числе возникновение опухолей, генетические эффекты	Годы-столетия

Прямое действие излучения – это непосредственное взаимодействие ионизирующего излучения с критическими молекулами, которые превращаются в свободные радикалы

Непрямым, или косвенным, называют радиационно-химические изменения структур, обусловленные действием продуктов радиоллиза воды или растворённых веществ

Прямое воздействие ионизирующего излучения на белки

Особенности того или иного белка определяются последовательностью и природой аминокислот в цепи (первичная структура) и сложной конфигурацией цепей аминокислот (вторичная и третичная структуры). Одни белки выполняют роль структурных компонентов клетки, другие (ферменты) – органических катализаторов клеточных биохимических реакций.

Радиобиологи исследуют как физико-химическое, так и биологическое действие ионизирующих излучений на ферменты. К физико-химическим критериям повреждения относятся:

- уменьшение молекулярной массы вследствие разрыва полипептидных цепей (цепей аминокислот),
- изменение растворимости,
- нарушение вторичной и третичной структур,
- образование сшивок и агрегатов (соединений друг с другом различных частей белков),
- разрушение аминокислот в цепи.

Биохимическим критерием повреждения является потеря ферментами способности осуществлять свои реакции. Для повреждения известных ферментов требуется облучение гораздо в более высоких дозах, чем для возникновения серьезных изменений в клетке, приводящих ее к гибели.

Стохастическая (вероятностная) теория. Эта гипотеза является развитием теории прямого действия излучений первичных радиобиологических процессов: взаимодействие излучений с определённым участком клетки происходит по принципу вероятности (случайности) и что зависимость дозы- эффекта обуславливается не только мишенью попадания, но и (в большой мере) состоянием биологического объекта как динамической системы.

Теории непрямого действия . Теория липидных радиотоксинов

Динамика и место нарушений обменных процессов в при действии радиации обусловлены нарушениями цитоплазматических структур в живой клетке. При воздействии ионизирующего излучения в тканях животных, особенно в печени, селезёнке и других органах образуются первичные (липидные) радиотоксины, которые представляют собой комплекс веществ метаболитов, обладающих токсическими свойствами (хиноны или ортохиноны). Некоторые из данных токсических метаболитов всегда содержатся в клетках здоровых тканей. При действии радиации содержание их значительно увеличивается и дополнительно появляются новые. Первичные радиотоксины образуют большое количество вторичных радиотоксинов, которые играют существенную роль в патогенезе и исходе лучевых поражений.

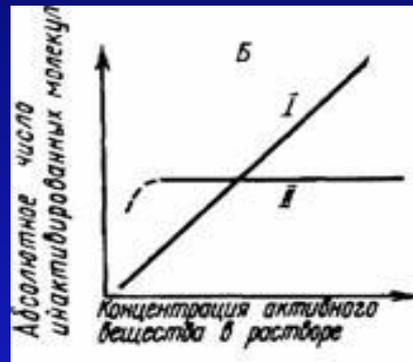
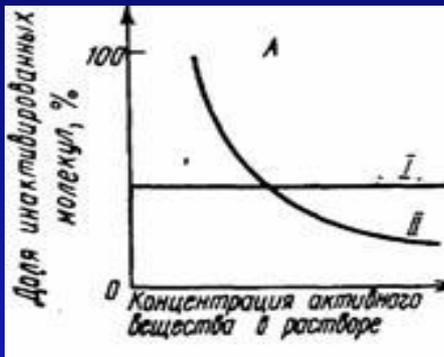
Для осуществления цепных реакций необходимы радикалы с большой энергией, достаточной для образования последующих радикалов. В организме животных в нормальных условиях низкий уровень окисления липидов обусловлен антиоксидантами. При лучевом поражении такое равновесие нарушается из-за появления большого количества радикалов. Автокаталитический режим цепных реакций возникает в случае, когда содержание естественных антиоксидантов снижается на 10–15%.

Существует мнение, что при облучении вначале поражаются липиды клеточных мембран, что приводит к нарушению химизма клетки, а затем образующиеся липидные радиотоксины, которые вызывают окисление других органических соединений живой ткани.

О различии прямого и косвенного действия радиации на биологические объекты и величину их влияния на развитие лучевого поражения можно судить по двум феноменам – эффекту разведения и кислородному эффекту

Для растворов ферментов установлено, что при прямом действии ионизирующего излучения число инактивированных молекул при заданной дозе увеличивается пропорционально концентрации раствора, а доля от общего числа молекул остается постоянной .

При косвенном действии независимо от разведения раствора абсолютное число поврежденных молекул остается постоянным, а доля их от общего числа изменяется обратно пропорционально их концентрации, так как в системе образуется постоянное для данной дозы количество способных прореагировать водных ради



