

# Радиационная биофизика (Радиобиология)



*А.Г. Платонов*

к.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник  
кафедры биофизики Биологического ф-та  
МГУ им. М.В.Ломоносова

# Лекция 1

# Введение

Радиобиология – наука о биологическом действии ионизирующих излучений, т.е. наука о действии ионизирующих излучений на живые организмы.

Термины

«радиобиология» и «радиационная биология» – СИНОНИМЫ

# «Радиация» или «ионизирующее излучение»?

В научной литературе для обозначения понятия, которое на бытовом жаргоне называют словом «РАДИАЦИЯ», используют термины «ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ», или «ИОНИЗИРУЮЩАЯ РАДИАЦИЯ».

Использование термина «радиация» для обозначения ионизирующего излучения в научной литературе считается некорректным и обычно не допускается, т.к. в действительности, термин «радиация» имеет более широкое значение, т.е. существует не только ионизирующая радиация, но и световая радиация, радиочастотная радиация, тепловая радиация и т.д.

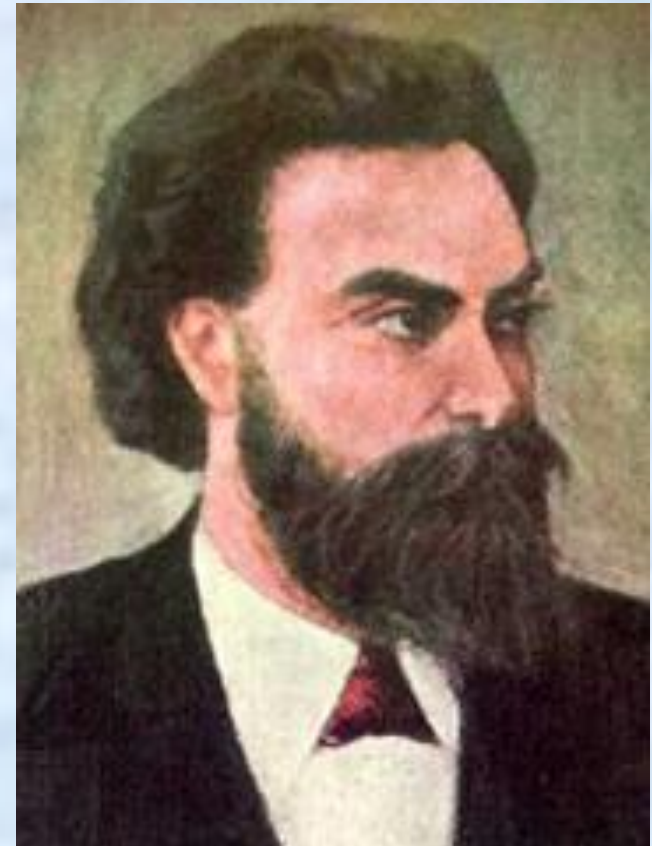
В настоящем цикле лекций постараемся придерживаться правильной научной терминологии, т.е. будем далее использовать термин «ионизирующее излучение» (ИИ).

# Основоположники радиобиологии в России (1)

Биологическое действие ионизирующих излучений (ИИ) стали изучать практически сразу после открытия X-лучей немецким физиком Вильгельмом Рентгеном в декабре 1895 г.).

И Россия в этих исследованиях с самого начала занимала передовые позиции.

Уже в марте 1896 г. приват-доцент Петербургского университета Иван Рамазович Тархнишвили (Тарханов, Тархан-Моурави, 1846-1908) обнаружил эффекты X-лучей на некоторые физиологические системы (в частности, на центральную нервную систему) организма лягушек и насекомых.



## Основоположники радиобиологии в России (2)

В 1903 г. Ефим Семенович Лондон (1868-1939), работавший в Петербурге в Институте экспериментальной медицины, впервые установил, что излучение радия в определенных дозах может оказывать летальное (т.е. смертельное) действие на мышей. Он был первым исследователем, показавшим, что под влиянием излучения радия наиболее ранние и выраженные изменения происходят в кроветворных, лимфоидных и половых органах. В 1911 г. он опубликовал первую в мире монографию по радиобиологии «Радий в биологии и медицине».



# **Виды ионизирующих излучений и их краткая характеристика**

# Что такое ионизирующее излучение?

Ионизирующим излучением называют излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию положительно или отрицательно заряженных ионов.

Ионизация обычно происходит путем отрыва электрона с внешних электронных оболочек атома.

Для большинства химических элементов, входящих в состав биологического материала, для их ионизации необходима энергия от 10 до 70 эВ.

Электронвольт (эВ) – внесистемная единица энергии, широко применяемая в атомной и ядерной физике для энергетической характеристики частиц и квантов электромагнитного излучения.

1 эВ представляет собой кинетическую энергию, которую приобретает электрон, разогнавшись в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В.

$$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$



# Ионизирующие излучения

Корпускулярные  
излучения

$\beta$ -излучение

$\alpha$ -излучение

Протонное  
излучение

Нейтронное  
излучение

Электронное  
излучение

и др.

Электромагнитные  
излучения (ЭМИ)

$\gamma$ -излучение

Рентгеновское  
излучение

Неионизирующие  
электромагнитные  
излучения

УФ-излучение

Видимое излучение

ИК-излучение

Микроволновое  
излучение

Радиочастотное  
излучение

# Основные виды ионизирующих излучений

Рассмотрим происхождение, природу и некоторые физические характеристики ионизирующих излучений, определяющие особенности их биологического действия.

Наиболее подробно рассмотрим следующие виды ионизирующих излучений:

**$\beta$ -излучение,  
 $\alpha$ -излучение,  
 $\gamma$ -излучение,  
рентгеновское излучение.**

# Происхождение и природа $\beta$ -излучения

$\beta$ -Излучение возникает при  $\beta$ -распаде радионуклида.

Нуклид – это разновидность атомов со строго определенным числом протонов и нейтронов в ядре.

Радионуклид (т.е. радиоактивный нуклид) – это нуклид, ядро которого нестабильно, т.е. распадается, превращаясь в ядро атома другого элемента.

## Различают $\beta^-$ -излучение и $\beta^+$ -излучение.

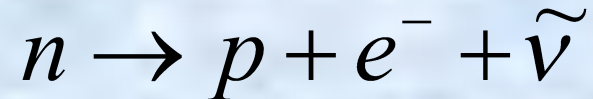
$\beta^-$ -Излучение представляет собой поток электронов (т.н.  $\beta^-$ -частиц), испускаемых ИЗ АТОМНЫХ ЯДЕР при  $\beta^-$ -распаде радионуклида.

$\beta^+$ -Излучение представляет собой поток позитронов (т.н.  $\beta^+$ -частиц), испускаемых ИЗ АТОМНЫХ ЯДЕР при  $\beta^+$ -распаде радионуклида.

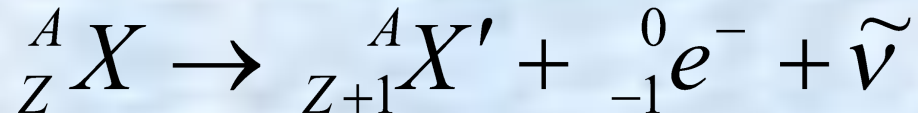
Позитрон – античастица по отношению к электрону. Имеет заряд +1.

# $\beta^-$ -Распад

При  $\beta^-$ -распаде испускаемый из ядра электрон  $e^-$  (т.н.  $\beta^-$ -частица) возникает при превращении нейтрона в протон, что сопровождается образованием еще одной частицы — антинейтрино:



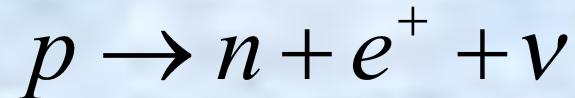
Поэтому при  $\beta^-$ -распаде заряд атомного ядра (т.е. атомный номер) увеличивается на 1 ед. ( $Z' = Z + 1$ ), а массовое число не изменяется ( $A' = A$ ):



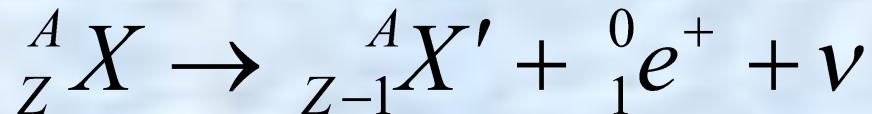
где  $X, X'$  — символы исходного и образующегося ядра.

# $\beta^+$ -Распад

При  $\beta^+$ -распаде испускаемый из ядра позитрон  $e^+$  (т.н.  $\beta^+$ -частица) возникает при превращении протона в нейтрон, что сопровождается образованием еще одной частицы — нейтрино:



Поэтому при  $\beta^+$ -распаде заряд атомного ядра (т.е. атомный номер) уменьшается на 1 ед. ( $Z' = Z - 1$ ), а массовое число не изменяется ( $A' = A$ ):



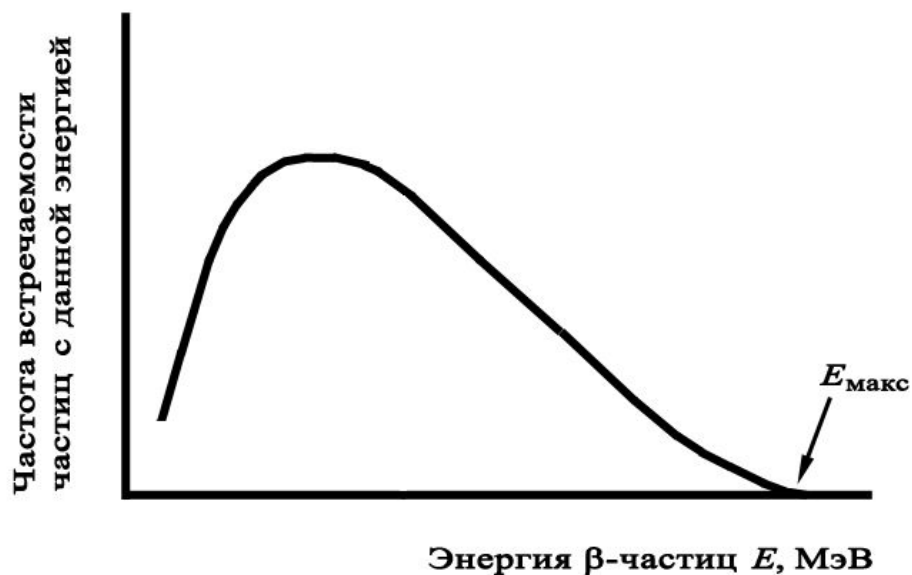
где  $X, X'$  — символы исходного и образующегося ядра.

# Энергетическая характеристика $\beta$ -излучения

$\beta$ -Излучение характеризуется непрерывным энергетическим спектром: энергии испускаемых  $\beta$ -частиц, а варьируют почти от 0 до некоторого максимального значения  $E_{\text{макс}}$ .

Это что объясняется тем, что не вся энергия, высвобождающаяся при  $\beta$ -распаде достается  $\beta$ -частицам.

При  $\beta^-$ -распаде высвобождающаяся энергия распределяется между электроном и антинейтрино, а при  $\beta^+$ -распаде – между позитроном и нейтрино.



Максимальная энергия ( $E_{\text{макс}}$ )  $\beta$ -частиц обычно лежит в диапазоне от 10 кэВ до 3 МэВ.

# Графические схемы радиоактивного распада

Радиоактивный распад наглядно можно представлять в виде графических схем.

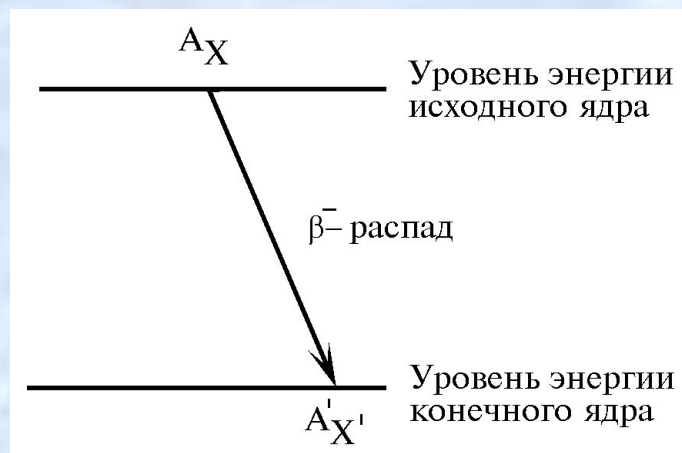
В этих графических схемах верхняя горизонтальная линия представляет уровень энергии исходного радиоактивного ядра, а нижняя линия – уровень энергии основного состояния образующегося ядра.

Над верхней линией ставится символ исходного химического элемента  $X$  и его массовое число  $A$ . Под нижней линией ставится символ образующегося химического элемента  $X'$  и его массовое число  $A'$ .

Разные типы радиоактивных распадов изображаются стрелками разной формы, идущими косо вниз от верхней горизонтальной линии до нижней.

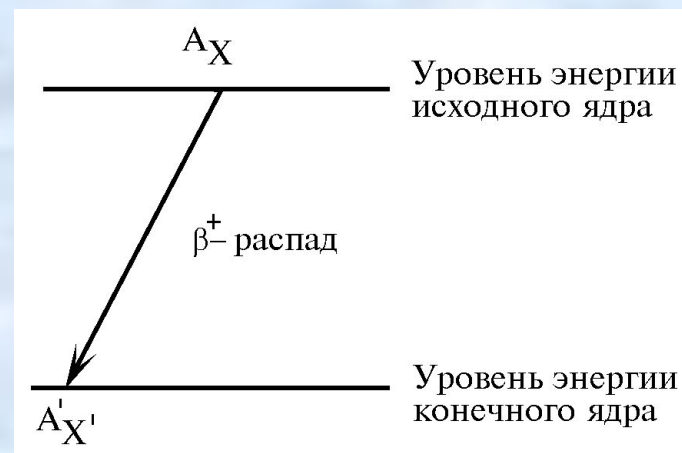
# Графические схемы $\beta^-$ -распада и $\beta^+$ -распада

$\beta^-$ -Распад изображается сплошной одинарной стрелкой, направленной косо вниз вправо от верхней линии к нижней.



