

**Одесский национальный медицинский
университет**

Кафедра онкологии с курсом лучевой диагностики,
лучевой терапии и радиационной медицины

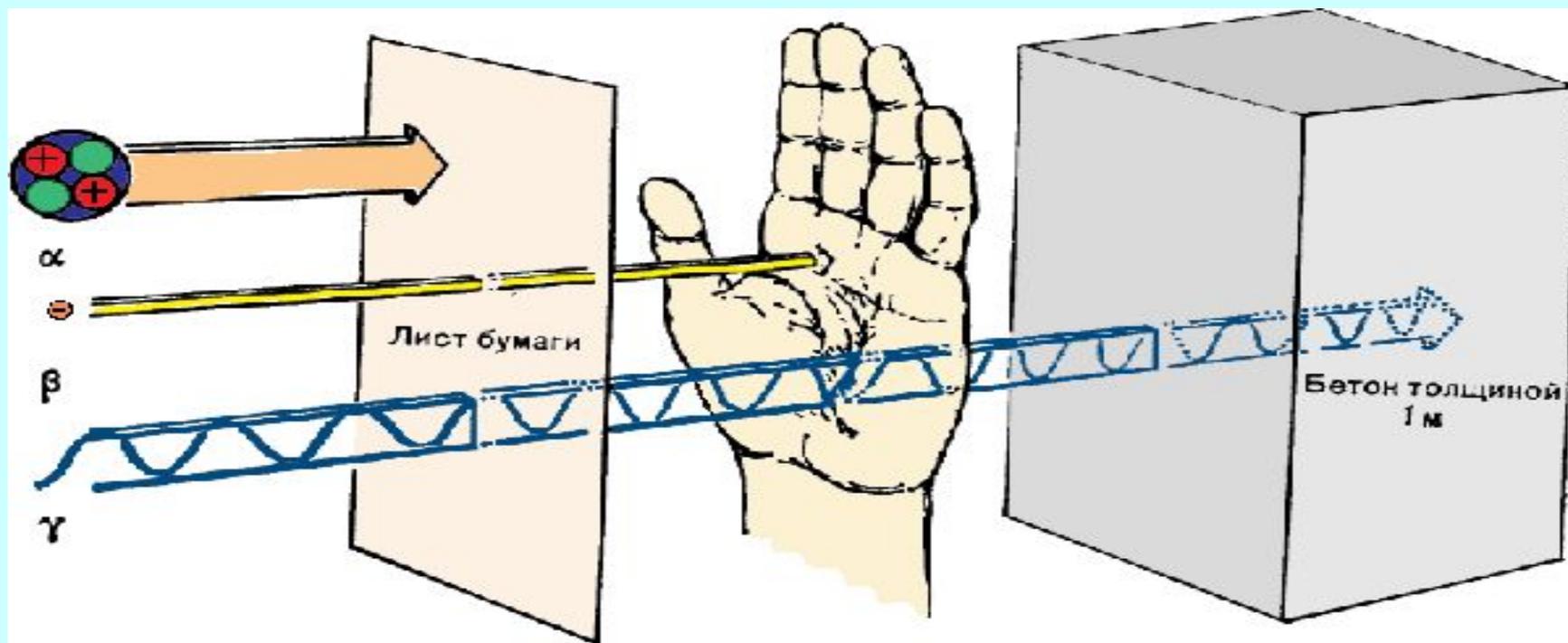
**«Физические основы действия
ионизирующего излучения»**

Анищенко Л. В.

РАДИАЦИЯ

Часть 1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Часть 2 БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ



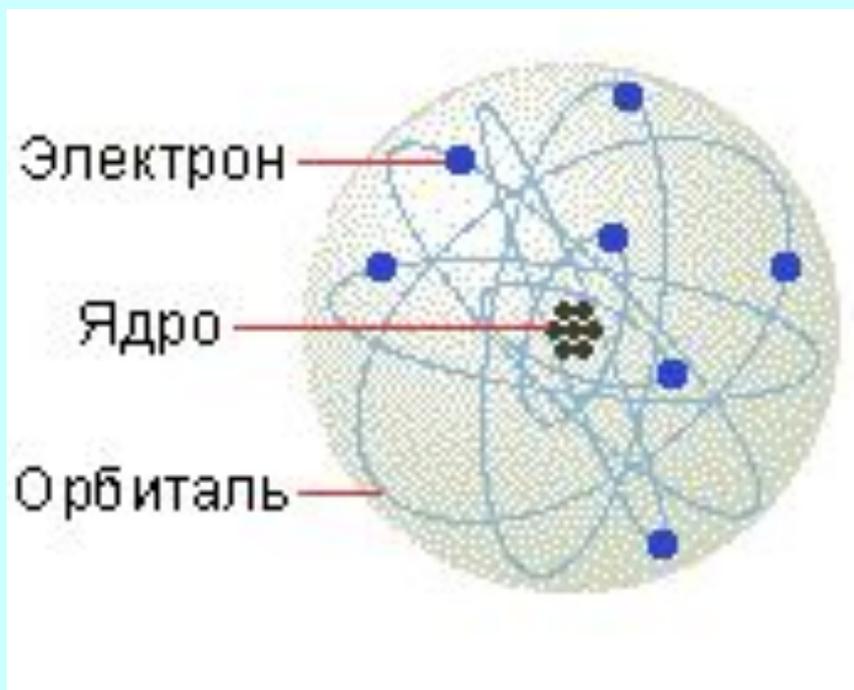
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Часть 1

Радиация

- **Радиация** — это все виды электромагнитного излучения: свет, радиоволны, энергия солнца и множество иных излучений вокруг нас. Источниками проникающей радиации, создающими природный фон облучения, являются галактическое и солнечное излучение, наличие радиоактивных элементов в почве, воздухе и материалах, используемых в хозяйственной деятельности, а также изотопов, главным образом, калия в тканях живого организма.
- **Интерес представляет не любая радиация, а ионизирующая**, которая, проходя сквозь ткани и клетки живых организмов, способна передавать им свою энергию, разрывая химические связи внутри молекул и вызывая серьезные изменения в их структуре.
- **Существует основной радиобиологический парадокс** (по определению Тимофеева-Ресовского), состоящий в большом несоответствии между ничтожной величиной поглощенной энергии и крайней степенью выраженности реакций биологического объекта (вплоть до летального исхода). Причина того, почему ничтожное количество поглощенной в организме энергии приводит к катастрофе, составляет загадку радиобиологического парадокса.
- **Ионизирующее излучение возникает** при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных частиц в веществе и образует при взаимодействии со средой ионы разных знаков.

Планетарная модель строения атома



- **Электроны на внутренних оболочках** связаны с ядром наиболее прочно, на внешней (валентной) оболочке прочность связи наименьшая
- **Один электрон несет единичный (элементарный) электрический заряд**, а общий отрицательный заряд электронной оболочки атома равен числу электронов.
- **Атомы электронейтральны**, поэтому ядро в целом должно численно иметь тот же заряд, но со знаком (+).
- **Носителями заряда в ядре являются протоны**, число протонов в ядре должно быть равно числу электронов на оболочках атома.
- Кроме того, в ядре содержатся нейтроны — частицы примерно той же массы, что и протоны, но не имеющие заряда.