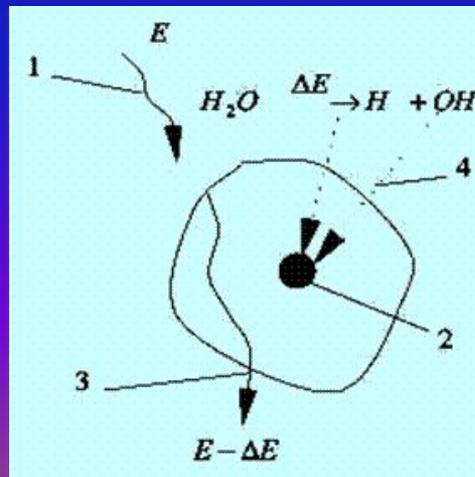
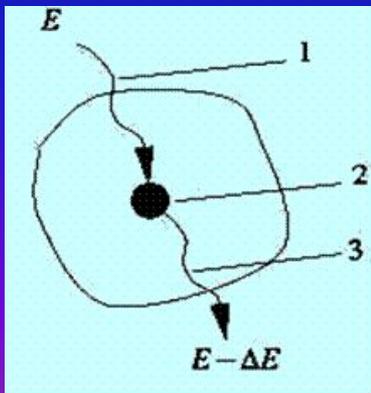
«Эффект разведения»

Зависимость степени инактивации фермента или вируса от концентрации его в растворе при прямом (I) и косвенном (II) действии излучения

Прямое (а) и косвенное (б) действие ионизирующей радиации.

- 1 – ионизирующее излучение E,
- 2 – критическая молекула,
- 3 – ионизирующее излучение ΔE ,
- 4 – диффузия свободных радикалов к критической молекуле.

Как правило, считают, что вклад косвенного действия более существен, так как клетки большинства тканей состоят приблизительно на 70–90% из воды



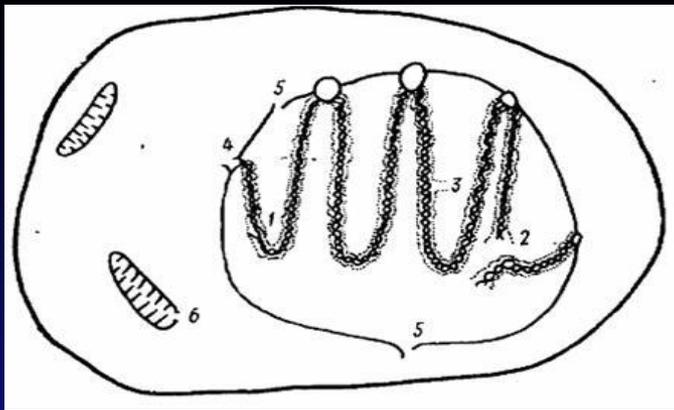
Сравнительная радиочувствительность биологических объектов и систем.

Облучение вызывает различные повреждения ДНК и ее комплексов. К их числу относят разрывы молекулы ДНК, образование щелочно-лабильных связей, потерю оснований и изменения их состава, изменения нуклеотидных последовательностей, сшивки ДНК—ДНК и ДНК—белок, нарушения комплексов ДНК с другими молекулами.

Помимо структурных нарушений ДНК в облученной клетке наблюдается нарушение регуляции, прежде всего выдачи в цитоплазму информации от ДНК, а также нарушение функционирования многочисленных внутриклеточных мембран. В этом проявляется роль внеядерных органелл, а также сложных взаимоопределяющих влияний ядра и цитоплазмы

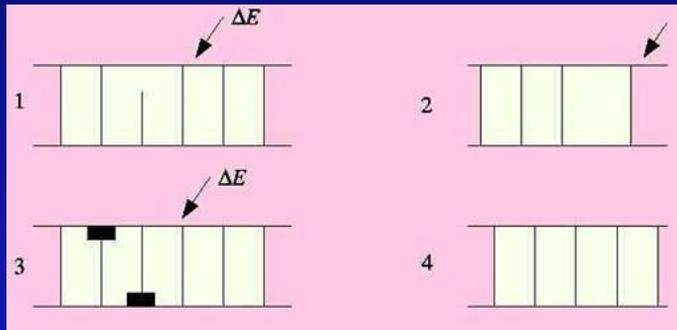
Кроме образования разрывов в облученной ДНК нарушается структура оснований, прежде всего тимина, что увеличивает число генных мутаций. Отмечается образование сшивок между ДНК и белком нуклеопротеинового комплекса.

Важным последствием облучения является изменение эпигеномной (не связанной с ядерным материалом) наследственности клетки, носителем которой служат различные цитоплазматические органеллы. При этом снижается функциональная активность потомков облученных клеток, в чем может состоять одна из причин отдаленных последствий облучения. Однако главной причиной репродуктивной формы гибели клеток при облучении является повреждение ее генетического аппарата. Прямые доказательства большей радиочувствительности ядра по сравнению с цитоплазмой были получены в опытах с прицельным облучением ядра на объектах, в клетках которых оно строго фиксировано. Оказалось, например, что попадание уже одной α -частицы в ядро оплодотворенного яйца насекомого (наездника) вызывает гибель зародыша, которая в случае облучения цитоплазмы яйца регистрируется лишь после прохождения 15 млн. α -частиц



Основные виды структурных радиационных повреждений:

1 - однонитчатые (одиночные) разрывы в молекуле ДНК, 2 - двунитчатые (двойные) разрывы ДНК, 3 - нарушение связи ДНК с белком, 4 - повреждение структуры ДНК мембранного комплекса, 5 - разрушение ядерной мембраны, 6 - повреждение митохондриальной мембраны



Основные типы повреждений в молекуле ДНК:

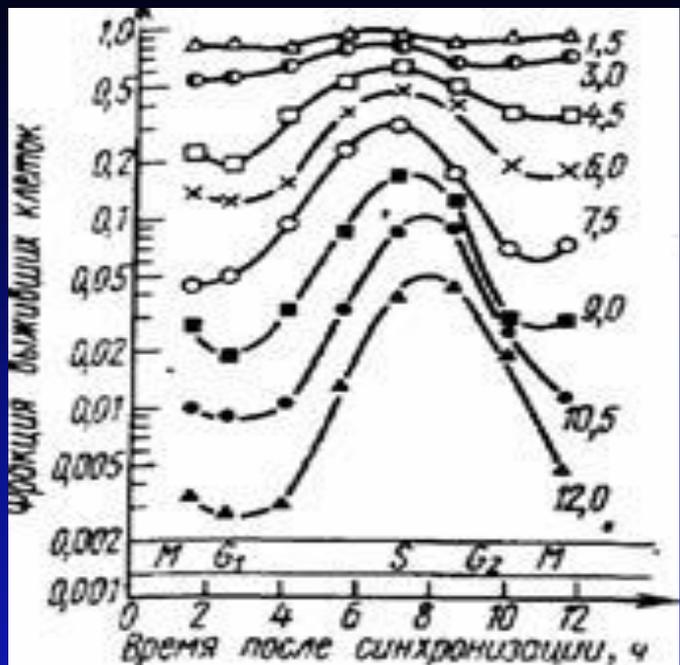
1 – одиночные разрывы,
2 – двойные разрывы,
3 – повреждения оснований,
4 – исходная нормальная ДНК.

Радиочувствительность — чувствительность биологических объектов к повреждающему воздействию ионизирующего излучения. Сопоставление радиочувствительности разных объектов производят посредством измерения поглощенных доз излучения, вызывающих у них одинаковый эффект, выявляемый по одному и тому же критерию

Правило Бергонье-Трибондо:

- 1) Клетки тем более радиочувствительны, чем больше у них способность к размножению.
- 2) Клетки тем более радиочувствительны, чем менее определено выражена их морфология и функции.

Радиочувствительность клеток зависит от стадий цикла

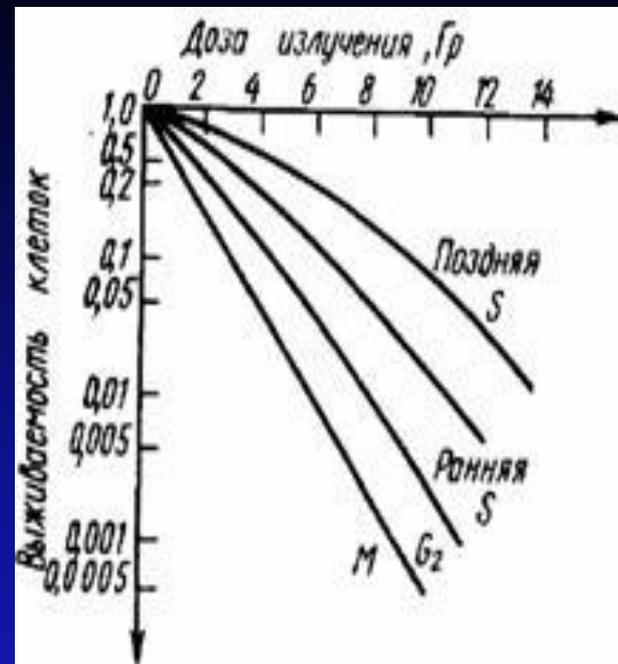


Параметры кривых выживания клеток китайского хомячка при облучении на разных стадиях цикла

Стадии цикла	n	D_0 , Гр
M	1	1,3
G_2	>1	1,3
G_1	2	1,6
S (ранняя)	2—3	1,9
S (поздняя)	10	2.0

Радиочувствительность отдельных стадий цикла клеток китайского хомячка линии V-79 при разных дозах облучения (обозначены цифрами у кривых, Гр)

(по У. Синклеру, 1970)



Кривые выживаемости клеток китайского хомячка линии V-79 при облучении на разных стадиях цикла

Фазы клеточного цикла млекопитающих:

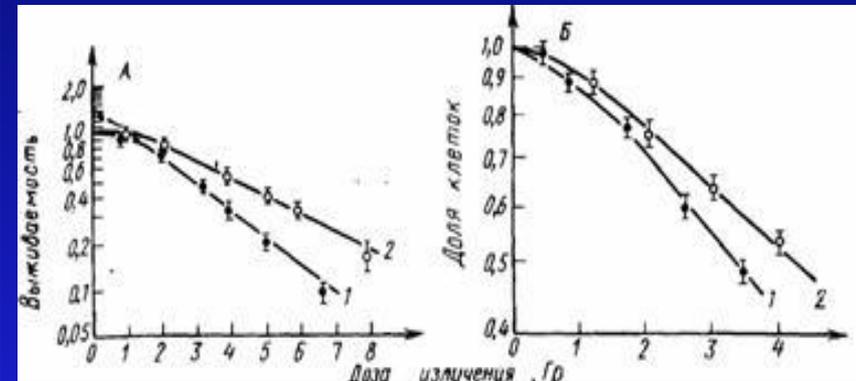
G_1 – предсинтетическая фаза; S – синтез ДНК; G_2 – постсинтетическая фаза, M – митоз