Образующийся нуклид  $X'$  стоит в периодической системе на один номер дальше, чем исходный радиоактивный нуклид  $X$  ( $Z'=Z+1$ ;  $A'=A$ ).

$\beta^+$ -Распад изображается сплошной одинарной стрелкой, направленной косо вниз влево от верхней линии к нижней.



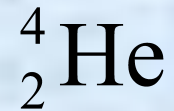
Образующийся нуклид  $X'$  стоит в периодической системе на один номер ближе к ее началу, чем исходный радиоактивный нуклид  $X$  ( $Z'=Z-1$ ;  $A'=A$ ).



# Происхождение и природа $\alpha$ -излучения

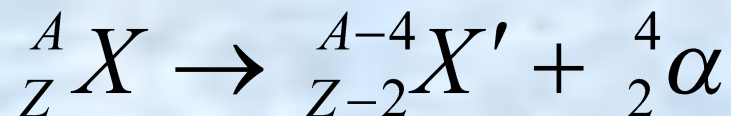
$\alpha$ -Излучение представляет собой поток  $\alpha$ -частиц, образующихся при  $\alpha$ -распаде радионуклидов.

$\alpha$ -Распад заключается в том, что из ядра радионуклида выбрасывается частица (называемая  $\alpha$ -частицей), которая состоит из двух протонов и двух нейтронов, т.е. представляет собой ядро атома гелия:



При  $\alpha$ -распаде атомный номер уменьшается на 2 единицы ( $Z' = Z - 2$ ), массовое число  $A$  — на 4 единицы ( $A' = A - 4$ ).

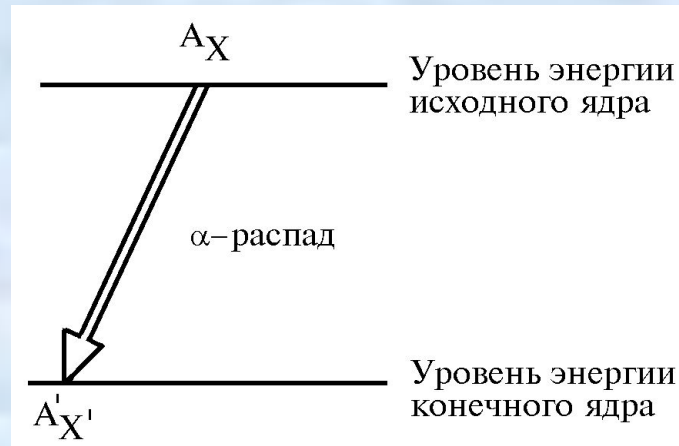
Схема  $\alpha$ -распада в общем виде выглядит так:



где  $X, X'$  — символы исходного и образующегося ядра.

# Графическая схема $\alpha$ -распада

$\alpha$ -Распад изображается сплошной двойной стрелкой, направленной косо вниз влево.



Образующийся при этом нуклид  $X'$  стоит в периодической системе на два номера ближе к ее началу, чем исходный радиоактивный нуклид  $X$  ( $Z'=Z-2$ ;  $A'=A-4$ ).

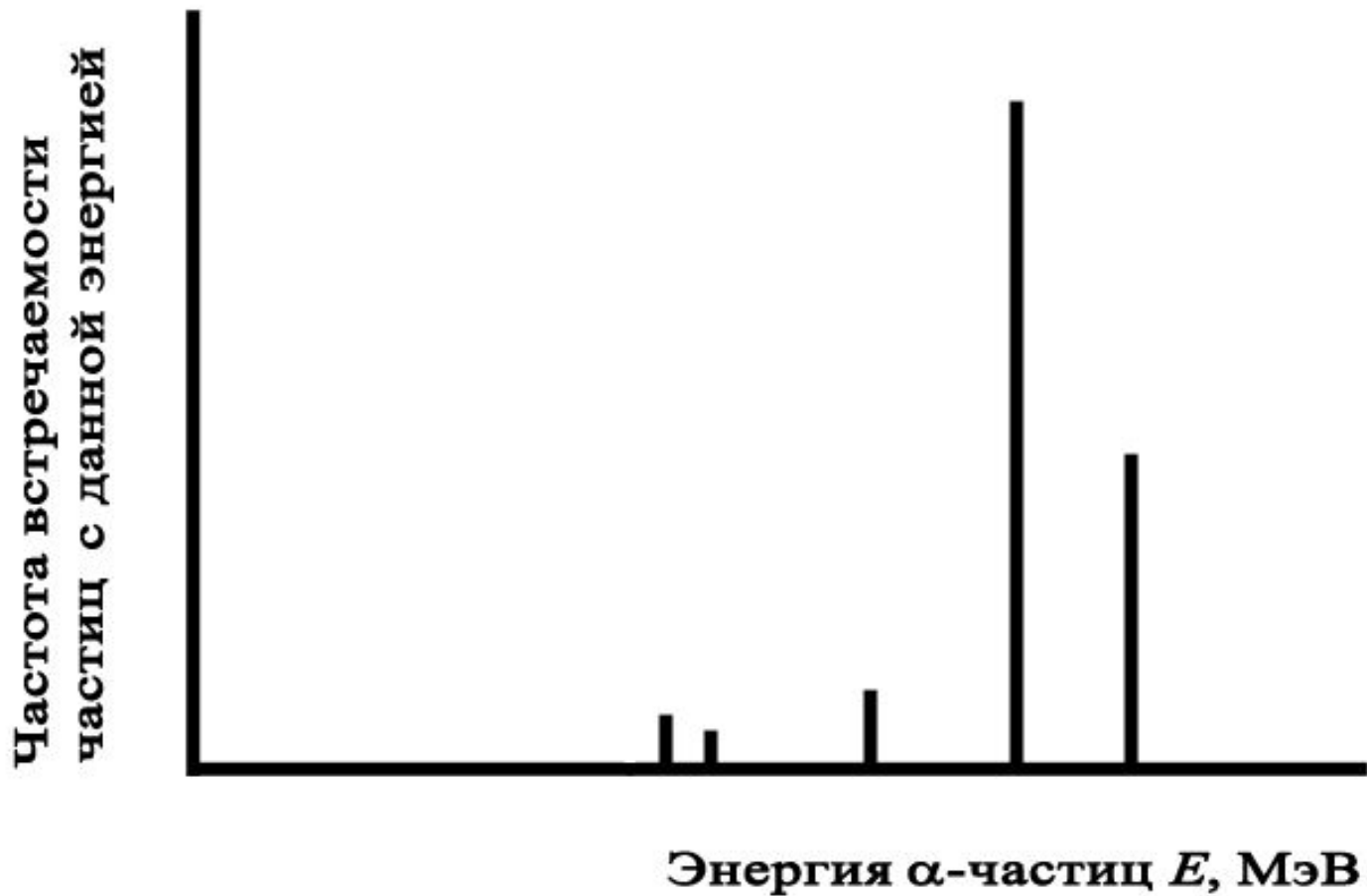
# Энергетическая характеристика $\alpha$ -излучения

$\alpha$ -Частицы – это высокоэнергетичные частицы.

При выходе из ядра  $\alpha$ -частицы имеют начальную кинетическую энергию в основном в диапазоне от 2 МэВ до 11 МэВ.

Спектр  $\alpha$ -излучения (т.е. энергетическая зависимость частоты встречаемости  $\alpha$ -частиц) является линейчатым (дискретным). Часто при  $\alpha$ -распаде испускается не одна, а несколько групп  $\alpha$ -частиц, каждая из которых обладает определенной энергией, и следовательно энергетический спектр состоит из нескольких дискретных линий.

# Энергетический спектр $\alpha$ -излучения



# **γ-Излучение и рентгеновское излучение**

**γ-излучение и рентгеновское излучение  
являются ионизирующими  
электромагнитными излучениями.**

**Основное отличие γ- и рентгеновского  
излучений заключается  
В ИХ ПРОИСХОЖДЕНИИ!!!**

# **γ-излучение**

**γ-ИЗЛУЧЕНИЕ** — это электромагнитное излучение, возникающее:

- 1) при ядерных превращениях (в частности, при радиоактивном распаде) – т.е. имеет ядерное происхождение.**
- 2) при аннигиляции частицы и античастицы (например, электрона и позитрона).**

# Радиоактивный распад атомного ядра обычно сопровождается $\gamma$ -излучением

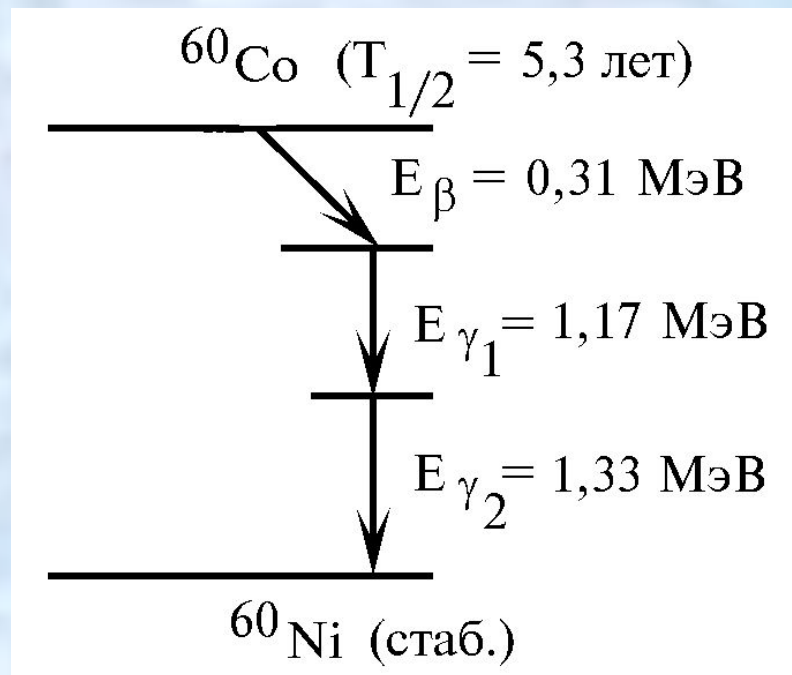
При любом виде радиоактивного распада образовавшееся в результате радиоактивного распада дочернее ядро в большинстве случаев находится в возбужденном энергетическом состоянии.

Сброс избыточной энергии осуществляется путем испускания возбужденным ядром квантов электромагнитного излучения, получившего название  $\gamma$ -квантов, или  $\gamma$ -излучения.

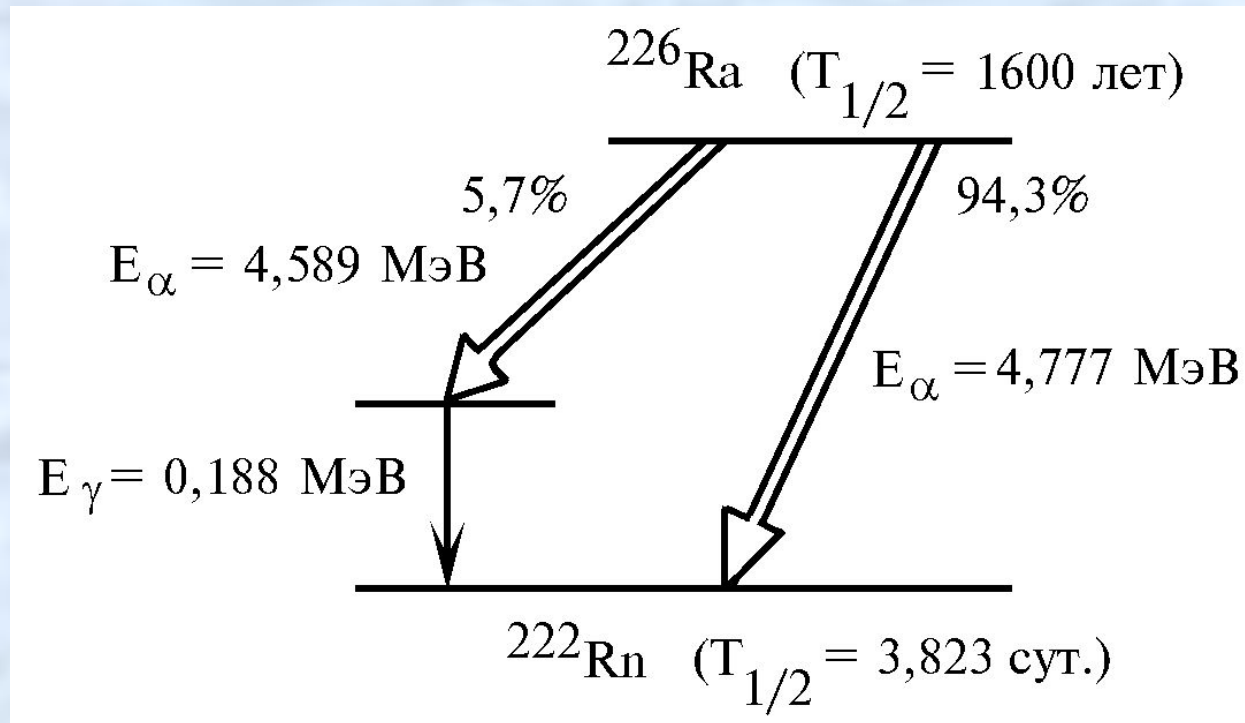
На графических схемах радиоактивного распада  $\gamma$ -излучение изображается в виде стрелки, направленной вертикально вниз.

Пример:

При  $\beta$ -распаде  $^{60}\text{Co}$  (является основным источником  $\gamma$ -излучения, применяемым в технике и медицине) излучаются  $\gamma$ -кванты с энергиями 1,17 и 1,33 МэВ.