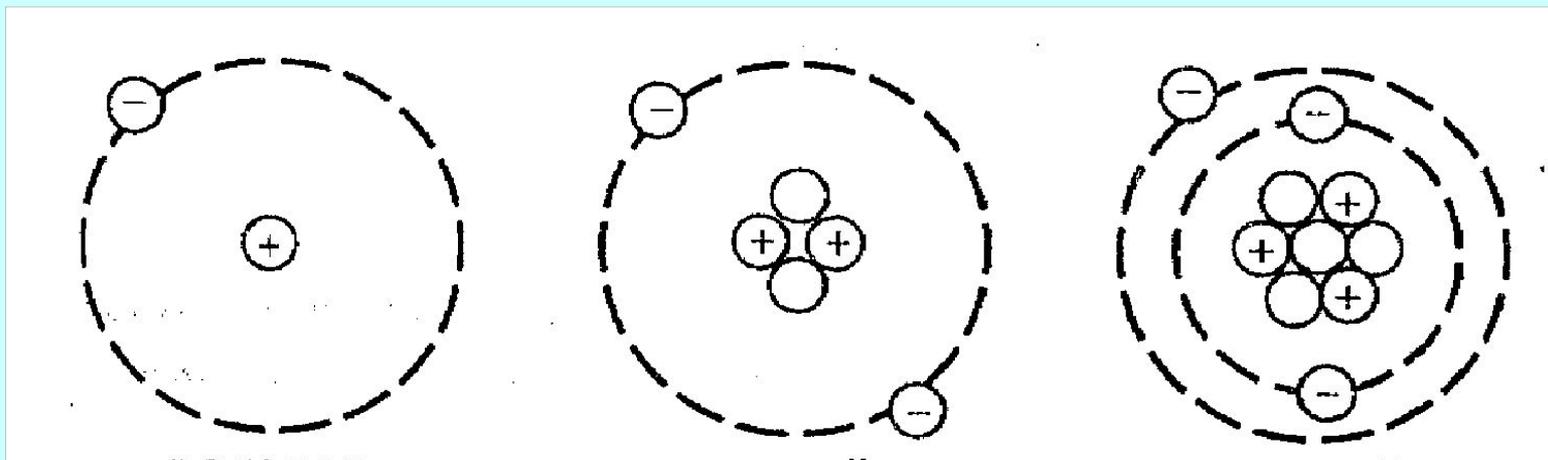
Схема строения атома

В зависимости от энергии, которая удерживает электроны при вращении вокруг ядра, они группируются на той или иной электронной орбите. Электронную орбиту называют еще уровнем или слоем. Число слоев у разных атомов неодинаково. В атомах с большой массой число орбит достигает семи. Их обозначают или цифрами, или буквами латинского алфавита: K,L,M,N,O,P,Q; K – ближайший к ядру слой. Число электронов в каждом слое строго определенное: K-слой имеет не более двух электронов, L-слой – до 8; M-слой – 18 электронов; N-слой – 32 электрона и т.д.

Соответственно числу электронных слоев в Периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева все элементы размещаются в семи периодах.

Число протонов в ядре строго постоянно для атомов каждого данного элемента и соответствует порядковому номеру в Периодической таблице Д.И.Менделеева. Число протонов в ядре определяет,

к какому химическому элементу относится данный атом.



Водород₁H¹

Гелий₂He⁴

Литий₃Li⁷

Элементарные частицы ядра

В каждом атоме число электронов в точности равно числу протонов в ядре; каждый электрон несет отрицательный заряд, равный по абсолютной величине заряду протона, так что в целом атом нейтрален. Присутствие в ядре того или иного числа нейтронов отражается на общей массе атома, но не на его химических свойствах. Сумма числа протонов и нейтронов в ядре атома данного элемента называется его массовым числом, оно близко к значению атомного веса (атомной массы) элемента.

Таким образом, атом содержит всего три вида элементарных частиц, их заряд и

масса приведены в таблице

Название частицы	Обозначение	Масса покоя, а. е.	Заряд
Электрон	\bar{e}	0,000548 8 ⁴ м. е. 1/1840	-1
Нуклоны			
Протон	p	1	+1
Нейтрон	n	1	0

Элементарные частицы ядра (продолжение)

- Масса электрона в 1840 раз меньше массы протона или нейтрона.
- Суммарная масса атома почти целиком (на 99,97 - 99,98%) сосредоточена в ядре, тогда как на все орбитальные электроны приходится чуть больше 0,02% общей массы атома.
- Ядро в атоме занимает чрезвычайно малый объем. Линейные размеры атома имеют порядок 10^{-10} м, а ядра – 10^{-15} м, т. е. в сотни тысяч раз меньше.
- Соответственно плотность материи в ядре – 10^{17} кг/м³ (10^5 т/мм³).
- Всё остальное пространство в атоме (кроме ядра и электронов) представляет собой пустоту. Это важно иметь в виду при рассмотрении вопросов взаимодействия и поглощения излучений в веществе, т.е. для оценки вероятности столкновения (и электрического взаимодействия) при пролете частиц через атомы среды.
- *Атомы, имеющие определенный состав и структуру ядра, называются нуклидами. Индивидуальность нуклида определяется зарядом ядра (числом протонов).*
- *Атомы, имеющие ядра с одинаковым числом протонов, но различающиеся по числу нейтронов, относящиеся к разновидностям одного и того же химического элемента, называются изотопами данного элемента. Такие элементы имеют одинаковый номер в таблице Менделеева, но разное массовое число.*

Элементарные частицы ядра (продолжение)

- Чтобы отличить изотопы друг от друга, к символу элемента приписывают число, равное сумме всех частиц в ядре данного изотопа. Так уран-238 (^{238}U) содержит 92 протона и 146 нейтронов, в уране-235 (^{235}U) тоже 92 протона, но 143 нейтрона.
- Каждый отдельный химический элемент может существовать в виде относительно устойчивых ядерных структур – стабильных изотопов, и неустойчивых – радиоактивных изотопов.
- Стабильность ядра определяется соотношением числа протонов и нейтронов: у большей части стабильных изотопов легких элементов оно составляет 1:1 или близко к этой величине.
- К концу периодической таблицы это соотношение постепенно уменьшается и достигает 1:1,6 (уран), при этом стабильность ядер резко снижается.
- При недостатке или избытке нейтронов (относительно некоего оптимального для данного элемента соотношения) ядерные структуры оказываются неустойчивыми, что приводит к возникновению радиоактивного распада. Это характерно для радиоактивных элементов, расположенных в конце таблицы Менделеева, образующих радиоактивные семейства (например, семейство ^{238}U , ^{232}Th и др.).
- Радиоактивный распад происходит самопроизвольно: это внутриядерный процесс, на который обычные физические или химические факторы воздействовать не могут, т.е. не могут задержать или ускорить ход радиоактивных превращений.
- Атомы отличающиеся друг от друга не только массовым числом, но и химическими свойствами, называются нуклидами, а в том случае, если они ~~обладают свойствами радиоактивности – радионуклидами.~~

РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД УРАНА-238

- Большинство нуклидов нестабильны, они все время превращаются в другие нуклиды.
- В качестве примера взят атом урана-238 (92 протона и 146 нейтронов), в ядре которого протоны и нейтроны едва удерживаются вместе силами сцепления.
- Время от времени из него вырывается компактная группа из четырех частиц: двух протонов и двух нейтронов (α -частица). Уран-238 превращается, таким образом, в торий-234, в ядре которого содержится 90 протонов и 144 нейтрона. Но торий-234 также нестабилен. Его превращение происходит, однако, не так, как в предыдущем случае: один из его нейтронов превращается в протон, и торий-234 превращается в протактиний-234, в ядре которого содержатся 91 протон и 143 нейтрона. Эта метаморфоза, произошедшая в ядре, сказывается и на движущихся по своим орбитам электронах: один из них становится неспаренным и вылетает из атома.

РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД ЯДЕР

Вид излучения	Нуклид	Период полураспада
альфа	Уран-238	4,47 млрд лет
	Торий-234	24,1 суток
β	Протактиний-234	1,17 минут
	Уран-234	245 000 лет
α	Торий-230	8 000 лет
	Радий-226	1 600 лет
α	Радон-222	3,823 суток
	Полоний-218	3,05 минут
β	Свинец-214	26,8 минут
	Висмут-214	19,7 минут
α	Полоний-214	0,000164 секунды
	Свинец-210	22,3 лет
β	Висмут-210	5,01 суток
	Полоний-210	138,4 суток
α	Свинец-206	Стабильный

Основной закон радиоактивного полураспада.