Аберрации хромосом как критерий радиочувствительности клеток

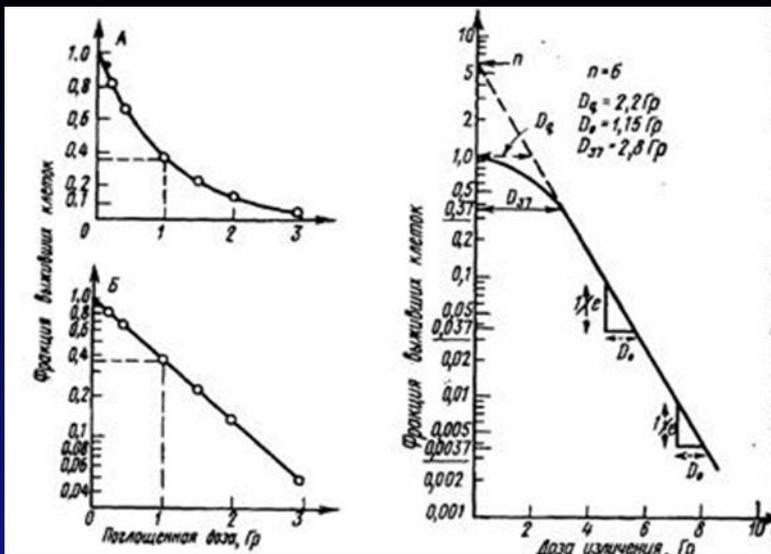
Вариант опыта, стадия клеточного цикла в момент облучения	Поглощенная доза облучения Гр	Выживаемость клеток. %	Нормальные метафазы без аберраций. %
G_1	2,1	30,2	26,6
G_2 , 48-часовая сенсбилизация бромдезоксисуридином	0.7	32,4	24,0
G_1 , защита клеток цистеамином	4,7	29,8	26,0
S , поздняя	3,1	30,3	20,5
S , поздняя защита цистеамином	6,4	31,3	24,0

Корреляция между аберрациями хромосом и выживаемостью клеток китайского хомячка при разных условиях облучения

Отсутствие полного соответствия между выживаемостью клеток и возникновением аберраций (во многих работах отмечено 20 — 30%-ное расхождение между уровнем погибших и аберрантных клеток) не умаляет роли аберраций хромосом в качестве пригодного количественного критерия клеточной радиочувствительности



Выживаемость (А) и доля клеток без аберраций хромосом (Б) при облучении культуры клеток китайского хомячка: 1 — γ -излучение ^{137}Cs (альфа-частицы), 2 — протоны 200 МэВ



Кривые выживания клеток (кривые доза— эффект) при действии плотно ионизирующего излучения.

А — линейные координаты;

Б — полулогарифмические координаты.

В системе полулогарифмических координат (дозу облучения откладывают по шкале абсцисс в линейном масштабе, а выживаемость на оси ординат в логарифмическом) кривая состоит из так называемого плеча и линейного участка, начинающегося обычно после доз 3—5 Гр.

Кривые выживания самых различных клеток при действии рентгеновского, гамма- или любого другого редко ионизирующего излучения имеют такую же форму. При облучении клеток плотно ионизирующими частицами кривые их выживания не имеют плеча и в полулогарифмических координатах прямолинейны на всем своем протяжении

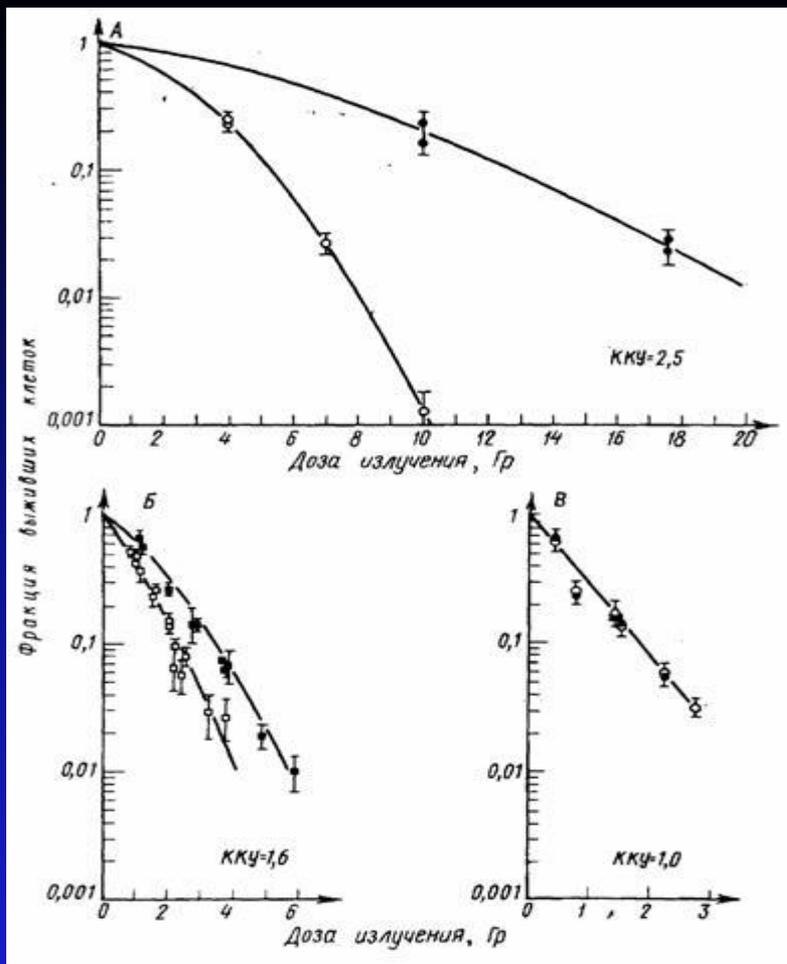
Такая зависимость хорошо описывается уравнением вида