# Пример излучения $\gamma$ -квантов при $\alpha$ -распаде





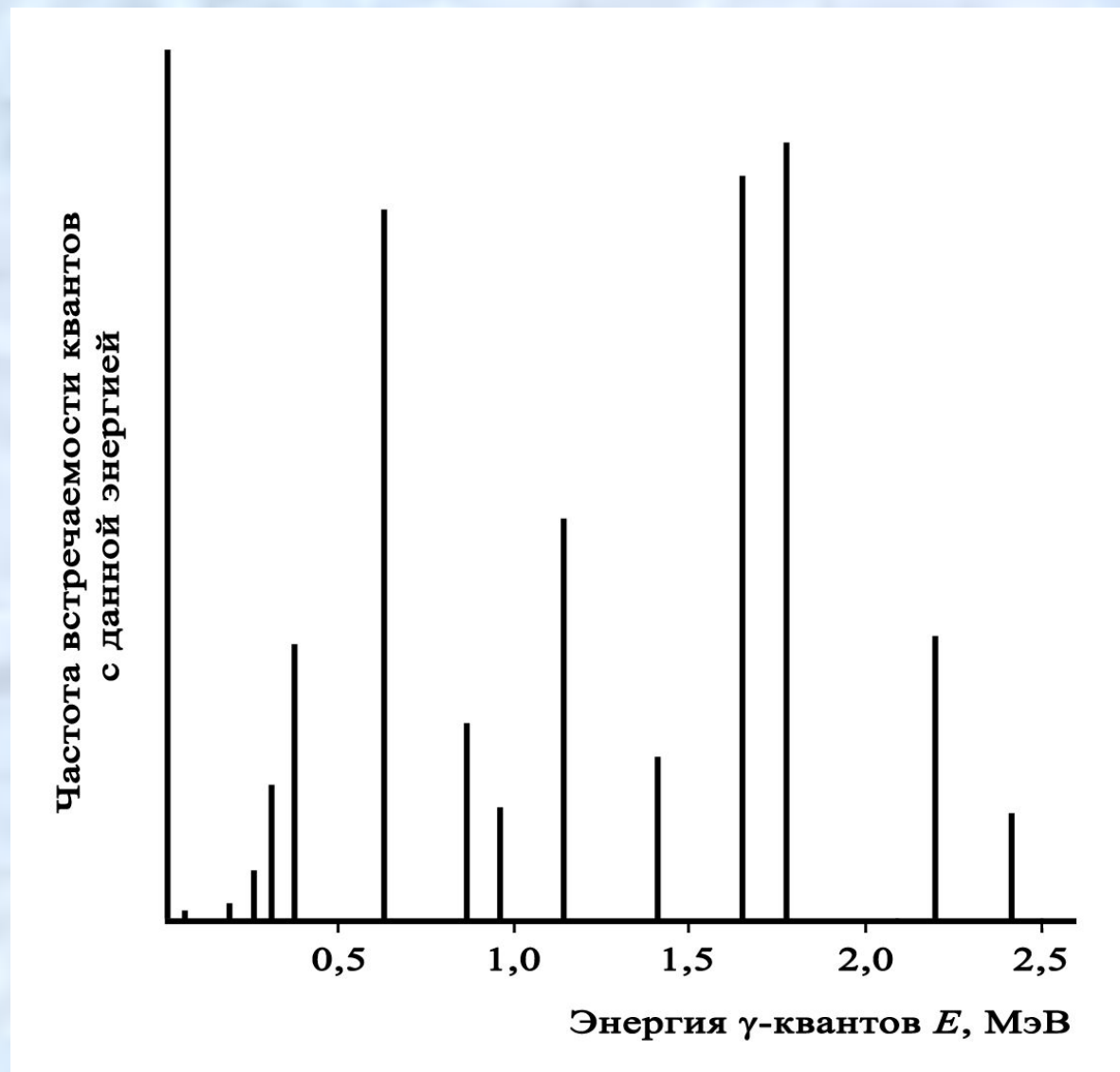
# Энергетическая характеристика $\gamma$ -излучения

Энергия  $\gamma$ -квантов различных  $\gamma$ -излучателей варьирует в основном от 10 кэВ до 3 МэВ, но при некоторых ядерных реакциях может достигать 20 МэВ.

Спектр  $\gamma$ -излучения (т.е. зависимость частоты встречаемости квантов от их энергии) является линейчатым (дискретным), т.е. состоит из дискретных линий. Объясняется это тем, что ядра могут находиться только в определенных энергетических состояниях, и переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно.

$\gamma$ -Излучатели редко имеют одну линию в спектре  $\gamma$ -излучения (т.е. редко являются моноэнергетическими, или монохроматическими) и обычно характеризуются определенным набором линий.

# Энергетический спектр $\gamma$ -излучения



Энергетический спектр  $\gamma$ -излучения  $^{226}\text{Ra}$

# **γ-кванты образуются при аннигиляции частицы и античастицы**

**АННИГИЛЯЦИЯ ПАРЫ** (от лат. annihilation — уничтожение, исчезновение) — один из видов превращений элементарных частиц, который происходит при столкновении частицы с античастицей и приводит к их взаимному исчезновению с образованием квантов электромагнитного излучения (также называемых γ-квантами, или γ-излучением).

Например при аннигиляции пары электрон—позитрон образуются обычно 2 γ-кванта (разлетающихся в противоположных направлениях), энергия каждого из которых составляет 0,511 МэВ, что является энергетическим эквивалентом массы позитрона и электрона.

# Рентгеновское излучение

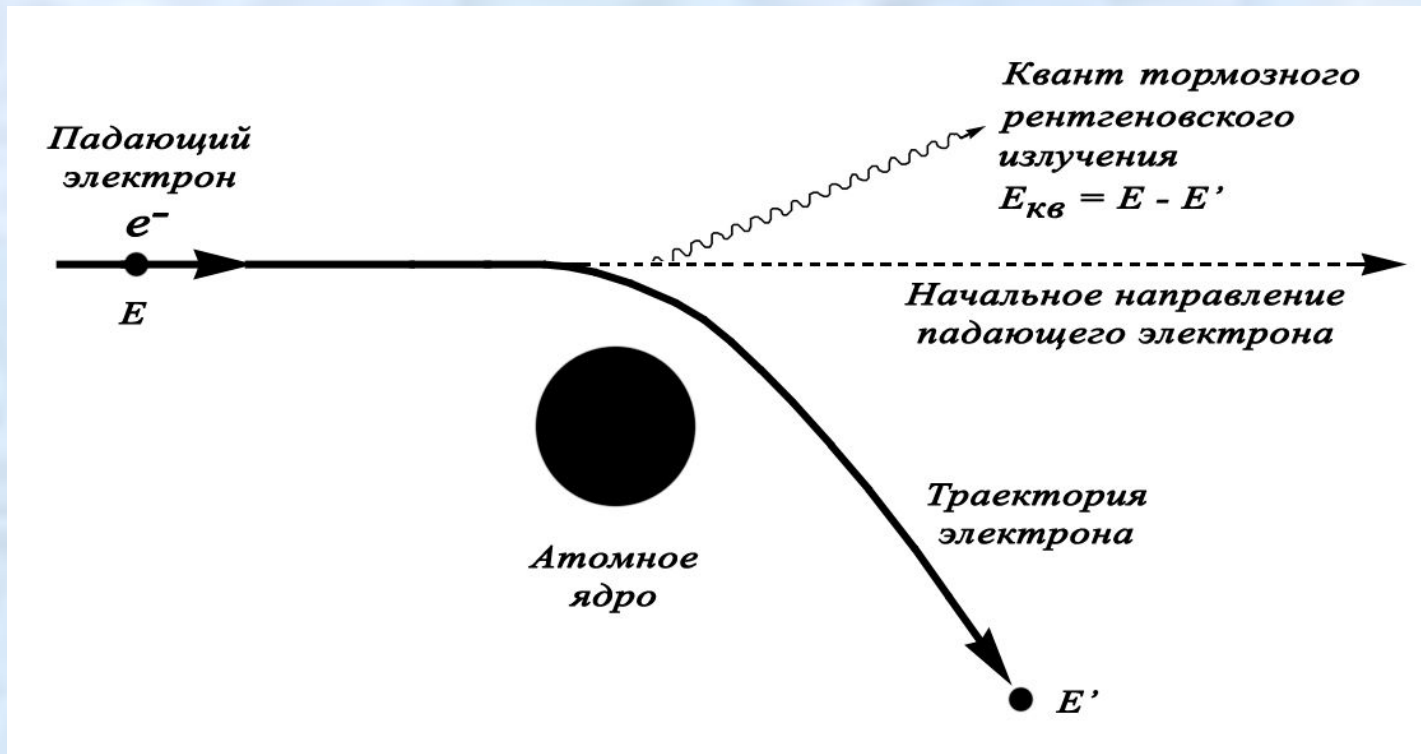
Рентгеновское излучение — электромагнитное излучение, возникающее:

1) при торможении быстрых электронов в поле ядра атома вещества (это т.н. тормозное рентгеновское излучение; оно имеет непрерывный спектр);

2) при переходах электронов с внешней оболочки (т.е. с более высокой по энергии оболочки) на имеющуюся вакансию на внутренней оболочке. Это т.н. характеристическое рентгеновское излучение; оно имеет линейчатый спектр. Энергия кванта характеристического рентгеновского излучения равна разности между энергиями, характерными для этих двух электронных оболочек.

# Тормозное рентгеновское излучение

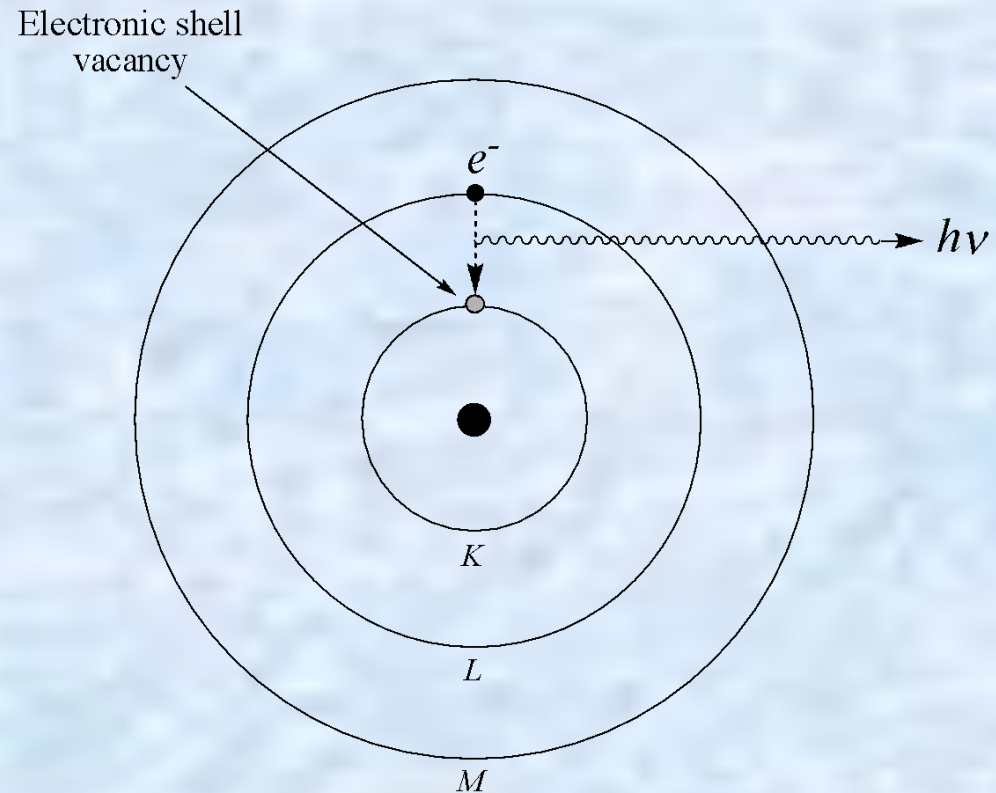
Падающий электрон с кинетической энергией  $E$ , пролетая вблизи ядра, испытывает действие силы притяжения к ядру. Траектория электрона претерпевает изменение направления, а сам электрон при этом тормозится, в результате чего происходит испускание кванта ЭМИ, энергия которого равна разности между кинетическими энергиями падающего электрона до попадания в электрическое поле этого ядра и после выходя из него ( $E_{\text{кв}} = E - E'$ ).



# Характеристическое рентгеновское излучение

Если на внутренней электронной орбите (оболочке) имеется вакансия, то электрон, находящийся на более высокой электронной орбите (оболочке), переходит на эту вакансию.

Его избыточная энергия сбрасывается в виде кванта ЭМИ, получившего название "характеристическое рентгеновское излучение".



# При каких событиях появляется вакансия на внутренней электронной оболочке?

Вакансия на внутренней оболочке появляется:

- 1) при действии проходящего через вещество электрона, когда он выбивает орбитальный электрон с одной из внутренних электронных оболочек атома;
- 2) при действии проходящего через вещество гамма-кванта, когда он выбивает орбитальный электрон с одной из внутренних электронных оболочек атома;
- 3) при одном из видов  $\beta$ -распада — т.н. электронном захвате, когда ядром атома захватывается орбитальный электрон (чаще всего с *K*-оболочки, реже с *L*-оболочки).

# Электронный захват

Электронный захват рассматривают как один из видов  $\beta$ -распада или как самостоятельный вид радиоактивного распада.