- Каждый радиоактивный элемент можно охарактеризовать промежутком времени T , в течение которого распадается половина ядер, имевшихся в момент начала отсчета времени (Период полураспада)
- **Период полураспада- основная константа радиоактивного элемента.**
- Пусть число радиоактивных атомов в начальный момент времени ($t = 0$) равно N_0 . Тогда по истечении периода полураспада это число будет равно $N_0 / 2$. Спустя еще один такой же интервал времени это число станет равным: $1/2 (N_0 / 2) = N_0 / 4 = N_0 / 2^2$
- По истечении времени $t = n T$, т. е. спустя n периодов полураспада T , радиоактивных атомов останется:
- $N = N_0 (1 / 2^n)$ или $N = N_0 (2^{-t/T})$
- Это и есть закон радиоактивного полураспада.

Основные виды ионизирующих излучений

Ионизирующее излучение возникает при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных частиц в веществе и образует при взаимодействии со средой ионы разных знаков. Ионизирующие излучения получили свое название благодаря способности вызывать ионизацию атомов и молекул в облучаемом веществе (образование положительных и отрицательных и свободных электронов из электрически нейтральных атомов и молекул). Ионизирующие

излучения подразделяются на электромагнитные и корпускулярные

Вид излучения	Название частиц	Масса покоя, а. е.	Заряд
Электромагнитное излучение			
γ , фотонное	Фотон	0	0
Корпускулярное излучение			
α	α -частица	4	+2
β^-	Электрон	0,000548	-1
β^+	Позитрон	0,000548	+1
Нейтронное	Нейтрон	1	0
Нейтринное	Нейтрино	Близка к нулю	0
	Антинейтрино	Близка к нулю	0

Основные виды ионизирующих излучений

1. Электромагнитные (фотонные) излучения.

- **Рентгеновское излучение** - электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, в пределах длин волн от 10^{-12} до 10^{-15} см.
- **Гамма-излучение** - коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой (менее 0,01 нм) длиной волны. и вследствие этого ярко выраженными корпускулярными свойствами, т. е. ведёт себя подобно потоку частиц - гамма-квантов, или фотонов. Гамма-излучение испускается возбужденными атомными ядрами при ядерных реакциях, радиоактивных превращениях атомных ядер, при аннигиляции (превращении при столкновении частицы и античастицы в другие частицы) электрона и позитрона и при других превращениях элементарных частиц.
- **Фотон** – носитель электромагнитного излучения – является в одинаковой мере и квантом энергии, проявляющим волновые свойства, и частицей (корпускулой). Фотоны могут существовать только в движении, их масса покоя равна нулю, но это не значит, что они вообще не имеют массы. Так, при энергии гамма-излучения в 1 МэВ масса фотона составляет $1/940$ (0,001 а.е.м.).
- **Видимый свет и радиоволны** – тоже электромагнитные излучения, но они не ионизируют, т.к. характеризуются большей длиной волны и соответственно меньшей энергией.

Основные виды ионизирующих излучений

2. Корпускулярные излучения

Корпускулярное излучение состоит как из заряженных, так и из

нейтральных частиц с массой отличной от нуля

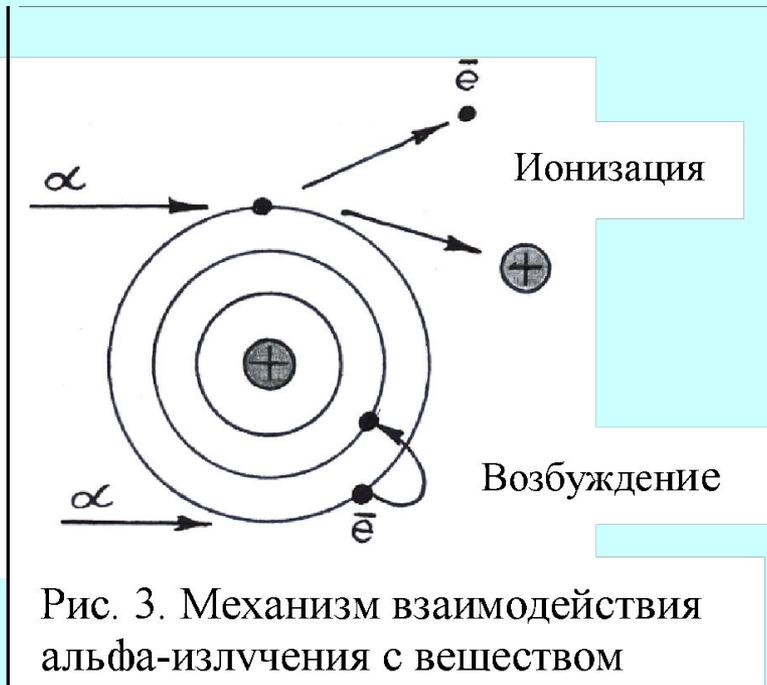
- **Альфа-излучение:** α -частицы — состоят из двух протонов и двух нейтронов; это положительно заряженные ядра атомов гелия, испускаемые при радиоактивном распаде изотопов тяжелых элементов — урана или радия. Они обладают малой проникающей способностью (пробег в воздухе - не более 10см).
- **Бета-излучение:** β -частицы — отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные позитроны, испускаемые во время радиоактивного распада ядерных элементов с промежуточной ионизирующей и проникающей способностью. β -частица намного легче, чем α -частица.
- **Нейтрино и антинейтрино**, образующиеся при β -распаде – частицы очень малого размера и чрезвычайно высокой проникающей способности в силу того, что они из-за своего малого размера крайне редко взаимодействуют с веществом, хотя и уносят с собой значительную часть энергии радиоактивного распада (эти частицы свободно проходят сквозь Землю и Солнце).
- **Нейтронное излучение.** Нейтроны - единственные незаряженные частицы, образующиеся при некоторых реакциях деления ядер атомов урана или плутония. Поскольку эти частицы электронейтральны, они глубоко проникают во всякое вещество, включая живые ткани, и теряют свою энергию практически только при соударении с ядрами атомов.

Особенности взаимодействия ионизирующих излучений с веществом

- Негативное воздействие на организмы связано со способностью высокоэнергетических частиц излучения выбивать электроны из атомов живой материи (вызывать ионизацию) или переводить электроны в возбужденное состояние.
- Если, приложив соответствующую энергию, один или несколько электронов оторвать от электронной оболочки, *произойдет ионизация атома.*
- Если под действием приложенной энергии электрон переходит на другую орбиту, более удаленную от ядра, но не покидает атом, - *происходит возбуждение атома. Этот переход сопровождается поглощением энергии.*
- Переход электрона на более низкий уровень сопровождается испусканием энергии. Величина поглощенной или испускаемой энергии строго определенная: она равна разности энергий начального и конечного энергетических уровней.
- Обнаружение и регистрация всех видов ядерных излучений, выбор материала для защиты от них, оценка биологического действия излучений на организмы возможны при понимании того, каким образом различные по природе излучения (альфа-, бета-частицы, гамма-кванты, нейтроны и т. д.) взаимодействуют с веществом.

Взаимодействие альфа-излучения с веществом.