$$N/N_0 = e^{-D/D_0}$$

где N — число выживших клеток из общего их числа, D — любая доза облучения, D_0 — доза, при которой доля живых клеток уменьшается в сравнении с исходной в e раз

$$N/N_0 = e^{-1} = 1/2,71 = 0,367$$

Величина D_0 служит мерой радиочувствительности клеток и определяется по кривой выживания как доза, при которой выживает $\sim 37\%$ клеток от исходного количества. Иногда поэтому ее называют D_{37} , что в случае экспоненциальных кривых одно и то же, но для кривых, имеющих плечо, величины D_0 и D_{37} различны



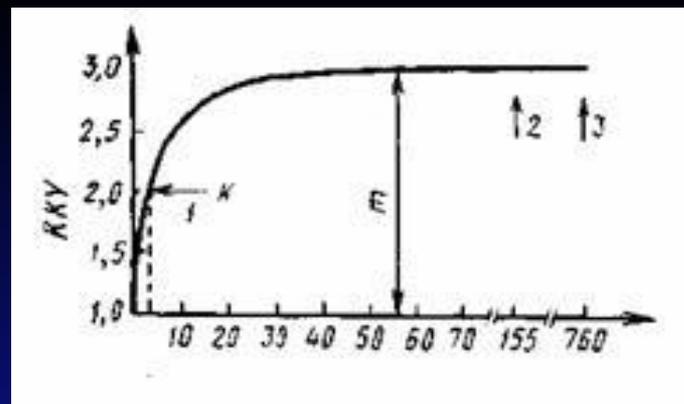
Зависимость кислородного эффекта от вида ионизирующих излучений.

A — рентгеновское излучение;

B — нейтроны с энергией 15 МэВ;

B — α -излучение

(по Дж Барендсену и др., 1966. 1967)



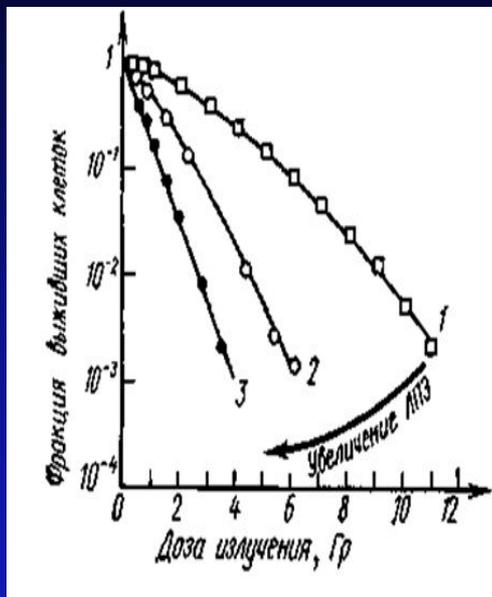
Зависимость радиочувствительности клеток от содержания кислорода (% от атмосферного) и его парциального давления при 37° С: 1 - 3 мм рт. ст. или 1—2% O₂, 2 - воздух, 3 - 100% O₂

Связь между концентрацией кислорода во время облучения и радиочувствительностью, аналитически выражается уравнением, предложенным Т. Альпер и П. Говард-Фландерсом

$$D = D_0 \left[\frac{1 + m \cdot \frac{[O]}{K}}{1 + m} \right]^2$$

где $1/D_0[O]$ и $1/D_0[A]$ - величины, характеризующие радиочувствительность, при изучаемой концентрации кислорода (O) или аноксии (A), m - максимальная величина KKY, K - константа, равная концентрации кислорода, при которой радиочувствительность является промежуточной между максимальной и минимальной.

Выживаемость клеток во многих случаях может быть описана с помощью линейно-кватратичной модели Чедвика и Линхаутса, основанной на том, что при облучении клеток летальными являются двойные разрывы ДНК:

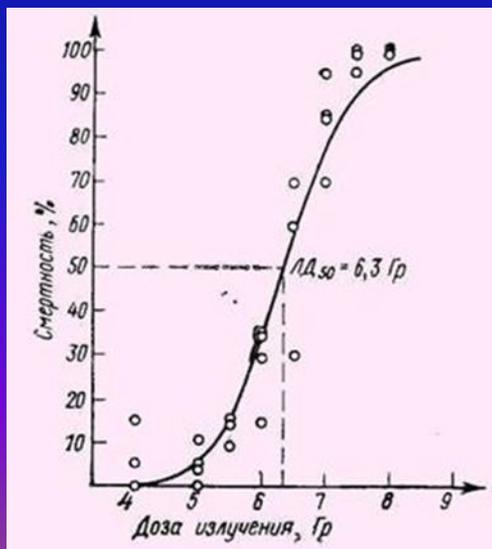


где D - поглощенная доза, а α и β — параметры, характеризующие вероятность индукции и репарации разрывов ДНК в облученных клетках.