При электронном захвате атомным ядром захватывается орбитальный электрон, чаще всего с ближайшей к ядру  $K$ -оболочки ( $K$ -захват), или в 100 раз реже — с  $L$ -оболочки ( $L$ -захват). Захваченный электрон взаимодействует с протоном с образованием нейтрона и нейтрино:

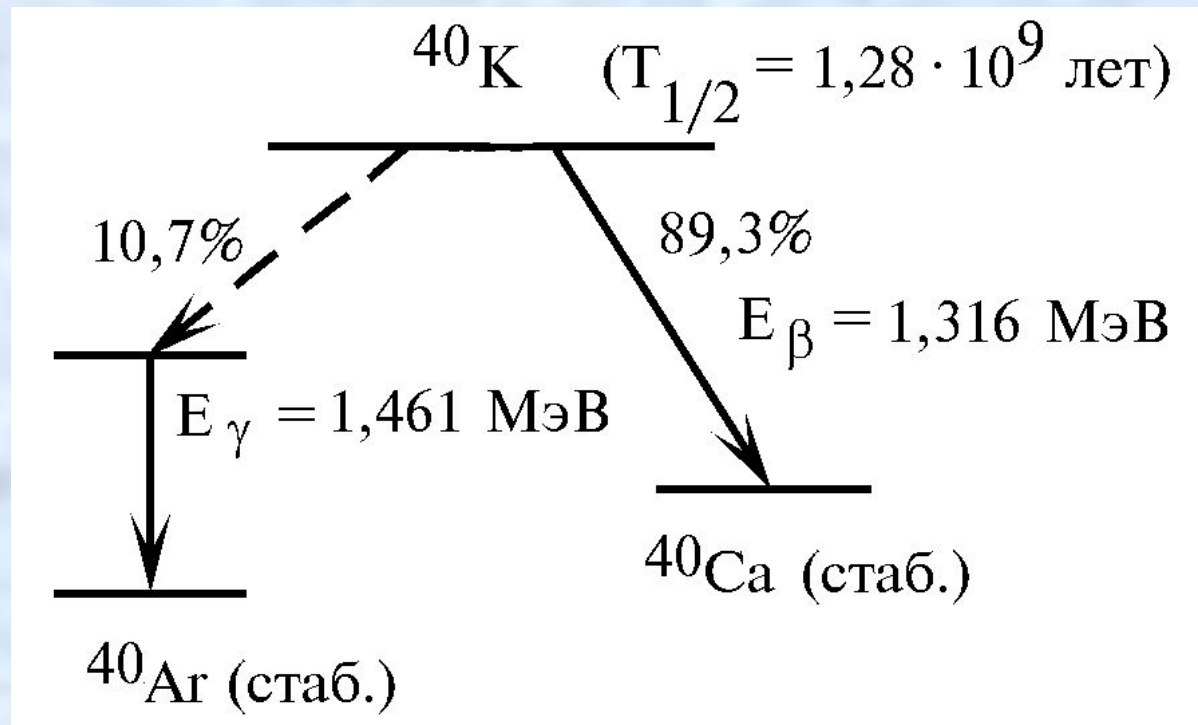


На графической схеме электронный захват изображается пунктирной стрелкой, направленной косо вниз влево. Образующийся при этом нуклид стоит в периодической системе на один номер ближе к ее началу, чем исходный радиоактивный нуклид ( $Z'=Z-1$ ;  $A'=A$ ).





# Пример электронного захвата



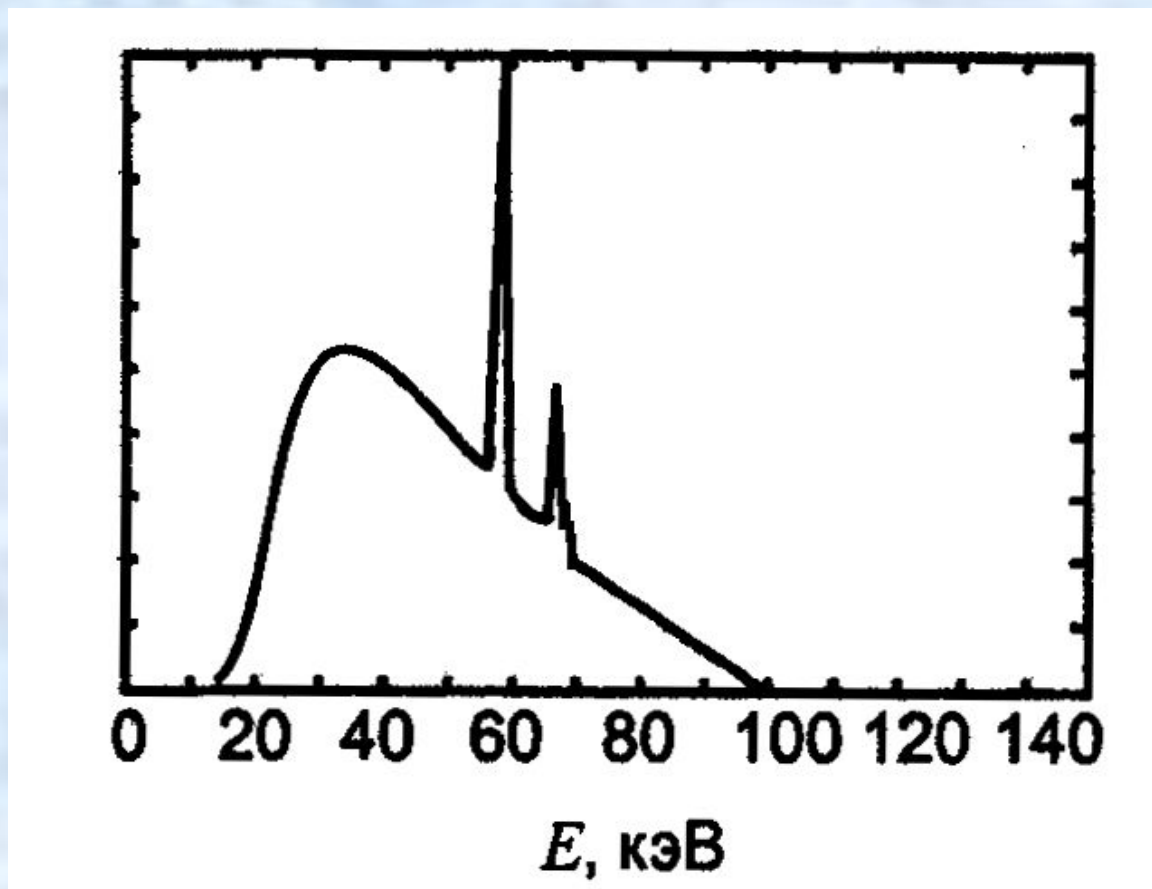
# Энергетическая характеристика рентгеновского излучения

Энергия рентгеновского излучения обычно лежит в пределах от 0,12 кэВ до нескольких сотен кэВ .

В медицинских рентгеновских трубках обычно не превышает 250 кэВ.

Но на современных ускорителях может генерироваться тормозное рентгеновское излучение с энергией до нескольких сотен и даже тысяч МэВ.

# Энергетический спектр рентгеновского излучения от рентгеновской трубки



Тормозное рентгеновское излучение имеет непрерывный энергетический спектр, а характеристическое рентгеновское излучение – линейчатый энергетический спектр.

# Граница между ионизирующим и неионизирующим ЭМИ

В качестве границы между ионизирующим и неионизирующим ЭМИ принимают значение энергии кванта, равное 12,5 эВ (что соответствует энергии кванта, необходимой для ионизации молекулы  $H_2O$ )

Поскольку 
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

где  $c$  – скорость света ( $3 \cdot 10^8$  м/с),

$h$  – постоянная Планка ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с),

1 Дж =  $6,24 \cdot 10^{18}$  эВ,

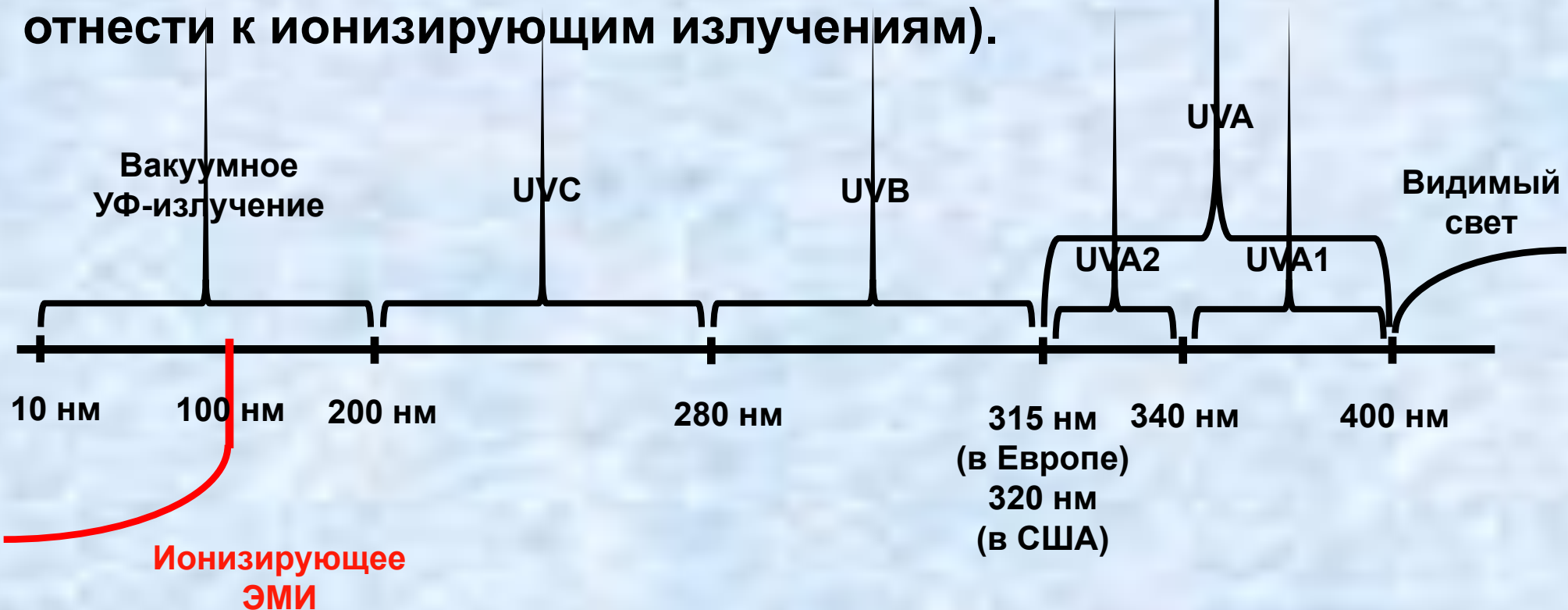
получаем, что значению энергии кванта 12,5 эВ соответствует длина волны  $\lambda \approx 100$  нм:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{12,5 \text{ эВ} \cdot 6,24 \cdot 10^{18} \frac{\text{эВ}}{\text{Дж}}} \approx 10^{-7} \text{ м} = 100 \text{ нм}$$

# УФ-излучение

УФ-излучение — это ЭМИ в диапазоне от 10 нм до 400 нм.

Т.о., исходя из того, что 100 нм – это граница между ионизирующим и неионизирующим ЭМИ, следует, что низковолновую область УФ-излучения (10-100 нм) можно отнести к ионизирующим излучениям).



## **Две важнейшие характеристики ионизирующих излучений**

**Очень важными характеристиками ионизирующих излучений, в значительной степени определяющими их биологические эффекты, являются:**

- 1) Проникающая способность (пробег)**
- 2) Линейная передача энергии (или связанная с ней линейная плотность ионизации).**

# Понятие «пробега» для корпускулярного излучения

Для характеристики проникающей способности корпускулярных ионизирующих излучений используют понятие «пробег».

Под пробегом ионизирующей частицы в какой-либо среде понимают минимальную толщину слоя этой среды, которая полностью задерживает (т.е. поглощает) данные частицы.

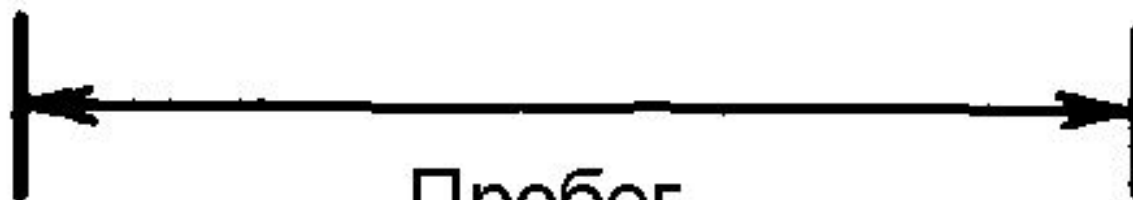
Пробег частицы зависит от заряда, массы, начальной энергии и среды, в которой происходит движение.

Траектория, по которой ионизирующая частица пролетает через вещество, может быть либо прямолинейной (в случае  $\alpha$ -частиц), либо сильно изломанной (в случае  $\beta$ -частиц траектория в 1,5-4 раза длиннее пробега).

$\beta$ -Частицы, обладая зарядом и очень малой массой, легко отклоняются от своего первоначального направления при прохождении через вещество, т.к. испытывают сильное взаимодействие с атомными ядрами и орбитальными электронами.