Альфа-частицы опасны они лишь при попадании внутрь организма, так как способны выбивать электроны из оболочки нейтрального атома любого вещества и превращать его в положительно заряженный ион со всеми вытекающими последствиями. При взаимодействия альфа-излучения с веществом возможны следующие ситуации:



- **Упругое рассеяние частиц на атомных ядрах.** Частица отталкивается, изменяя направление своего движения.
- **Неупругое взаимодействие альфа-частиц с орбитальными электронами.** (ионизация нейтральных атомов)
- **Возбуждение электронов атомных оболочек,** при котором орбитальные электроны, получая дополнительную энергию, переходят в возбужденное состояние, переходя на другую орбиту, но не покидают атом.
- **Альфа-частица,** обладающая энергией, достаточной для преодоления кулоновских сил взаимодействия, проникает в ядро. При этом образуется *промежуточное ядро*, которое распадается с испусканием заряженных частиц, нейтронов или гамма-квантов

Взаимодействие бета-излучения с веществом.

Бета-излучение – поток частиц, имеющих отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные позитроны. Для большинства радионуклидов характерен электронный или отрицательный (β^-) распад. Значительно реже встречается

позитронный (β^+) распад, свойственный отдельным искусственным радионуклидам.

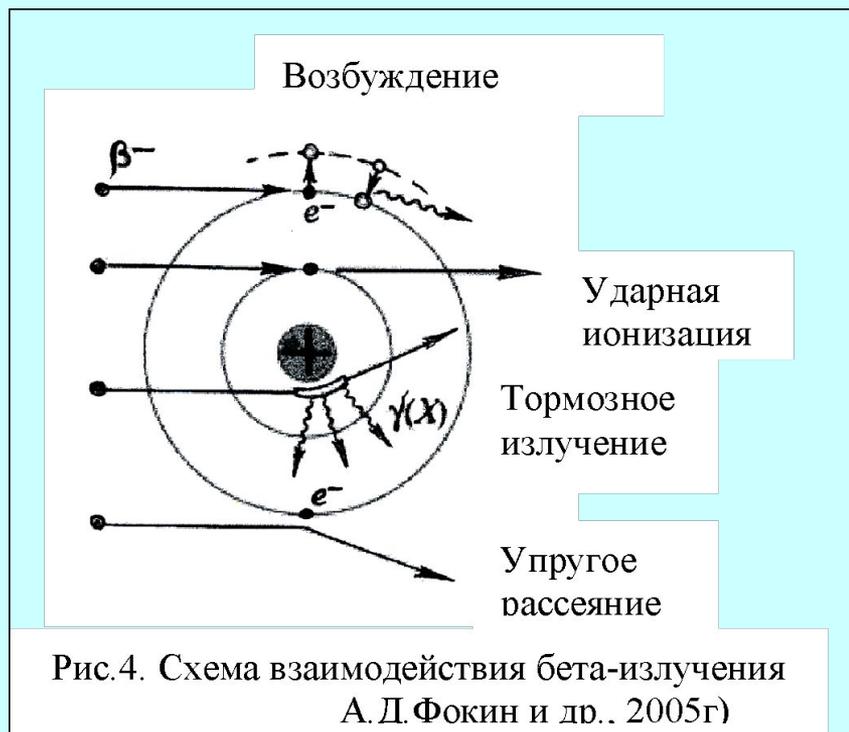
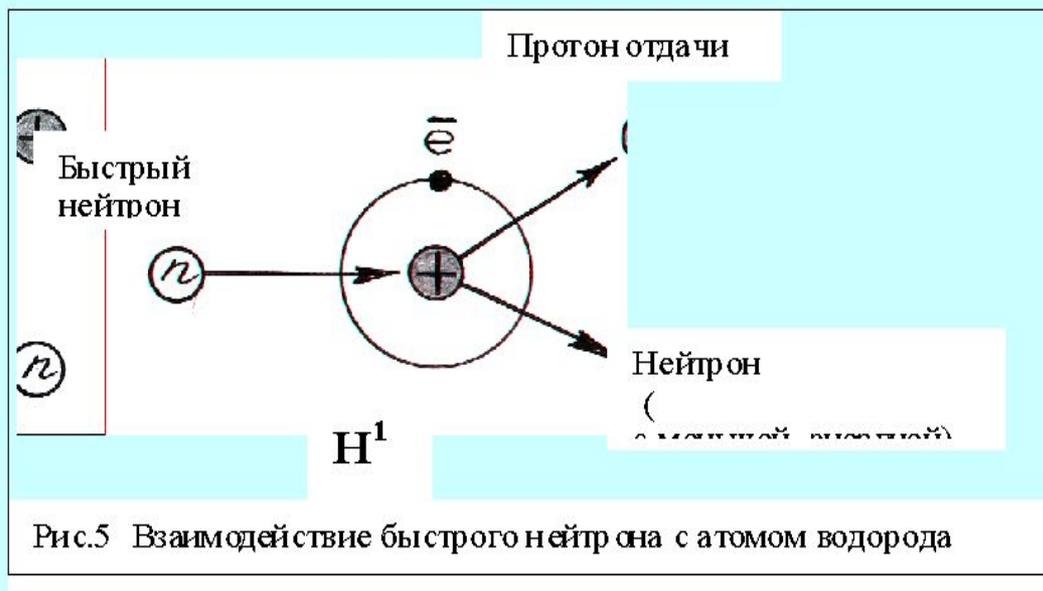


Рис.4. Схема взаимодействия бета-излучения
А. Д. Фокин и др., 2005г)

- **Упругое взаимодействие бета-частиц с атомными ядрами** наблюдается в результате притяжения бета-частиц (β^-) к положительно заряженным ядрам атомов. Следствие такого взаимодействия — изменение направления движения частиц.
- **Рассеяние бета-частиц на атомных ядрах:** наблюдается, если бета-частица (β^-) имеет высокую энергию, а поглотителем служит материал большой плотности (имеет большой атомный номер), при этом бета-частица тормозится в электрическом поле ядра и теряет часть своей энергии. В результате возникает тормозное излучение.
- **Ионизация и возбуждение атомов** при взаимодействии бета-частиц (β^-) с орбитальными электронами (рис.4). В зависимости от количества переданной энергии происходит возбуждение или ионизация атомов вещества. В этом и другом случае воздействующий электрон теряет свою энергию

Взаимодействие нейтронов с веществом



- **Нейтроны не имеют заряда**, что позволяет им беспрепятственно проникать в глубь атомов, в атомные ядра. При этом возможно упругое и неупругое рассеяние нейтронов на ядрах. Достигая ядер, они либо поглощаются ими, либо рассеиваются на них. **При упругом рассеянии** на ядрах углерода, азота, кислорода и других элементов, входящих в состав тканей, нейтрон теряет лишь 10-15% энергии, а при столкновении с почти равными с ним по массе ядрами водорода – протонами, энергия нейтрона уменьшается в среднем вдвое, передаваясь протону отдачи. **Нейтрон рассеяния** отклоняется от прежнего направления и обладает меньшей энергией. **Протон отдачи**, получивший дополнительную энергию, движется с повышенной скоростью и вызывает ионизацию встречающихся на его пути атомов.