Кривые выживания культуры клеток человека, подвергнутых облучению (по Дж. Барендсену 1968): :

- 1-рентгеновским излучением 250 кэВ, ЛПЭ 1.3 кэВ/мкм ;
- 2-нейтронами 15 МэВ,
- 3- α -частицами, ЛПЭ 100 кэВ/мкм

Полулетальная доза — вызывает гибель половины облучённых организмов данного вида в течение определённого срока. Обозначается: ЛД50



Минимальная абсолютно летальная доза - это наименьшее количество радиации, вызывающее гибель всех облучённых животных в течение 30 суток при однократном облучении— ЛД100

Критерием «качества» излучения, эффективности его биологического действия служит величина дифференциальной потери энергии частиц на единицу длины пути которая получила название «линейная передача энергии» (ЛПЭ). В математических выражениях ЛПЭ обозначается символом L .

Средняя летальная доза в рентгенах

Организм	Доза	Организм	Доза
Обезьяны	550–600	Карась	1800
Собака	400	Змеи	3000–20000
Кролик	800	Насекомые	От 1000 до 100000
Крыса	600	Дрожжи	30000
Мышь	550	Инфузории	300000–330000
Куры	600–1000	Высшие растения	1000–150000

Значения ЛД100 рентгеновских и гамма- лучей

Мышь	7,0–9,0	Кошка	5,5–6,5
Крыса	6,5–9,5	Собака	3,5–6,0
Кролик	12,0	Человек	4,5–6,0

Степень радиочувствительности сильно варьирует и в пределах одного вида – *индивидуальная радиочувствительность*, а для определенного индивидуума зависит также от возраста и пола. Кроме того, даже в одном организме различные клетки и ткани значительно различаются по радиочувствительности, и наряду с чувствительными имеются устойчивые ткани, которые принято называть *радиорезистентными*.

Доза (Гр)	Эффект
Менее 0,0001	Угнетение жизнедеятельности
0,001–0,002	Оптимум жизнедеятельности
0,002–0,005	Стимуляция жизнедеятельности
0,05–0,1	Регистрация мутаций
0,1–0,5	Временная мужская стерильность
0,5–1,0	Нарушения кроветворения, первичные нарушения иммунитета, удвоение мутаций
1–2	Иммунодефицитное состояние (пострадиационный канцерогенез и т. д.)
2–4	Средняя тяжесть лучевой болезни
4–6	Костномозговая форма лучевой болезни
6–10	Кишечная форма лучевой болезни
10–100	Церебральная форма лучевой болезни
» 2000	Смерть

Радиочувствительность органов и тканей



Органы по функционально-биохимическим признакам, определяющим сорбционный показатель тканей, можно распределить по радиочувствительности по убывающей последовательности: большие полушария, мозжечок, гипофиз, надпочечники, тимус, лимфатические узлы, спинной мозг, ЖКТ, печень, селезенка, легкие, почки, сердце, кожа и костная ткань

Гонады (половые железы). Вследствие крайне высокой радиочувствительности половых клеток на ранних стадиях развития уже при дозах 0,05- 0,1 Гр у большинства животных и человека происходит массовая гибель клеток, а после 2–4 Гр – стерильность. Зрелые клетки – сперматозоиды, напротив, крайне резистентны.

Сердце. При исследовании сердца обнаружены непосредственные и отдаленные изменения в миокарде после локального облучения дозами 5–10 Гр.

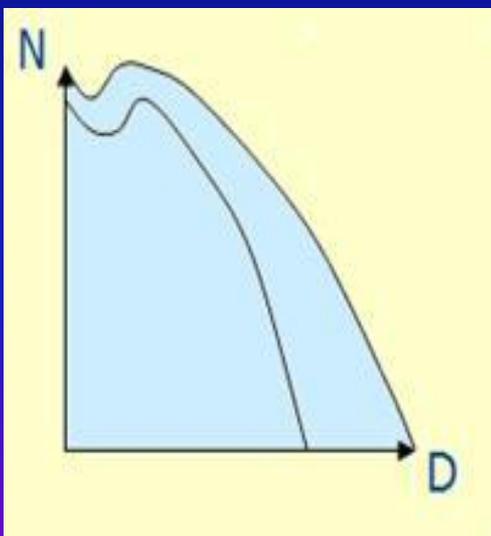
Кожные покровы. Кожа и её производные – весьма активно обновляющиеся системы и поэтому в целом кожа более радиочувствительна. Наряду с высокой чувствительностью эпидермальные клетки хорошо восстанавливают сублетальные повреждения. Максимально переносимая доза жёсткого рентгеновского излучения составляет при однократном внешнем воздействии около 10Гр.

Легкие. Пороговые дозы, вызывающие острую легочную гибель, – около 25 Гр рентгеновского или гамма-излучения, а после облучения легких дозой 50 Гр гибель составляет 100%.

Мышцы. Мышечная ткань - наиболее радиорезистентная ткань, морфологические изменения её возникают при местном облучении несколькими сотнями Гр. Слабая мышечная атрофия была обнаружена только при дозах порядка 60 Гр.

Действие малых доз облучения ионизирующей радиацией.