# Траектория и пробег для $\beta$ -частицы

Траектория



Пробег

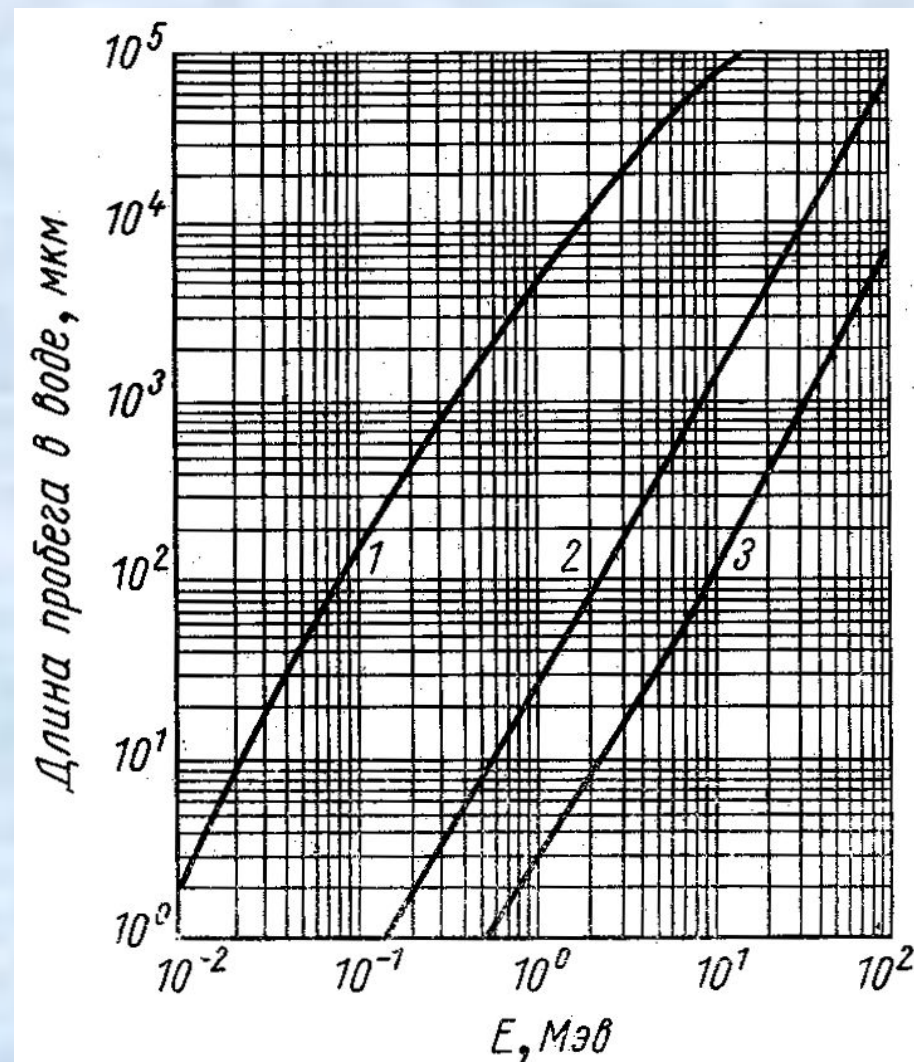


# Сравнение пробега у разных видов корпускулярных излучений

Корпускулярное ионизирующее излучение	Ориентировочные значения пробега (в воде или биологической ткани)
$\alpha$ -Излучение (10 МэВ)	$\approx$ мм 0,1
Протонное излучение (10 МэВ)	$\approx$ 1 мм
$\beta^-$ -Излучение (1 МэВ)	$\approx$ 5 мм
$\beta^+$ -Излучение (1 МэВ) (позитрон обычно аннигилирует в конце пробега)	$\approx$ 5 мм

# Зависимость длины пробега заряженных частиц в воде от их энергии

Более точные значения длины пробега заряженных частиц (электронов, протонов и  $\alpha$ -частиц) в воде при разных значениях энергии можно рассчитать из специальных графиков.



1 — электроны, 2 — протоны и 3 —  $\alpha$ -частицы.

# Проникающая способность ионизирующих электромагнитных излучений

Проникающая способность  $\gamma$ -излучения и рентгеновского излучения значительно выше, чем у корпускулярных излучений, представляющих потоки заряженных частиц (т.е.  $\alpha$ -излучения,  $\beta$ -излучения, протонного излучения).

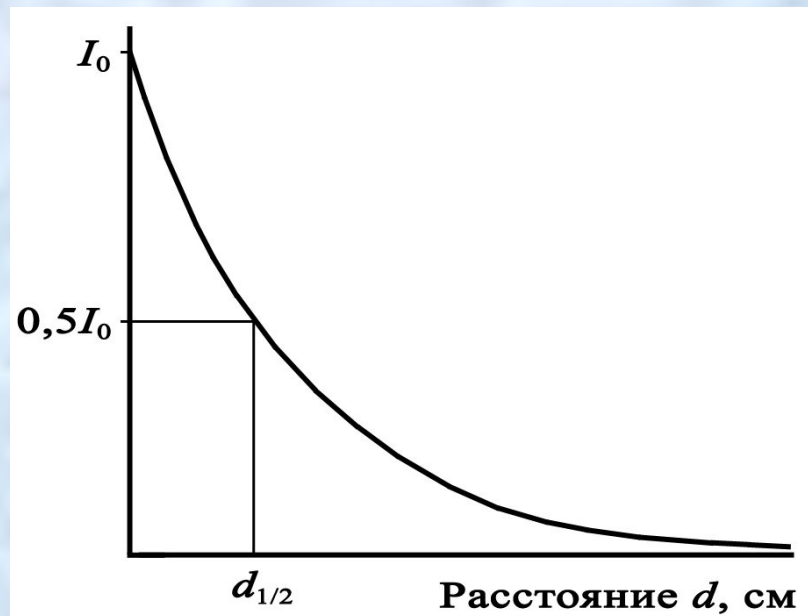
Понятие пробега для характеристики проникающей способности ЭМИ не может быть использовано, т.к. интенсивность пучка ионизирующего ЭМИ по мере прохождения через вещество ослабляется по экспоненциальному закону:

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

где  $I_0$  – исходная интенсивность (поток энергии),

$I$  – интенсивность после прохождения  $d$  см вещества,

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления.



# Сравнение проникающей способности для рентгеновского излучения и $\gamma$ -излучения $^{60}\text{Co}$

Проникающую способность рентгеновского и  $\gamma$ -излучения можно охарактеризовать, используя понятие «слой половинного ослабления».

Слой половинного ослабления – это слой вещества, при прохождении через который интенсивность излучения снижается в 2 раза.

Учитывая, что нас интересует прохождение этих видов ЭМИ в биологической ткани, очень удобно и наглядно оценивать их проникающую способность по слою половинного ослабления в воде.

Электромагнитное ионизирующее излучение	Слой половинного ослабления в воде $d_{1/2}$
$\gamma$ -Излучение $^{60}\text{Co}$ (1,17 и 1,34 МэВ)	$\approx 10$ см
Рентгеновское излучение медицинских рентгеновских трубок (180-250 кэВ)	$\approx 5,5$ см

# **Взаимодействие ионизирующего ЭМИ с веществом**

**Снижение интенсивности ионизирующего ЭМИ при прохождении через вещество обусловлено потерей энергии излучения за счёт трёх эффектов:**

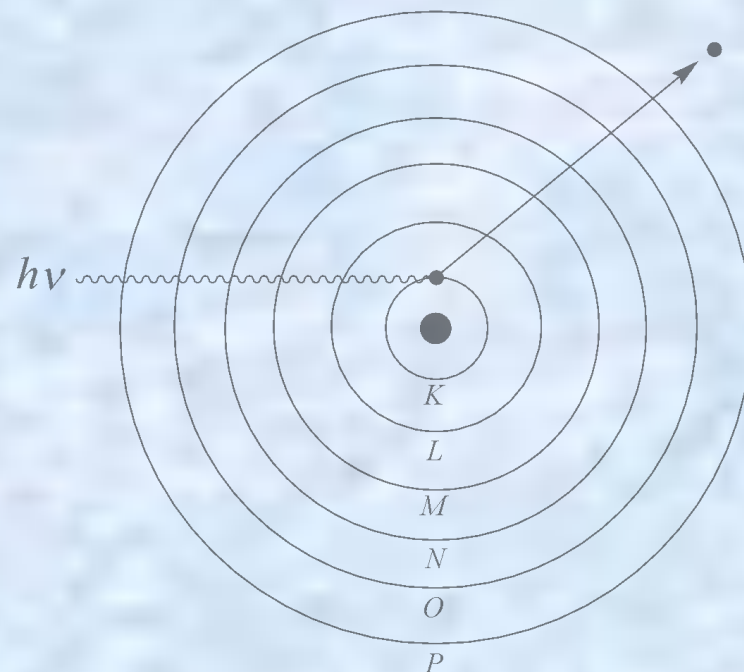
- 1) фотоэлектрического эффекта,**
- 2) комптоновского эффекта**
- 3) эффекта образования электронно-позитронных пар.**

# Фотоэффект

При *фотоэлектрическом эффекте* энергия падающего кванта полностью передается электрону, находящемуся на одной из внутренних электронных оболочек (K- или L-оболочке) атома. В результате появляются свободные электроны (т.н. фотоэлектроны), обладающие кинетической энергией  $E_e$ , величина которой равна энергии падающего кванта излучения  $h\nu$  за вычетом энергии связи электрона  $E_{\text{связи}}$ :

$$E_{\text{связи}} = h\nu - E$$

Фотоэлектрон, ассоциируясь с каким-либо из нейтральных атомов, образует отрицательный ион.



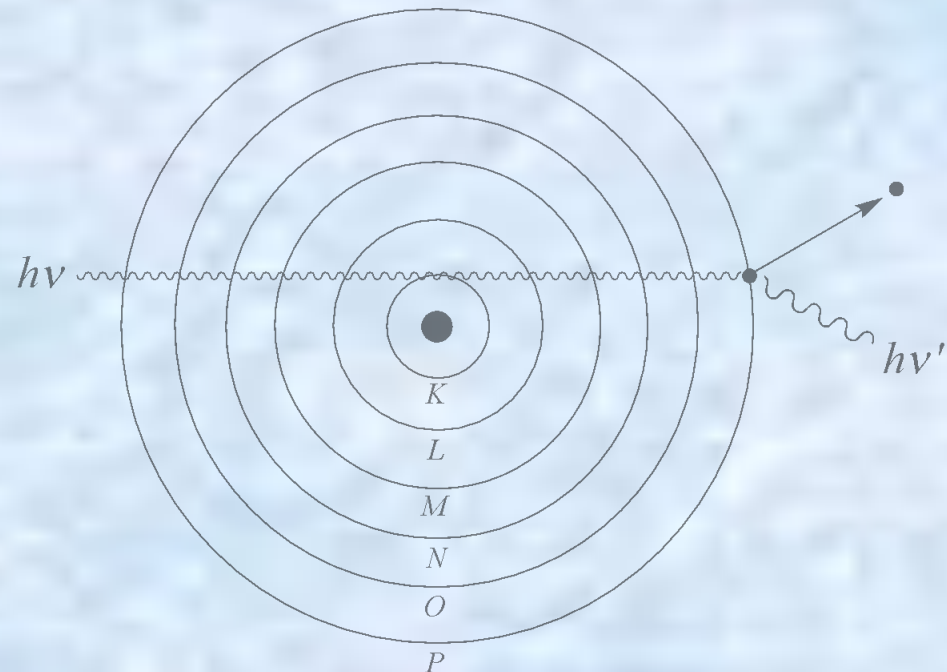
# Комптон-эффект

При *комптоновском эффекте* квант ЭМИ, сталкиваясь с электроном передает ему не всю свою энергию, а только часть её и после соударения изменяет своё направление движения. Комптоновский эффект происходит только на электронах внешних электронных оболочек атома (для которых  $E_{\text{связи}} \ll h\nu$ ).

Образовавшийся свободный электрон (т.н. электрон отдачи, или электрон рассеяния, или комптоновский электрон) имеет значительную кинетическую энергию

$$E_{\text{связи}} = h\nu - h\nu' - E \approx h\nu - h\nu'$$

и растрачивают её на дальнейшую ионизацию других атомов (вторичная ионизация).

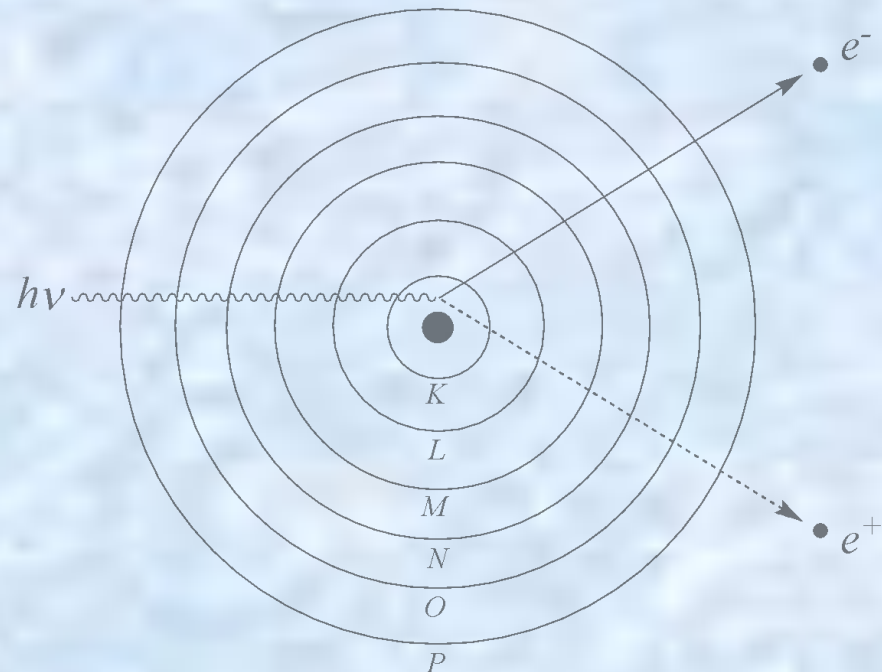


# Эффект образования пары «электрон-позитрон»

Часть квантов ЭМИ с энергией не ниже 1,022 МэВ, проходя через вещество вблизи атомного ядра, превращается под действием сильного электрического поля ядра в пару «электрон-позитрон». Таким образом, происходит переход одной формы материи (ЭМИ) в другую (вещество).

Избыточная ( $> 1,022$  МэВ) энергия кванта ЭМИ распределяется между образовавшимися электроном и позитроном и растрачивается ими на ионизацию и возбуждение встречных атомов.

Позитрон, растратив всю энергию и встретившись со свободным электроном, аннигилирует (т.е. исчезает). При этом образуются 2 кванта, разлетающиеся в противоположные стороны, каждый с энергией 0,511 МэВ.





# Соотношение фотоэффекта, комптон-эффекта и процесса образования пар



**1 – фотоэффект, 2 – комптон-эффект,  
3 – процесс образования пар**

# Линейная передача энергии (ЛПЭ)

ЛПЭ определяется как отношение полной энергии  $dE$ , переданной веществу частицей вследствие столкновений на пути  $dL$ , к длине этого пути:  $ЛПЭ = dE / dL$ . Обычно измеряют в кэВ на мкм пути.