Схема взаимодействия гамма излучения с веществом

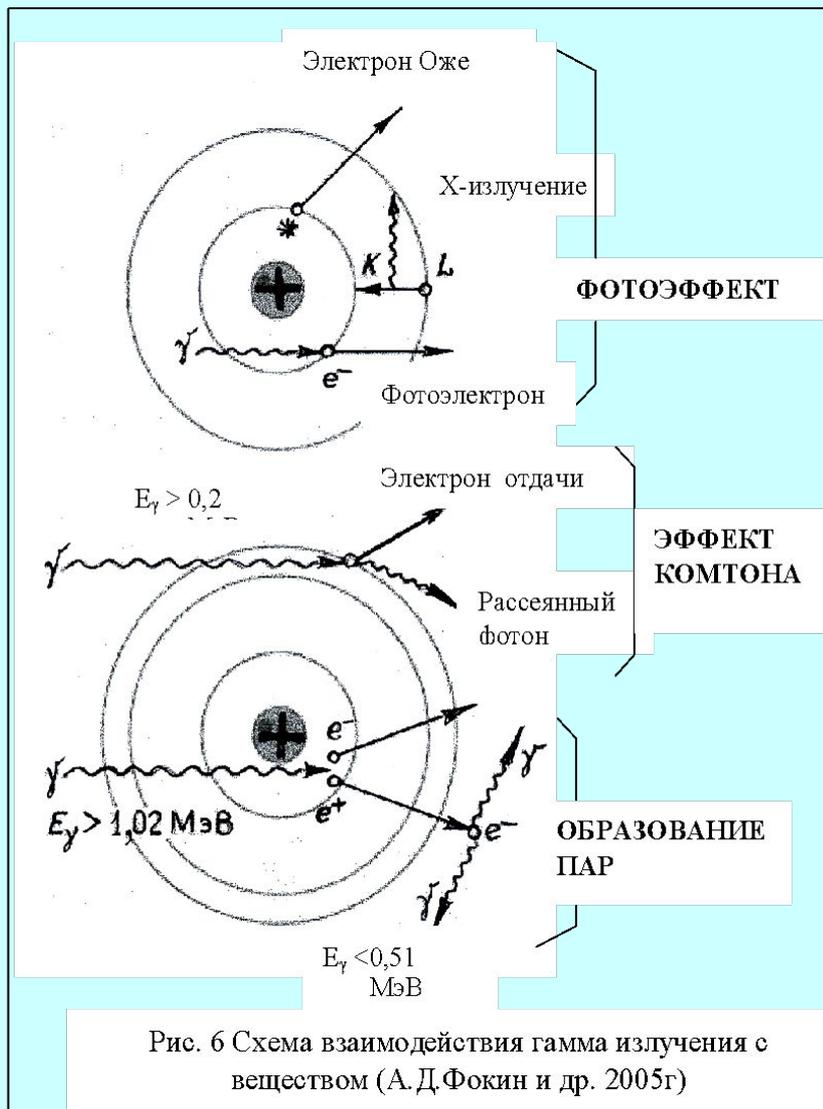


Рис. 6 Схема взаимодействия гамма излучения с веществом (А.Д.Фокин и др. 2005г)

- Гамма излучение непосредственную ионизацию не производит. При взаимодействии с веществом вызывает образование электронов, двигающихся с высокой скоростью и ионизирующих среду (косвенно ионизирующее излучение).
- Основными механизмами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются:
 - *Фото-эффект.*
 - *Эффект Комптона или комptonовское рассеяние.*
 - *Образование электрон-позитронных пар.*
- *Ядерный эффект.*

Электромагнитные излучения

Основными механизмами взаимодействия гамма-излучения с веществом

являются:

- **Фото-эффект.** Гамма-квант (при низкой энергии излучения до $0,05\text{МэВ}$), взаимодействуя с орбитальным электроном внутренней оболочки атома, полностью передает ему свою энергию, выбивая электрон из электронной орбиты. Выбитый электрон называется фотоэлектроном. Его энергия равна исходной энергии гамма-кванта за вычетом энергии связи электрона с атомом. Это явление сопровождается испусканием рентгеновского (X) излучения и дополнительного электрона с малой энергией и малым пробегом (электрон Оже).
- **Эффект Комптона или комптоновское рассеяние.** Это эффект упругого столкновения гамма-фотонов со слабо связанными орбитальными электронами. Гамма-квант (при средних энергиях облучения более $0,2\text{МэВ}$) передает орбитальному электрону лишь часть своей энергии, превращается в гамма-квант с меньшей энергией и отклоняется от своего первоначального пути. Электроны отдачи приобретают значительную энергию, которую расходуют на ионизацию вещества (вторичная ионизация).
- **Образование электрон-позитронных пар.** Это явление наблюдается при прохождении гамма-фотона на очень близком расстоянии от ядра и при условии, что энергия фотона превышает величину $1,02\text{МэВ}$. Гамма-кванты, проходя через вещество, превращаются под действием сильного электрического поля вблизи ядра в пару “электрон e^- –позитрон e^+ ”. Образовавшиеся частицы расходуют свою энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды, т.е. вызывают вторичную ионизацию в веществе. Позитрон, встречая на своем пути электрон, соединяется с ним, в результате чего образуются два фотона, но уже с энергией $0,51\text{МэВ}$ (явление аннигиляции).

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Часть 2

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

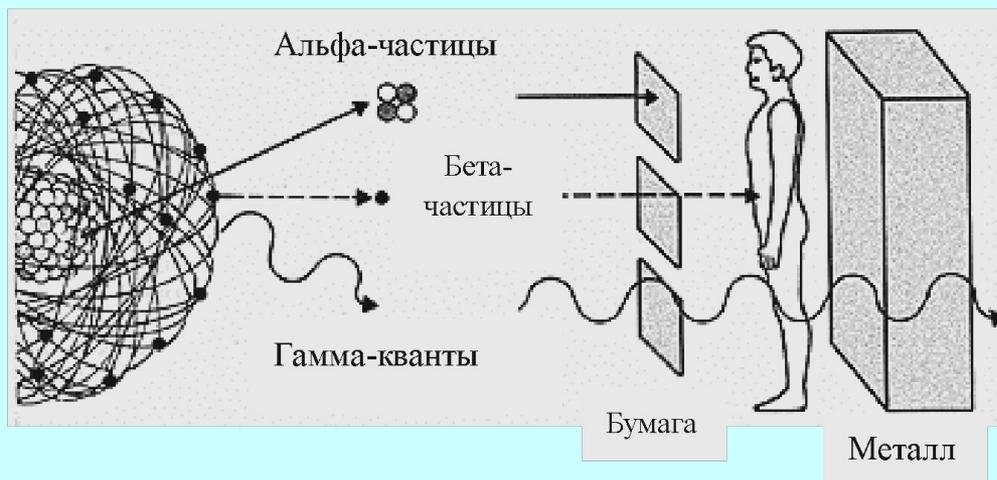
- **Особенность биологического действия ионизирующих излучений** состоит в том, что любой живой объект может быть убит этим излучением.
- **Под радиочувствительностью понимают** степень реакции клеток, тканей, органов и организмов на воздействие ионизирующего излучения.
- **Доза облучения** - мера количественной оценки радиочувствительности, при которой возникает регистрируемый эффект.
- **Видовая радиочувствительность** - свойственная каждому биологическому объекту (клеткам, тканям, органам или организмам) своя мера восприимчивости к воздействию ионизирующей радиации.
- **Индивидуальная радиочувствительность** сильно варьируется в пределах одного вида, к тому же зависит от возраста и пола. Кроме того, даже в одном организме различные клетки и ткани значительно различаются по радиочувствительности. Наряду с радиочувствительными (кровотворная система, эпителий слизистой тонкого кишечника) имеются более радиоустойчивые ткани (мышечная, нервная, костная). **Их принято называть радиорезистентными.**
- Ткани, относящиеся к радиорезистентным по непосредственным лучевым реакциям, могут оказаться весьма радиочувствительными по отдаленным последствиям воздействия излучения.

ЛЕТАЛЬНЫЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ

Вид	ЛД _{50/30} (50%)	ЛД _{100/30} (100%)
Мопская свинка	1.5...3.0	4.0...6.0
Овца	1.5...4.0	5.5...7.5
Ягнята до 3 месяцев	1.5...3.0	6.0
Крупный погатый скот	1.6...5.5	6.5
Телята до 5 месяцев	2.0...5.5	8.0
Осел	2.0...5.5	7.5
Коза	2.5	—
Верблюды	2.5...4.0	6.0
Человек	2.5...5.5	4.0...6.0
Обезьяна	2.5...6.0	8.0
Свинья	2.5...3.0	4.5
Попосята до 2 месяцев	2.5...6.0	—
Лошадь	3.5...4.0	5.0...6.5
Собака	2.0...3.5	4.0...5.0
Шенки до 3 мес	4.5...7.0	8.0...10.5
Мышь	4.6...7.5	7.0
Крыса	5.0...7.0	10.0
Кошка	5.0...7.5	8.0
Летучая мышь	5.0...8.0	9.5
Хомяк	5.5...8.0	—
Полевка	6.0...9.0	9.0...10.0
Суслик	6.0...9.5	9.0...11.5
Супок	8.0...10.0	11.0...12.0
Кролик	10.0...11	14.0
Монгольская песчанка	—	15.0...18.0
Птицы, рыбы	8.0...20.0	—
Насекомые	10.0...100.0	—
Змея	80.0...200.0	—

- Каждому биологическому виду свойственна своя мера чувствительности к действию ионизирующей радиации, своя радиочувствительность.
- Чем выше уровень биологического развития организма, тем выше его радиочувствительность (за некоторым исключением) - закон радиочувствительности.
- Одним из критериев оценки биологической эффективности излучений является гибель организмов.
- Обязательным требованием к используемому критерию является его строгая количественная связь с дозой облучения.
- Доза ионизирующей радиации, при которой гибнет половина организмов, называется *полулетальной (LD₅₀)*.
- Минимальная доза, смертельная для всех облученных организмов, называется *летальной (LD₁₀₀)*.

ТРИ ВИДА ИЗЛУЧЕНИЙ И ИХ ПРОНИКАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ



- **Альфа-излучение.** В соответствии с наибольшей плотностью ионизации α -частиц пробег их во всех средах очень невелик: даже в воздухе α -излучение распространяется на расстояние, не превышающее 3—7 см. Для защиты от альфа-излучения достаточно простого листа бумаги.
- **Бета-излучение** обладает большей проникающей способностью: оно проходит в ткани организма на глубину один-два сантиметра. Эффективную защиту от бета-частиц обеспечит алюминиевая пластинка толщиной не менее 6 мм.
- **Гамма-излучение.** Проникающая способность гамма-излучения, которое распространяется со скоростью света” очень велика: его может задержать лишь толстая свинцовая или бетонная плита. С учетом фактора геометрического рассеяния реальный радиус действия γ -лучей составляет -200—300 м от источника. Для защиты от него необходим экран из свинцовых пластин или толстых бетонных плит.

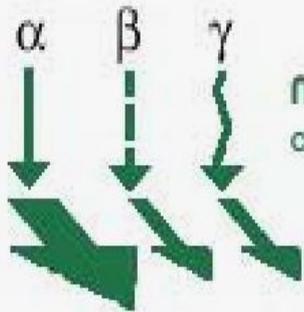
Доза излучения и его мощность

- Вещества, способные создавать ионизирующие излучения, различаются **активностью (А)**, т.е. числом радиоактивных превращений в единицу времени. В системе СИ за единицу активности принято одно ядерное превращение в секунду (распад/с). Эта единица получила название беккерель (Бк).
- Основная физическая величина, характеризующая действие излучения на организм, находится в прямой зависимости от количества поглощенной энергии.
- **Доза излучения.** Для измерения количества поглощенной энергии введено понятие – доза излучения. Это величина энергии, поглощенной в единице объема (массы) облучаемого вещества. Таким образом: **доза ионизирующего излучения - это характеристика количества излучения и мера его воздействия на облучаемую среду или объекты окружающей среды.** Различают три дозы облучения: поглощённая, эквивалентная и экспозиционная.
- **Поглощенная доза (D)** – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым телом (тканями организма), в пересчете на единицу массы: $D = dE/dm$, где **E – энергия излучения, m – масса объекта.** В Международной системе единиц (СИ) поглощенная доза выражается в джоулях на килограмм массы - Дж/кг. Эта величина получила название грей (Гр). Иногда используют другую, внесистемную единицу измерения поглощенной дозы - рад, причем 1рад = 10^{-2} Гр. Различают дозу в воздухе, на поверхности (кожная доза) и в глубине облучаемого объекта (глубинная доза), очаговую и интегральную (общую поглощенную) дозы.
- **Экспозиционная доза D_0** характеризует ионизирующую способность излучений в воздухе. От экспозиционной дозы с помощью соответствующих коэффициентов переходят к дозе, поглощенной в объекте. Установленная в СИ единица измерения экспозиционной дозы - кулон, отнесенный к килограмму (Кл кг⁻¹). На практике и в научной литературе распространена другая, внесистемная, единица экспозиционной дозы - рентген (Р).

Доза излучения и его мощность (продолжение)

- **Эквивалентная доза.** В связи с тем, что одинаковая поглощённая доза различных видов ионизирующего излучения вызывает в единице массы биологической ткани различное биологическое действие, введено понятие *эквивалентной дозы*. Эквивалентная доза излучения $H_{T,R}$ - это поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, т.е. коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани: $H_{T,R} = D_{T,R} W_R$
 W_R - взвешивающий коэффициент для излучения R, $D_{T,R}$ - средняя поглощенная доза в органе или ткани T, т.к. эквивалентная доза излучения рассчитывается для “средней” ткани организма человека. Эквивалентную дозу в СИ выражают в зивертах (Зв). Внесистемная единица измерения - бэр (биологический эквивалент рада), 1 бэр = 0,01Зв.
- **Эффективная эквивалентная доза.** Для оценки биологического эффекта (или меры риска) при облучении органов, тканей и организма в целом с учетом влияния разных видов излучения и радио-чувствительности отдельных органов вводят эффективную эквивалентную дозу (Е). В случаях, когда на объект воздействуют разные виды излучений с различными взвешивающими коэффициентами, эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения. Для организма в целом она может быть определена как сумма произведений эквивалентной дозы в отдельных органах и тканях на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного органа или ткани (коэффициент радиационного риска).
- **Эффективная коллективная доза.** В тех случаях, когда возникает необходимость оценить меру риска появления стохастических эффектов облучения, используют эффективную коллективную дозу, которая является суммой индивидуальных эффективных доз.

ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

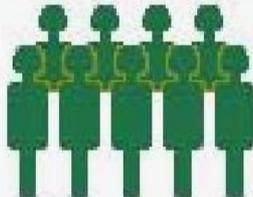


Поглощенная доза – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым телом (тканями организма), в пересчете на единицу массы

Эквивалентная доза – поглощенная доза, умноженная на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма



Эффективная эквивалентная доза – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент, учитывающий разную чувствительность различных тканей к облучению



Коллективная эффективная эквивалентная доза – эффективная эквивалентная доза, полученная группой людей от какого-либо источника радиации



Полная коллективная эффективная эквивалентная доза – коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получают поколения людей от какого-либо источника за все время его дальнейшего существования

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

- **МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)** разработана с целью замены сложной совокупности систем единиц и отдельных внесистемных единиц, сложившейся на основе метрической системы мер, и для упрощения пользования единицами.
- Наличие ряда систем единиц физических величин, а также значительного числа внесистемных единиц, неудобства, связанные с пересчетом при переходе от одной системы единиц к другой, требовало унификации единиц измерений. Рост научно-технических и экономических связей между разными странами обуславливал необходимость такой унификации в международном масштабе.
- Требовалась единая система единиц физических величин, практически удобная и охватывающая различные области измерений. При этом она должна была сохранить принцип *когерентности* (равенство единице коэффициента пропорциональности в уравнениях связи между физическими величинами).
- В 1954 г. X Генеральная конференция по мерам и весам установила шесть основных единиц (метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин и свеча) практической системы единиц.
- Система, основанная на утвержденных в 1954 г. шести основных единицах, была названа Международной системой единиц, сокращенно СИ (*SI* - начальные буквы французского наименования *Systeme International* была принята в 1960 году. Был утвержден перечень шести основных, двух дополнительных и первый список двадцати семи производных единиц, а также приставки для образования кратных и дольных единиц.
- На всех языках мира эта система получила сокращенное название СИ, а её единицы называются единицами СИ.