Несмотря на высокую радиочувствительность млекопитающих, существует такая область малых доз, несколько повышающих естественный фон, которая стимулирующее воздействует на организм: ускоряет развитие, повышает устойчивость к неблагоприятным факторам, увеличивает численность потомства. Воздействие радиации в дозах 5–25 рад увеличивает устойчивость животных к заражению вирусами и бактериями, к действию бактериальных токсинов, повышает в крови уровень защитных факторов. Т.е. наблюдается стимуляция механизмов иммунитета. Влияние малых доз на продолжительность жизни менее однозначно. При действии малых доз радиации возникают соматико-стохастические эффекты (случайные, вероятностные). Основным свойством стохастических соматических эффектов является длительный латентный период. Для лейкозий он составляет 10 лет, для других форм опухолей – 15–30 лет



Кривые выживаемости в области малых доз излучения

Критерий действия	Большие дозы	Малые дозы
Средняя продолжительность жизни	Сокращают	Увеличивают
Скорость деления клеток	Угнетают	Стимулируют
Рост, развитие организма	Замедляют вплоть до полного торможения	Усиливают
Сопротивление неблагоприятным факторам внешней среды.	Угнетают	Повышают
Плодовитость	Понижают	Увеличивают

Механизм стимулирующего действия малых доз радиации

Радиация стимулирует только те жизненные процессы, которые поддаются регулированию, изменяются ступенчато в процессе жизнедеятельности: скорость деления клеток, синтез ДНК, РНК и белков, интенсивность дыхания и т. д. В качестве стимуляторов могут выступать совсем небольшие дозы радиотоксинов- биологически активных веществ, которые образуются под влиянием излучения в результате окисления фенолов (хиноидные радиотоксины), и ненасыщенные жирных кислот (липидные радиотоксины).

В то же время другая группа жизненных процессов протекает в клетке при облучении по принципу «всё или ничего». Например, возникновение мутаций, хромосомных aberrаций, гибель клеток и др. С увеличением дозы увеличивается не сам процесс, а количество клеток в нём участвующих. Все эти процессы вызваны прямым или косвенным повреждением клеточных структур, прежде всего их генетического аппарата. Радиационная стимуляция работы его никогда не наблюдалась.

В ходе эволюции были выработаны механизмы устранения повреждений структуры ДНК, возникающих под влиянием мутагенных факторов. Набор параллельно действующих внутриклеточных систем репарации, взаимно повышающих надёжность функционирования наследственного аппарата, обеспечивает полное устранение возникающих повреждений вплоть до некоего порога, выше которого интенсивность повреждающего агента превышает резервную мощность защитных систем. Это и есть тот реальный порог на уровне 0,25–0,5 Гр.

Воздействие радиации может привести к образованию опухоли при условии сочетания двух явлений: невозстановленного повреждения ДНК и подавления иммунной системы. И если для возникновения трансформированной клетки достаточно минимальной дозы в 0,1 Гр, то иммунодепрессия возникает при более высокой дозах, не ниже 1 Гр.

Действие хронического облучения ионизирующей радиацией.

Радиочувствительность определяется, как правило, по отношению к острому облучению, притом однократному. Поэтому системы, состоящие из быстро обновляющихся клеток, более радиочувствительны.

Если облучение является хроническим то быстро обновляющиеся клетки не будут сильно реагировать на этот фон, а для мало делящихся или совсем не делящихся клеток доза, которую они набирают в течение длительного времени, будет соответствовать той же дозе при остром облучении. Получается наоборот, что в этом случае более уязвимы те органы и ткани, которые считаются менее радиочувствительными

Эффективность восстановления (ЭВ) от сублетальных повреждений оценивают фактором восстановления, который характеризует отношение выживаемости клеток при фракционированном облучении к выживаемости при однократном облучении или по разности доз двукратного и однократного облучения, требуемых для достижения одинакового эффекта. Фактор восстановления определяется интенсивностью восстановления и скоростью перехода клеток в более чувствительные фазы цикла, причем эти процессы противоположно влияют на радиочувствительность клеток в момент второго облучения. Повторное облучение может послужить толчком для проявления нерепарированных и «незаконно» репарированных повреждений, помимо того, что оно вызовет новые повреждения.

Экспериментально установлено, что при дозах, вызывающих гибель 50% клеток, потомки большинства выживших клеток оказываются измененными в наследственном отношении «радио-расы». Облучение на протяжении сотен клеточных генераций вызывает неустойчивое состояние ядерного аппарата, вследствие чего в клонах этих клеток при размножении все время происходит выщепление как нежизнеспособных, отмирающих, элементов, так и клеток с различными наследуемыми нарушениями морфологических и физиологических функций.

Теория восстановления организма впервые была выдвинута Г.А. Блэром (1955), а затем развита Г.О. Дэвидсоном. В качестве меры чувствительности организма к моменту повторного облучения принимают величину ЛД50/30, сравнивая ее с дозой вызывающей тот же эффект при однократном облучении.

Согласно классической теории Блэра, пострадиационное восстановление протекает с постоянной скоростью (пропорциональной величине поражения) по экспоненциальному закону. Это относится, однако, не ко всей величине начального поражения, а к определенной его части, так как другая часть существует в виде необратимой доли (пропорционально величине общей накопленной дозы). Тогда в соответствии с теорией «чистое» поражение (эффективную дозу) можно выразить следующей формулой:



где f – необратимая часть поражения; $(1 - f)$ – доля обратимого лучевого повреждения; b – скорость восстановления в сутки, %; T – число суток; e – основание натуральных логарифмов.

Если повторное облучение и определение ЛД50/100 производить через разные промежутки времени, то по разнице между величинами ЛД50/100 однократного и повторного облучений можно определить изменение во времени величины остаточного радиационного поражения (его необратимую компоненту), темп восстановления радиорезистентности организма и период полувосстановления (время, необходимое для восстановления организма от лучевого поражения на 50%).