Линейная плотность ионизации (ЛПИ) – определяется как число пар ионов, образовавшихся в веществе при прохождении через него ионизирующей частицы на мкм пути.

$$ЛПИ = ЛПЭ / 34,$$

где 34 эВ – средняя энергия необходимая для образования пары ионов.

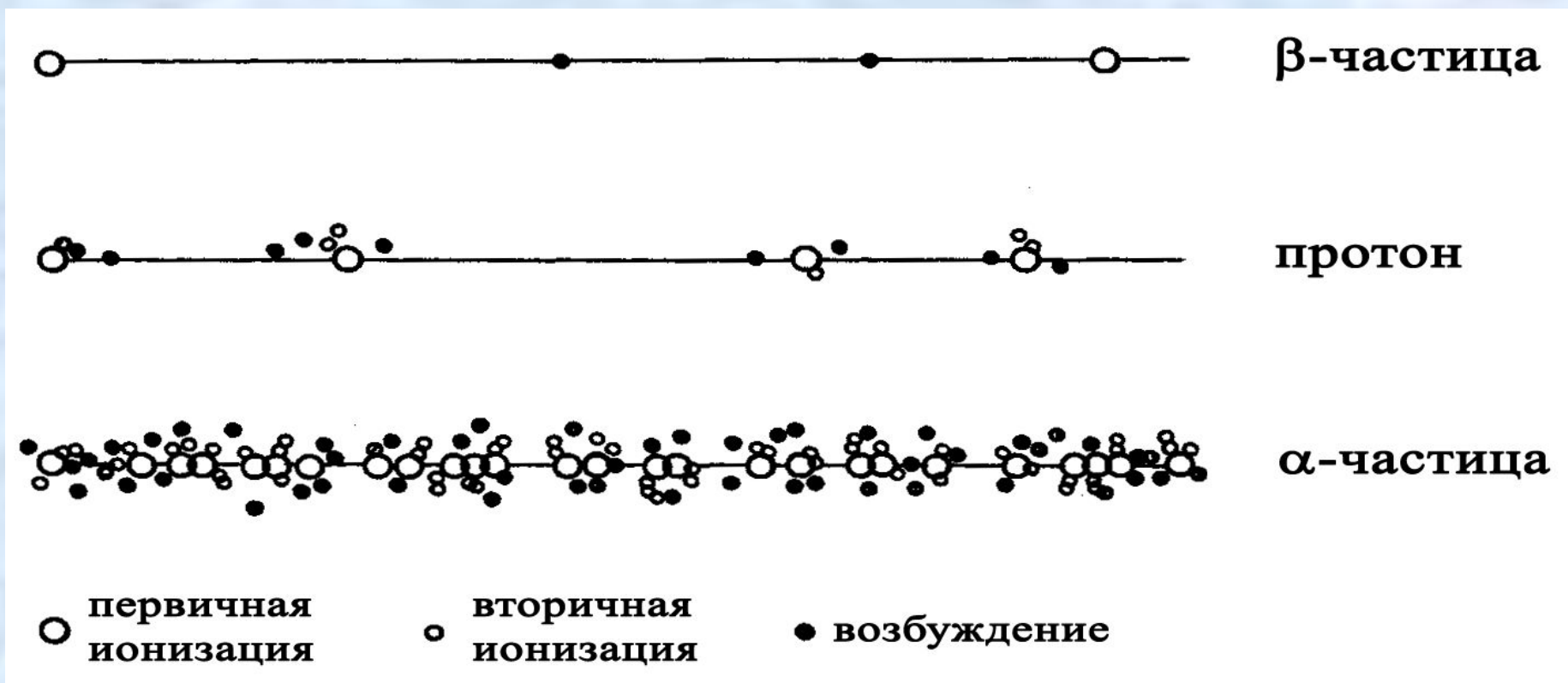
# Граница между редкоионизирующими и плотноионизирующими излучениями

Все ионизирующие излучения подразделяют на:

редкоионизирующие излучения (ЛПЭ < 10 кэВ/мкм в воде)

плотноионизирующие излучения (ЛПЭ > 10 кэВ/мкм в воде)

# Наглядное сравнение плотности расположения актов первичной ионизации, вторичной ионизации и возбуждения на коротком участке траектории для редко- и плотноионизирующих заряженных частиц



Вид ионизирующего излучения	ЛПЭ, кэВ/мкм (в воде)	ЛПИ, пар ионов/мкм (в воде)
γ-Излучение <sup>60</sup> Со	0.2	6
Рентгеновское излучение 250 кэВ	2	60
β-Излучение 1 МэВ	0.2	5
Протоны 10 МэВ	4.7	140
Протоны 150 МэВ	0.5	15
α-Излучение 1 МэВ	264	7800
α-Излучение 2.5 МэВ	166	4900
α-Излучение 3 МэВ	135	4000
α-Излучение 6 МэВ	82	2400
α-Излучение 9 МэВ	60	1770
α-Излучение 10 МэВ	56	1650

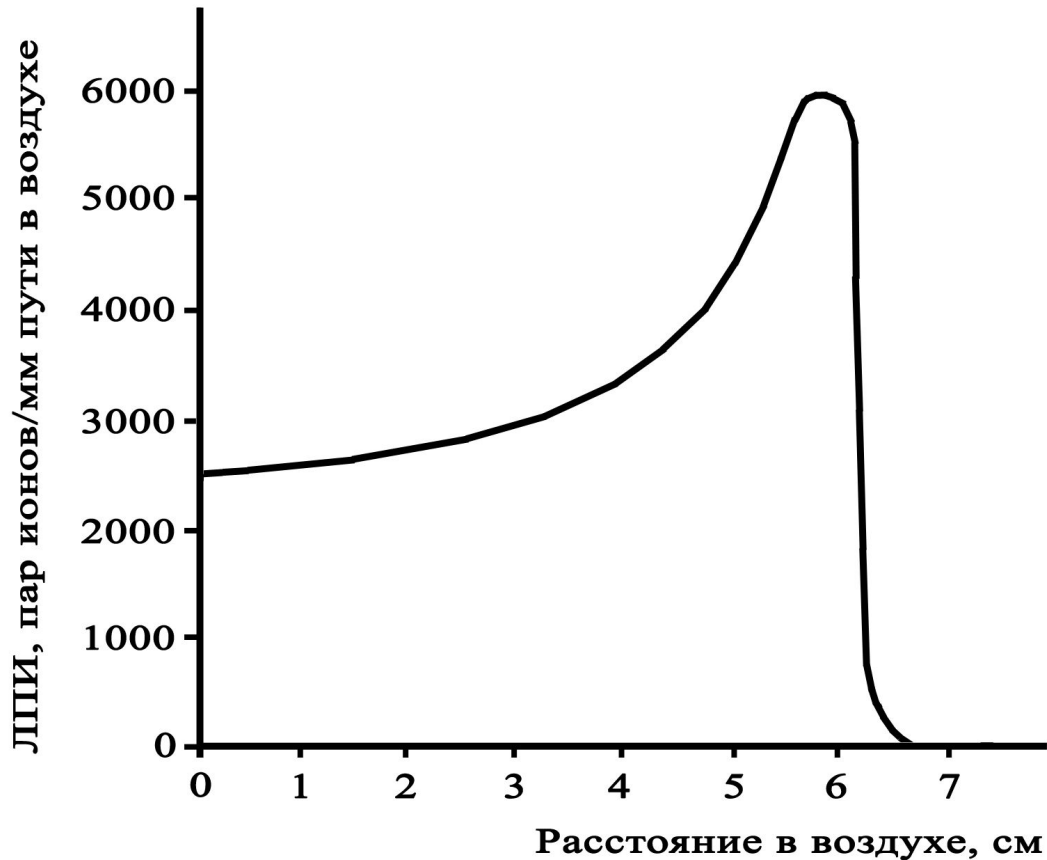
**Обращаю внимание, что с увеличением энергии ионизирующей частицы (кванта):**

**1) проникающая способность излучения возрастает,**

**2) ЛПЭ уменьшается (что четко видно из вышеприведенной таблицы для  $\alpha$ -излучения).**

# Кривая Брэгга

Особенно резко ЛПЭ (и ЛПИ) возрастает при прохождении через вещество тяжелых заряженных частиц.



Это т.н. кривая Брэгга (и пик Брэгга) для  $\alpha$ -излучения в воздухе.

# Заключение

Проникающая способность и линейная передача энергии (ЛПЭ) являются очень важными характеристиками ионизирующих излучений и, фактически, определяют степень биологической эффективности (в частности, опасности) разных видов ионизирующих излучений в определенных условиях их воздействия на живой организм.

В последующих лекциях мы будем постоянно сравнивать биологические эффекты излучений, обладающих:

- 1) различной проникающей способностью или
- 2) различной линейной передачей энергии (ЛПЭ).



# **Понятие дозы ионизирующего излучения**

# Понятие ДОЗЫ

В широком понятии слова термин «ДОЗА» означает определенное точно отмеренное количество чего-либо – вещества, лекарства, излучения и т.п. (происходит от греч. dósis — порция, приём).

# **Дозы ионизирующего излучения**

**Понятие «ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ» является одним из основных понятий в радиационных исследованиях, включая радиационную биологию, радиационную экологию, радиационную гигиену, радиационную медицину, радиационный контроль и т.д.**

**Без использования понятия «дозы ионизирующего излучения» невозможно количественное описание каких-либо биологических эффектов ионизирующего излучения.**

# Основные виды дозы ионизирующего излучения

Различают 4 основные вида дозы ионизирующего излучения:

**Экспозиционная доза**

**Поглощенная доза**

**Эквивалентная доза**

**Эффективная доза**

**Экспозиционная доза (рус.) –  
Exposure (англ.)**

# Экспозиционная доза

ЭКСПОЗИЦИОННАЯ ДОЗА ( $X$ ) ионизирующего излучения — количественная характеристика поля  $\gamma$ - и рентгеновского излучений, основанная на их ионизирующем действии в воздухе.

Представляет собой отношение суммарного заряда ионов одного знака  $dQ$ , образующихся под действием электромагнитного ионизирующего излучения в элементарном объеме воздуха\*, к массе воздуха  $dm$  в этом объеме:

$$X = \frac{\overline{dQ}}{dm}$$

\*Элементарный объем среды — это наименьший объем среды, который воспринимается как однородный.

**На что нужно обратить внимание в этом определении:**

**1. Экспозиционная доза – это характеристика ПОЛЯ излучения.**

**2. Экспозиционная доза может применяться только для γ- и РЕНТГЕНОВСКОГО излучения (т.е. только для электромагнитных ионизирующих излучений).**

**3. Экспозиционная доза характеризует ионизирующее действие указанных ионизирующих излучений в ВОЗДУХЕ.**

# Единицы экспозиционной дозы

Единица  
в системе СИ

Внесистемная  
единица

кулон/кг (Кл/кг)  
coulomb/kg (C/kg)

рентген (R)  
roentgen (R)

За 1 R принимают такое количество  $\gamma$ - или рентгеновского излучения, которое создает  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов в  $1 \text{ см}^3$  атмосферного воздуха (т.е. в  $0,001293 \text{ г}$  воздуха при  $0^\circ \text{C}$  и давлении  $760 \text{ мм рт.ст.}$ ).  
Единица введена в 1928 г.

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$$



**Официальное использование понятия  
«экспозиционной дозы» прекращено с 1 января  
1990 г.**

**Тем не менее, понятие «экспозиционная доза» и ее  
внесистемная единица «рентген» до сих пор  
продолжают довольно часто использоваться и в  
СМИ, и в научно-популярной, и в научной  
литературе, а иногда и в нормативных документах  
(например, в методических указаниях).**

**В настоящее время основной дозиметрической величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза.**

**Поглощенная доза (*рус.*) –  
Absorbed dose (*англ.*)**

# Поглощенная доза

ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА ( $D$ ) ионизирующего излучения — отношение средней энергии  $de$ , переданной ионизирующим излучением (любого вида) веществу, находящемуся в элементарном объеме\*, к массе  $dm$  вещества в этом объеме:

$$D = \frac{\overline{de}}{dm}$$

\*Элементарный объем среды — это наименьший объем среды, который воспринимается как однородный.

**В отличие от экспозиционной дозы понятие ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ распространяется:**

- 1) не только на  $\gamma$ - и рентгеновское излучение, но и на любой другой вид ионизирующего излучения;**
- 2) не только на воздух, и на любые другие материалы.**

# Единицы поглощенной дозы

Единица  
в системе СИ

Дж/кг  
joule/kg (J/kg)

– единица,

получившая специальное  
наименование

грей (Гр)  
gray (Gy)

Единица введена в 1975 г.

Внесистемная  
единица

рад  
rad

(от англ.

*radiation absorbed dose*)

1 рад = 100 эрг/г.

Единица введена в 1953 г.