Основные физические величины, используемые в радиационной биологии, и их единицы

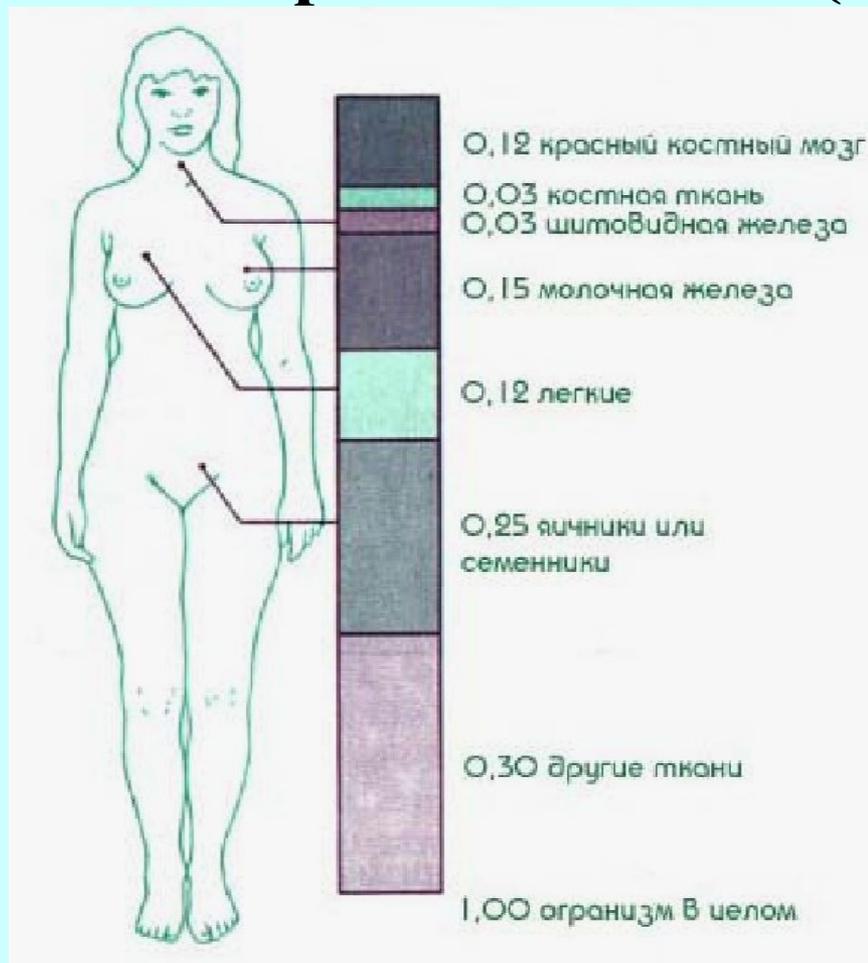
Физическая величина	Единица, ее наименование, обозначение (международное и русское)		Соотношение между единицами	
	Внесистемная*	Система СИ**	Внесистемной*	Системы СИ** и
Активность нуклида в радиоактивном источнике	Кюри (Ci, Ки)	Беккерель (Bq, Бк)	1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк	1 Бк = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки
Экспозиционная доза излучения	Рентген (R, P)	Кулон на килограмм (Кл/кг)	1 P = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг	1 Кл/кг = 3876 P
Мощность экспозиционной дозы излучения	Рентген в секунду (R/s, P/c)	Ампер на килограмм (A/kg, A/кг)	1 P/c = $2,58 \cdot 10^{-4}$ A/кг	1 A/кг = 3876 P/c
Поглощенная доза излучения	Рад (rad, рад)	Грей (Gr, Гр)	1 рад = 0,01 Гр	1 Гр = 100 рад
Мощность поглощенной дозы излучения	Рад в секунду (rad/s, рад/с)	Грей в секунду (Gr/s, Гр/с)	1 рад/с = 0,01 Гр/с	1 Гр/с = 100 рад/с
Интегральная доза излучения	Рад-грамм (rad g, рад г)	Джоуль (J, Дж)	1 рад г = 10^{-5} Дж	1 Дж = 10^5 рад г
Эквивалентная доза излучения	Бэр (rem, бэр)	Зиверт (Sv, Зв)	1 бэр = 0,01 Зв	1 Зв = 100 бэр
Мощность эквивалентной дозы излучения	Бэр в секунду (rem/s, бэр/с)	Зиверт в секунду (Sv/s, Зв/с)	1 бэр/с = 0,01 Зв/с	1 Зв/с = 100 бэр/с

**

Система СИ – Международная система единиц

Внесистемная единица физической величины – единица физической величины, используемая в одной из национальных систем единиц

Коэффициенты радиоактивного риска для разных тканей (органов) человека



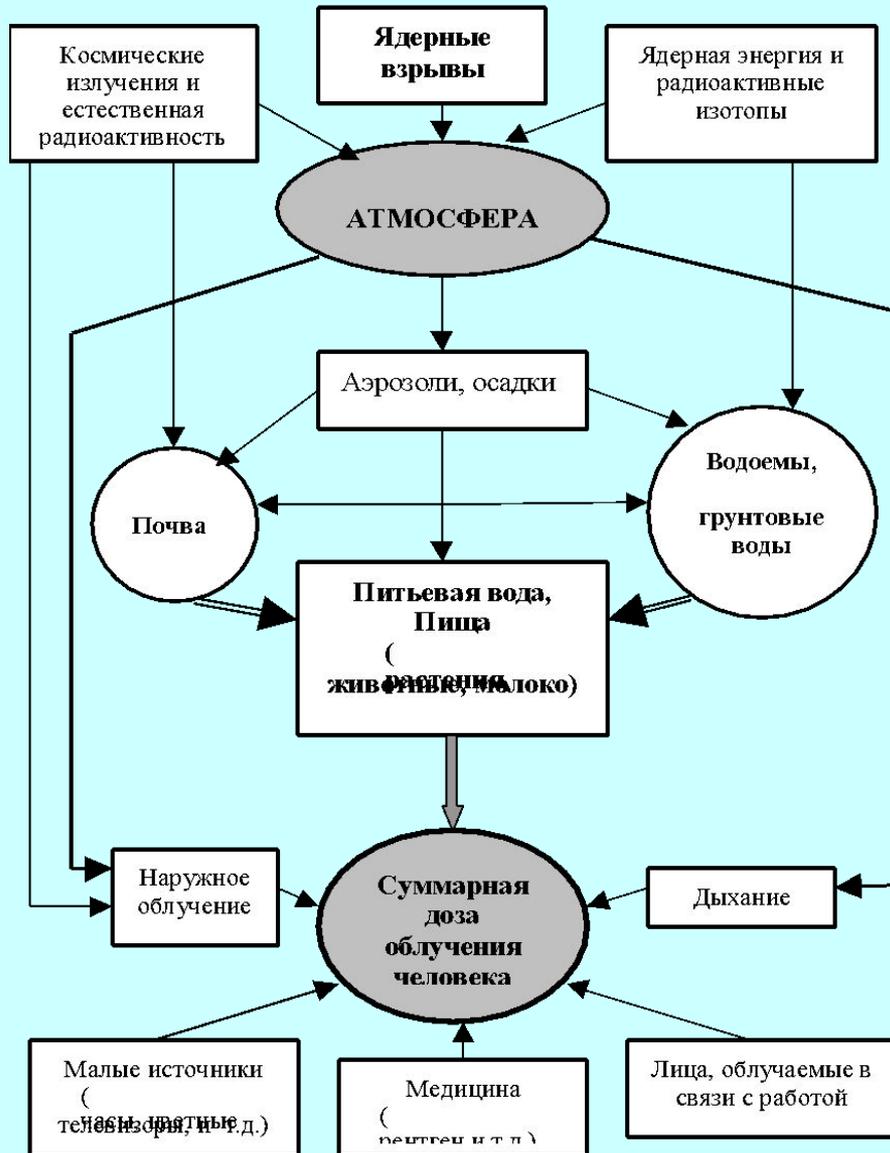
- Органы и ткани человека имеют разную чувствительность к облучению
- Наиболее уязвимы красный костный мозг, гонады, легкие. Менее восприимчивы печень, щитовидная железа, мышцы и другие внутренние органы.
- Дозы облучения органов и тканей следует учитывать с разными коэффициентами
- Коэффициенты радиоактивного риска для разных тканей (органов) человека при равномерном облучении всего тела, рекомендованы международной комиссией по радиационной защите для вычисления эффективной эквивалентной дозы.

НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НРБ-99

(Государственные санитарно-эпидемиологические правила и нормативы)

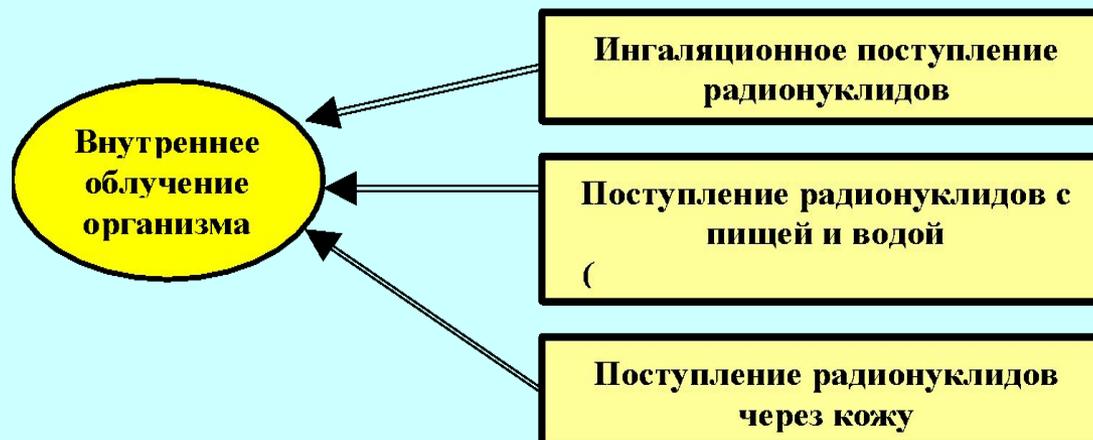
- **НРБ-99 применяются** для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения.
- **Нормы распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека:** - в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения; - в результате радиационной аварии; - от природных источников излучения; - при медицинском облучении.
- **Нормы радиационной безопасности относятся только к ионизирующему излучению.** В Нормах учтено, что ионизирующее излучение является одним из множества источников риска для здоровья человека, и что риски, связанные с воздействием излучения, не должны соотноситься только с выгодами от его использования, но их следует сопоставлять и с рисками нерадиационного происхождения.
- **Основу системы радиационной безопасности, сформулированной в данных Нормах,** составляют современные международные научные рекомендации, опыт стран, достигших высокого уровня радиационной защиты населения, и отечественный опыт. Данные мировой науки показывают, что соблюдение Международных основных норм безопасности, которые легли в основу Норм, надежно гарантирует безопасность работающих с источниками излучения и всего населения.
- **НРБ устанавливают:** требования к ограничению техногенного облучения в контролируемых условиях, требования к защите от природного облучения в производственных условиях, требования к ограничению облучения населения, требования по ограничению облучения населения в условиях радиационной аварии, требования к контролю за выполнением Норм, значения допустимых уровней радиационного воздействия и т.д.

Источники формирования суммарной дозы облучения человека



- Все живое на Земле находится под непрерывным воздействием ионизирующих излучений.
- Следует различать две компоненты радиационного фона: природный фон и порожденный деятельностью человека.
- Природный фон обусловлен космическим излучением и природными радиоактивными веществами, содержащимися в земле, воздухе и во всей биосфере.
- Техногенный фон обуславливается работой АЭС, урановых рудников, использованием радиоизотопов в промышленности, сельском хозяйстве, испытанием (применением) ядерного оружия.
- Суммарное воздействие искусственных источников ионизирующего излучения на человека складывается из внешнего облучения от источников излучения, находящихся вне человека, и внутреннего облучения от источников излучения, попадающих в организм человека с воздухом, водой, пищей или другими путями.
- Величина дозы внешнего облучения человека зависит от целого ряда факторов: вида и энергии излучения радионуклида, количества и активности нуклида в почве, распределения нуклидов в слое почвы, времени нахождения человека на открытой территории, наличия защитных сооружений и т.д.

ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМ



- Наиболее важным и потенциально опасным является ингаляционное поступление радионуклидов: этому способствует огромная дыхательная поверхность альвеол (легкие, бронхи), площадь которой $\sim 100\text{м}^2$ (в 50 раз больше, чем поверхность кожи).
- Второй по значимости путь – поступление радионуклидов с пищей и водой. Дальнейшая судьба поглощенных радионуклидов зависит от их растворимости в жидкой среде желудочно-кишечного тракта. В организм поступает лишь некоторая часть попавших в кишечник нуклидов, большая часть проходит “транзитом” и удаляется из кишечника.
- В связи с тем, что спустя некоторое время после аварии подавляющее количество радионуклидов оказывается локализованным в верхнем слое почвы, главным источником внутреннего облучения сельскохозяйственных животных становятся продукты питания, полученные из сельскохозяйственного сырья с загрязненных территорий.
- Радионуклиды в составе жидких и газообразных соединений проникают через кожу людей и животных достаточно быстро, а иногда и в значительных количествах.

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА

Органы и ткани	Радионуклиды
Щитовидная железа	^{129}I , ^{131}I , ^{99}Tc
Легкие	^{85}Kr , ^{238}Pt , ^{239}Pt , ^{222}Rd , ^{233}U , ^{133}Xe , ^{135}Xe
Печень	^{137}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{239}Ne , ^{238}Pt , ^{239}P , ^{241}Pt
Кости	^{140}Ba , ^{14}C , ^{154}Er , ^{32}P , ^{238}Pt , ^{239}Pt , ^{241}Pt , ^{147}Pr , ^{226}Ra , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{234}Th , ^{233}U , ^{90}Y , ^{65}Zn
Селезенка	^{210}Po
Почки	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Pt
Яичники	^{140}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{58}Co , ^{131}I , ^{85}Kr , ^{239}Pt , ^{40}K , ^{42}K , ^{106}Rt , ^{90}Y , ^{65}Zn
Мышцы	^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Er , ^{155}Er , ^{40}K , ^{42}K
Кожа	^{35}S

- По способности накапливать радионуклиды основные органы располагаются следующим образом: щитовидная железа (максимум), печень, кишечник, почки, скелет, мышцы
- По скорости выведения радионуклидов органы располагаются несколько иначе: щитовидная железа (максимум), печень, почки, селезенка, кожа, мышцы, скелет
- Под «критическими органами» понимают жизненно важные органы или системы, первыми выходящие из строя, что обеспечивает гибель организма в определенные сроки после облучения.
- Между величиной поглощенной дозы в организме и средней продолжительностью жизни существует строгая зависимость, определяемая различиями в радиочувствительности отдельных жизненно важных (критических) органов или систем.
- Три основные радиационные синдрома: костномозговой (кровотворный), желудочно-кишечный и церебральный, развивающиеся вследствие поражения и выхода из строя соответствующих критических систем организма. Ступенчатый характер отмирания, обусловленный дозой облучения, обнаружен для млекопитающих разных видов, земноводных (лягушек), насекомых (амбарных долгоносиков, бокоплавов, дрозофил) и червей.