Период полувосстановления ($T_{1/2}$) практически является константой, как правило, увеличивающейся с продолжительностью жизни животного. По данным разных авторов, он равен (в сутках) для мыши 2–8; для крысы 6–9, для собаки 14–18, для осла 20–28. У человека $T_{1/2}$, согласно расчетам, составляет 25–45 суток; в среднем его принимают за 28 суток при скорости восстановления – 0,1 %.

В последующем была подтверждена справедливость концепции Блэра–Дэвидсона в ее общем виде, в то же время сравнительно рано начали накапливаться факты, противоречащие ей и имеющие большое научное значение, важное для клинической радиобиологии.

Прежде всего, стало известно, что для процесса пострadiационного поражения организма характерна фазовая периодичность, сопровождающаяся переменой знака радиочувствительности. Вначале были получены данные о возможности уменьшения чувствительности мышц к повторному облучению, индуцируемому предварительным не летальным облучением. В опытах И.Г. Акоева на мышах, подвергнутых повторному облучению, установлено, что наибольший темп восстановления наблюдается после первоначального воздействия в дозе 4 Гр. В последующем аналогичные результаты наблюдались на крысах, собаках и овцах.

Фазовое изменение радиочувствительности для изолированных клеток наблюдается не только в относительно отдаленные сроки, но и в первые часы после облучения. Вначале (первые 5–8 ч) происходит повышение радиорезистентности, затем (через 9–12 ч) – кратковременное ее снижение, после чего она снова монотонно повышается. Начальный период повышения радиорезистентности клеток связывают с восстановлением их от сублетальных повреждений, фазу повышения радиочувствительности – с частичной синхронизацией пула на наиболее радиочувствительной стадии клеточного цикла, а последующее монотонное снижение чувствительности объясняют следствием начавшейся клеточной регенерации.

Изменение радиочувствительности организма наблюдается и при более высоких дозах, вызывающих «кишечную» гибель. При рентгеновском двукратном облучении мышей в суммарной дозе 12 Гр также наблюдается фазное изменение радиорезистентности организма, тестируемое по интенсивности «кишечной» гибели – числу мышей, погибших к четвертому дню. В этом случае существование истинного восстановления подтверждается отсутствием различий между эффектами однократного и повторного облучения нейтронами, вызывающими труднорепарируемые или вовсе нерепарируемые повреждения клеток.

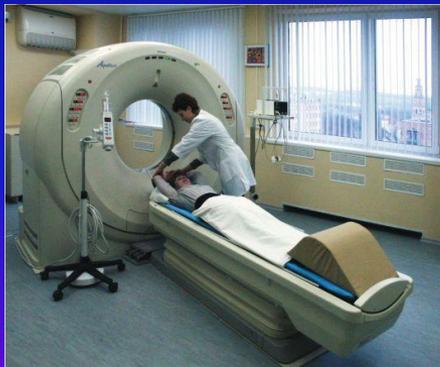
Электромагнитные излучения как инструмент исследований, диагностики и лечения заболеваний.

Рентген



Рентгенография - исследование, при котором получают рентгеновское изображение объекта, фиксированное на пленке (прямая рентгенография) или на специальных цифровых устройствах (цифровая рентгенография).

Рентгеноскопия - исследование, при котором рентгеновское изображение проецируется на флюоресцирующий экран (или систему цифровых детекторов). Метод позволяет проводить статическое, а также динамическое, функциональное изучение органов (например, рентгеноскопия желудка, экскурсия диафрагмы) и контролировать проведение интервенционных процедур (например, ангиографии, стентирования).



Магнитно-резонансный томограф

Компьютерная томография - метод рентгеновского исследования, основанный на получении послойных изображений в поперечной плоскости и их компьютерной реконструкции. Магнитно-резонансная томография (МРТ) - метод лучевой диагностики, основанный на получении послойных и объемных изображений органов и тканей любой ориентации с помощью явления ядерного магнитного резонанса (ЯМР). ЯМР - это свойство некоторых атомных ядер, помещенных в магнитном поле, поглощать внешнюю энергию в радиочастотном (РЧ) диапазоне и излучать ее после прекращения воздействия радиочастотного импульса. Напряженность постоянного магнитного поля и частота радиочастотного импульса строго соответствуют друг другу.

Система ПЭТ-КТ



Радионуклидная диагностика или ядерная медицина - метод лучевой диагностики, основанный на регистрации излучения от введенных в организм искусственных радиоактивных веществ. Основными достоинствами радионуклидного метода являются высокая чувствительность к различным видам патологических процессов, возможность оценки метаболизма и жизнеспособности тканей. Одной из новых томографических радиоизотопных методик в ядерной медицине является позитронная эмиссионная томография (ПЭТ). ПЭТ является единственной (кроме МР-спектроскопии) методикой для оценки метаболических и биохимических процессов *in vivo*

Ангиографическая установка



Ангиография - метод рентгеновского исследования, связанный с прямым введением контрастного вещества в сосуды с целью их изучения. Вариантом ангиографии является коронароангиография (КАГ) - методика исследования коронарных сосудов и камер сердца. При ангиографии все чаще выполняются малоинвазивные хирургические процедуры (реканализация сосудистого русла, баллонная ангиопластика, стентирование). Таким образом, развитие ангиографии привело к рождению интервенционной радиологии

Спасибо за внимание!
Удачи на сессии!