1 Гр = 100 рад

# Льюис Харольд Грей (1905-1965)

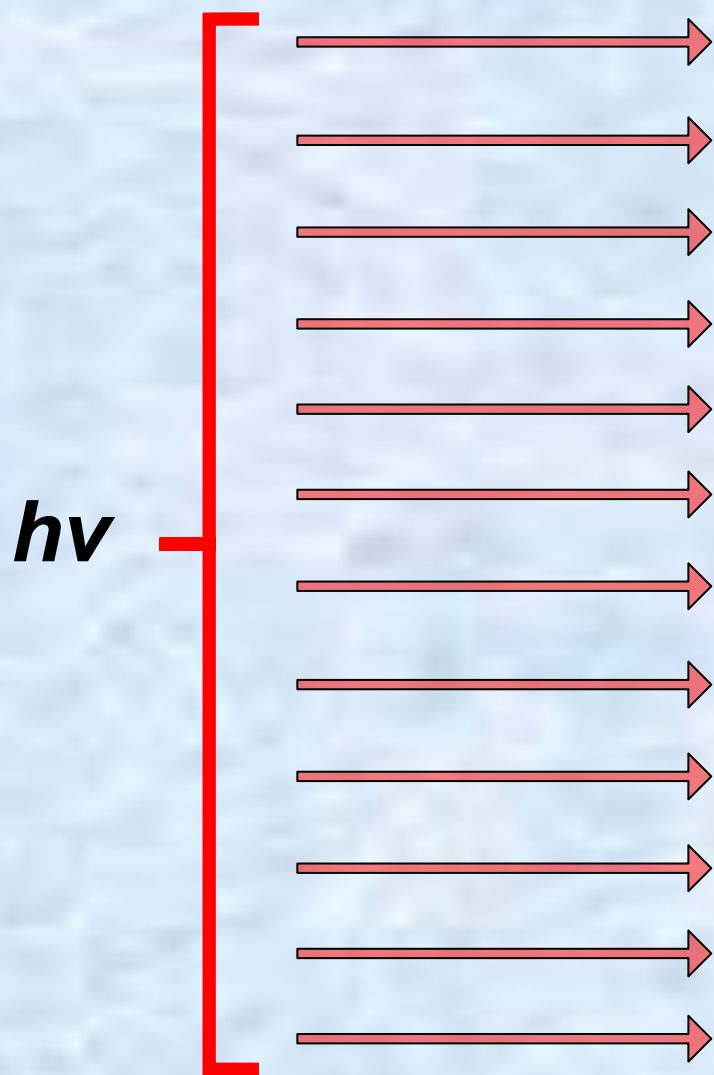


**Льюис Харольд Грей (Грэй) (Louis Harold Gray, 1905-1965) – известный английский физик, работавший в области радиационной физики, радиобиологии и радиационной медицины.**

**Внес большой вклад в становление дозиметрии ионизирующих излучений. Подробно исследовал кислородный эффект в радиобиологии (1952).**

**В его честь в 1975 г. названа единица измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения в Международной системе единиц (СИ) – грей (Гр).**

# Наглядная история о слоне и мышке, оказавшихся в мощном поле $\gamma$ -излучения





# **Кем лучше быть слоном или мышкой, попав в мощное $\gamma$ -поле?**

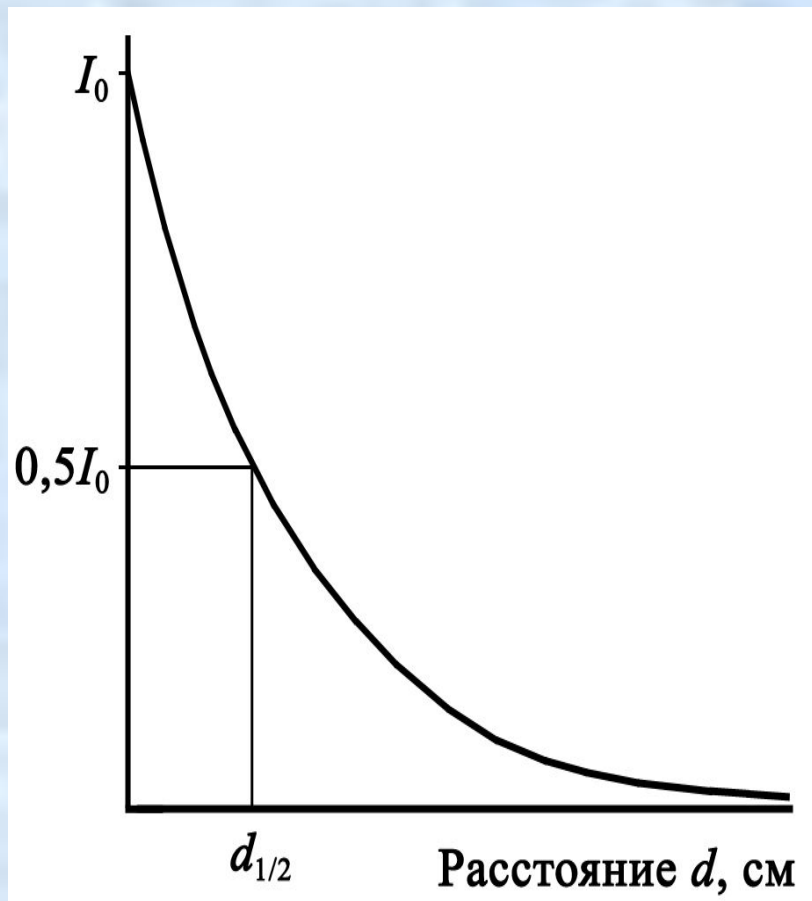
**Оба биологических объекта находятся в одном и том же поле  $\gamma$ -излучения (т.е. экспозиционная доза – одна и та же).**

**Ни один из биологических объектов не экранируется другим.**

**БУДУТ ЛИ ОТЛИЧАТЬСЯ ПОГЛОЩЕННЫЕ ДОЗЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ СЛОНОМ И МЫШКОЙ?**

**ЕСЛИ БУДУТ, ТО КТО ПОЛУЧИТ БОЛЬШУЮ ПОГЛОЩЕННУЮ ДОЗУ (СЛОН ИЛИ МЫШКА) И ПОЧЕМУ?**

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что интенсивность пучка ионизирующего ЭМИ по мере прохождения через вещество ослабляется по экспоненциальному закону:



Обращаю внимание на то, что в этом законе речь идет об интенсивности падающего (т.е. ПЕРВИЧНОГО ионизирующего ЭМИ). Однако, при прохождении первичного ионизирующего ЭМИ через вещество возникает ВТОРИЧНОЕ ионизирующее излучение.

Вторичное ионизирующее излучение включает как корпускулярное излучение, включающее поток электронов и позитронов (возникших в результате фото-эффекта, Комптон-эффекта и образования электрон-позитронных пар), так и ЭМИ (рентгеновское излучение – характеристическое и тормозное).

Поэтому ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА будет формироваться как первичным, так и вторичным излучениями, а зависимость поглощенной дозы от глубины проникновения излучения в вещество будет несколько отличаться от приведенной на этом слайде зависимости интенсивности пучка ионизирующего ЭМИ по мере прохождения через вещество.

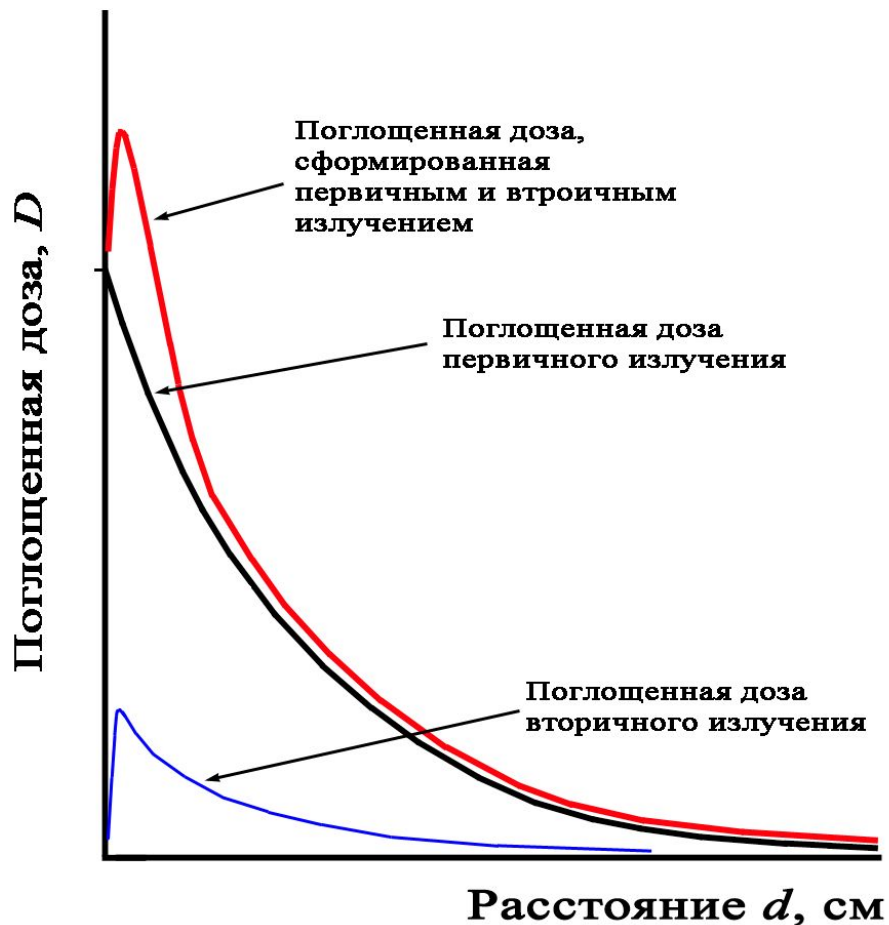
**Среди вторичных ионизирующих излучений наибольший вклад в формирование поглощенной дозы в биологической ткани вносят вторичные электроны, которые могут иметь энергию в диапазоне от 0 до значений, почти равных энергии первичных квантов ЭМИ.**

**Доля энергии, передаваемая вторичным электронам, зависит от энергии первичных квантов: чем выше энергия первичных квантов, тем выше доля энергии, передаваемой вторичным электронам. При энергии квантов 1 МэВ эта доля составляет примерно 40%, а при энергии квантов 20 МэВ – 70%.**

**На некотором расстоянии от поверхности (зависящем от энергии первичных квантов ионизирующего ЭМИ ) поглощенная доза достигает максимума. Расстояние от облучаемой поверхности до этого максимума приблизительно равно пробегу электронов в среде.**

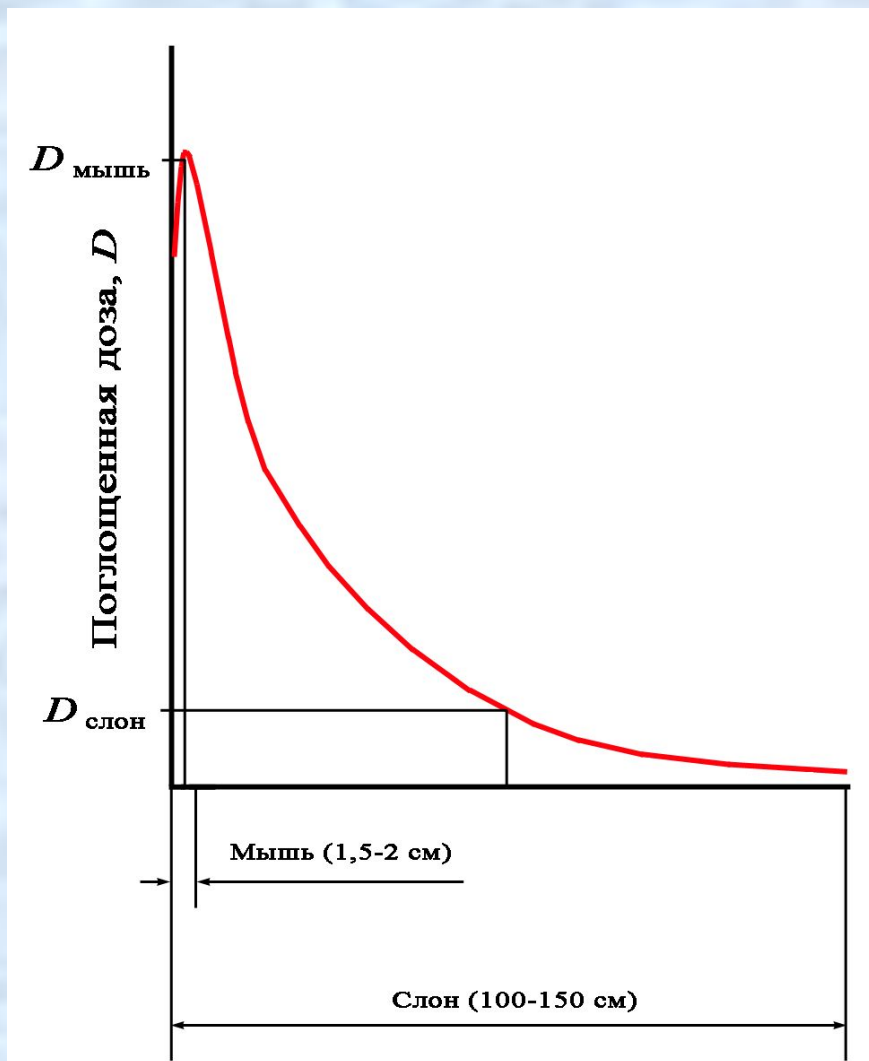
**В области от поверхности вещества до максимума поглощенной дозы число вторичных электронов возрастает. Начиная с области максимума поглощенной дозы и глубже в вещество число поглощенных веществом и вновь появившихся свободных электронов становится приблизительно одинаковым (эта область носит название области электронного равновесия). При этом с ростом глубины проникновения пучка квантов ЭМИ их энергия и число уменьшаются, что приводит к уменьшению поглощенной дозы.**

**Зависимость поглощенной дозы, сформированной первичным пучком ионизирующего ЭМИ и возникшим вторичным ионизирующим излучением, от глубины проникновения излучения в вещество будет выглядеть следующим образом:**



Расстояние от поверхности до максимума поглощенной дозы варьирует от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

Возвращаемся к слону и мышке:



Как видим из рисунка, усредненная по телу поглощенная доза для мышки будет гораздо выше, чем для слона.

Очень часто на практике возникает необходимость рассчитать ПОГЛОЩЕННУЮ дозу, полученную каким-то биологическим объектом, зная ЭКСПОЗИЦИОННУЮ дозу.

Простого перехода от экспозиционной дозы к поглощенной дозе в общем виде не существует. Это связано:

- 1) с разными геометрическими размерами облучаемых биологических объектов (как в вышеприведенном примере со слоном и мышкой),
- 2) с их возможной различной ориентацией по отношению к источнику ионизирующего ЭМИ,
- 3) с различным спектральным составом ЭМИ.

Однако, ориентировочно поглощенную дозу ионизирующего ЭМИ при общем облучении биологического объекта (т.е. при облучении всего тела) все же можно оценить исходя из следующего соотношения:

$$D = fX,$$

где  $D$  – поглощенная доза (в радах) в биологическом объекте,

$X$  – экспозиционная доза (в рентгенах),

$f$  – переводной коэффициент, равный:

0,93 (или 1) – для мышей и других биообъектов такого же или меньшего размера;

0,5 – для человека (хотя часто также используют значение 1, что, конечно, совершенно неверно).

**Переходим к понятию  
эквивалентной дозы**

**Эквивалентная доза (рус.) –  
Equivalent dose (англ.)**



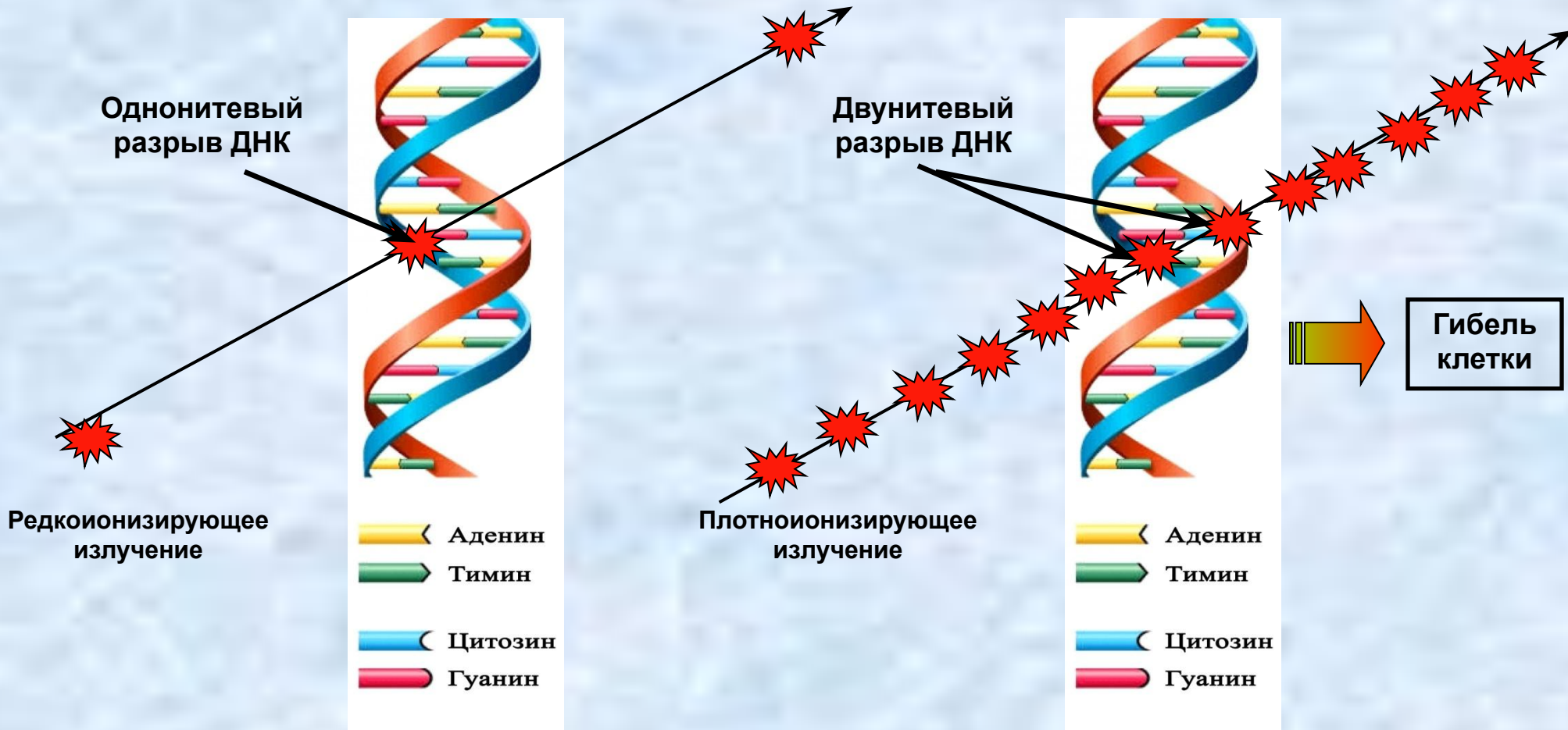
# **Биологический эффект ионизирующего излучения зависит не только от поглощенной дозы, но и от вида ионизирующего излучения**

Многочисленные исследования показали, что различные виды ИИ даже при одинаковых поглощенных дозах вызывают неодинаковый по величине биологический эффект.

Это связано с тем, что величина поглощенной дозы показывает лишь усредненное количество энергии, переданной облучаемому объекту.

Для наступления же какого-либо эффекта на клеточном и макромолекулярном уровне (например, в макромолекулах ДНК), как оказалось, очень важное значение имеет плотность передачи энергии (т.е. актов ионизации) в микрообъемах вещества, расположенных вдоль трека ионизирующей частицы, что характеризуется величиной **ЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ (ЛПЭ)**.

# Пример с радиационным повреждением ДНК



Однонитевый разрыв ДНК может быть легко репарирован при наличии в клетке репарационных ферментных систем, способных восстанавливать поврежденную нить ДНК, используя в качестве матрицы неповрежденную нить

Двунитевый разрыв ДНК не может быть правильно репарирован даже при наличии в клетке репарационных ферментных систем, т.к. вторая нить, которая могла бы служить матрицей, также повреждена

# Относительная биологическая эффективность разных видов ИИ

Для количественного сравнения биологической эффективности разных видов ионизирующих излучений используют понятие «относительной биологической эффективности» (ОБЭ).

ОБЭ рассчитывают по формуле:

$$\text{ОБЭ} = \frac{\text{поглощенная доза, необходимая для получения данного биологического эффекта при воздействии стандартного ИИ}}{\text{поглощенная доза исследуемого ИИ, необходимая для получения такого же биологического эффекта}}$$

В качестве стандартного ИИ используют рентгеновское излучение с граничной энергией квантов 200 кэВ или  $\gamma$ -излучение  $^{60}\text{Co}$ .

# ОБЭ

## Важно понимать:

**Значения ОБЭ для одного и того же вида ИИ могут значительно различаться для разных биологических объектов, разных биологических эффектов и разных условий облучения (например, разных доз):**

**Так, для одного и того же вида ИИ по критерию выживаемости клеток можно получить одни значения ОБЭ, по критерию злокачественного перерождения клеток — другие значения ОБЭ, по критерию образования катаракты — третьи значения и т.д.**

**Значения ОБЭ при больших дозах облучения обычно существенно ниже, чем при более низких дозах облучения. При малых дозах облучения значения ОБЭ достигают своих максимальных значений.**

# **Зачем введено понятие эквивалентной дозы?**

**В связи с тем, что разные виды ионизирующих излучений могут проявлять существенно различающуюся относительную биологическую эффективность, было введено понятие «ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА».**

**Понятие ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ было введено в целях оценки радиационной безопасности для человека.**

# Эквивалентная доза

**ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА ( $H_{T,R}$ ) для любого вида ионизирующего излучения  $R$  определяется как произведение средней поглощенной дозы  $D_{T,R}$  данного вида излучения в органе или ткани  $T$  на соответствующий этому виду излучения взвешивающий коэффициент  $W_R$ :**

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}$$

**ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА ( $H_T$ ) для смешанного ионизирующего излучения (т.е. состоящего из нескольких видов излучения) определяется следующим образом.**

$$H_T = \sum_R W_R \times D_{T,R}$$

# Значения взвешивающих коэффициентов $W_R$ для различных видов ИИ (из НРБ-99/2009)

Виды излучения	$W_R$
Рентгеновское и $\gamma$ -излучение любых энергий	1
Электроны любых энергий	1
$\alpha$ -частицы, осколки деления и тяжелые ядра	20
Протоны с энергией более 2 МэВ	5
Нейтроны с энергией: менее 10 кэВ	5
от 10 кэВ до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5

# **Значение $W_R$ для протонов рекомендовано СНИЗИТЬ**

**В 2007 г. в Публикации 103 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [International Commission on Radiological Protection – ICRP] рекомендовано снизить значение  $W_R$  для протонов с 5 до 2.**

**Однако, данная рекомендация не была реализована в Нормах радиационной безопасности, принятых в России в 2009 г. (НРБ-99/2009).**



# Единицы эквивалентной дозы

Единица в системе СИ

Внесистемная единица

**Дж/кг**

**joule/kg (J/kg)**

– единица,

получившая специальное

наименование

**зиверт (Зв)**

**sievert (Sv)**

Единица введена в 1979 г.

**бэр**

(аббревиатура от  
*биологический эквивалент  
рентгена*)

**рэм**

(аббревиатура от *рентген-  
эквивалент медицинский*)

**rem**

(от англ. *roentgen equivalent  
man*)

Единица введена в 1956 г.

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$$

# Рольф Максимилиан Зиверт (1896-1966)



Рольф Максимилиан Зиверт (Rolf Maximilian Sievert, 1896-1966) – известный шведский физик, работавший в области радиационной физики, медицинской физики, радиационной защиты и радиобиологии.

Один из основоположников дозиметрии ИИ (особенно при его использовании в медицине в диагностических и лечебных целях) и радиационной защиты.

Внес большой вклад в изучение биологических эффектов ионизирующего излучения, в частности малых доз хронического облучения.

В его честь в 1979 г. названа единица измерения эквивалентной дозы и эффективной дозы ИИ в Международной системе единиц (СИ) – зиверт (Зв).

## **Взвешивающие коэффициенты $W_R$ для различных видов ИИ. Определение**

**Взвешивающие коэффициенты для различных видов излучений  $W_R$  представляют собой регламентированные значения ОБЭ разных видов ионизирующих излучений, установленные в целях оценки радиационной опасности данных видов излучений для человека в отношении возникновения отдаленных неблагоприятных эффектов (т.е. эффектов, возникающих в результате воздействия относительно низких доз хронического или кратковременного облучения).**

# Ограничения в использовании эквивалентной дозы и коэффициентов $W_R$

**Обратите внимание!** Из представленного определения понятия  $W_R$  следует, что использовать эти коэффициенты (а значит и само понятие эквивалентной дозы) можно:

- 1). Только для целей радиационной безопасности человека!!!
- 2). Только в отношении отдаленных неблагоприятных эффектов!!! А значит, только в отношении низких доз облучения (не более 0,2 Зв при кратковременном воздействии).

Допускается суммирование эквивалентных доз выше 0,2 Зв для оценки общего уровня хронического облучения за длительный промежуток времени при условии, что кратковременное облучение в каждом случае не превышает 0,2 Зв.

При более высоких дозах следует применять понятие поглощенной дозы.

# Эквивалентная доза - разъяснения

**1 Зв — это эквивалентная доза любого вида ИИ, которая создает такой же биологический эффект, что и поглощенная доза в 1 Гр рентгеновского или гамма-излучения.**

**Эквивалентная доза, равная 1 Зв, создается при поглощенной дозе, равной  $1/W_R$  Гр.**

**Так, например, для  $\alpha$ -излучения эквивалентная доза, равная 1 Зв, создается при поглощенной дозе  $1/20$  Гр = 0,05 Гр.**

# Эквивалентная доза для биологических объектов (не человека)

Иногда некоторые радиобиологи используют понятие эквивалентной дозы при облучении и других биологических объектах (не человека), причем исследуя как отдаленные, так и острые радиобиологические эффекты.

Эквивалентная доза при этом определяется как:

$$AB\text{Э} = D \times$$

Однако, обычно радиобиологи, особенно в последние годы, предпочитают не использовать понятие эквивалентной дозы в отношении других биологических объектов.

**Переходим к понятию  
эффективной дозы**

**Эффективная доза (рус.) –  
Effective dose (англ.)**



# **Зачем введено понятие эффективной дозы?**

**Понятие «ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА» было введено для оценки и сравнения риска возникновения отдаленных неблагоприятных эффектов для разных случаев неравномерного облучения организма (т.е. для случаев, когда разные органы и ткани организма получают неодинаковые эквивалентные дозы).**

**Понятие ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ было введено (также как и понятие эквивалентной дозы) в целях оценки радиационной безопасности для человека.**

# Эффективная доза

**ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА ( $E$ )** ионизирующего излучения — величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его тканей и органов с учетом предрасположенности разных тканей и органов к возникновению в них отдаленных неблагоприятных эффектов излучения.

Определяется как сумма произведений эквивалентной дозы  $H_T$  в тканях и органах  $T$  на соответствующие взвешивающие коэффициенты для тканей и органов  $W_T$ :

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Суммирование производится по всем органам и тканям организма человека, считающимся предрасположенными к возникновению в них отдаленных неблагоприятных эффектов.

# Взвешивающие коэффициенты $W_T$ для различных тканей и органов (из НРБ-99/2009)

Взвешивающие коэффициенты  $W_T$  представляют собой относительный вклад различных органов или тканей в общий риск (вероятность) возникновения отдаленных неблагоприятных эффектов в организме при равномерном облучении тела.

При равномерном облучении организма человека эквивалентная доза  $H_T$  для всех органов и тканей одинакова, а  $\Sigma W_T = 1$  (в этом случае эффективная доза равна эквивалентной).

Органы или ткани	$W_T$
Гонады	0,20
Красный костный мозг	0,12
Толстый кишечник	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Грудная железа	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Остальное суммарно	0,05

# МКРЗ рекомендовала изменить значения $W_T$

В 2007 г. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) [International Commission on Radiological Protection – ICRP] в своей Публикации 103 рекомендовала использовать скорректированные значения  $W_T$  в связи с тем, что:

- 1) появились новые эпидемиологические данные по индукции рака;
- 2) произошла переоценка вклада гонад в риск возникновения отдаленных неблагоприятных последствий, т.к. прямые доказательства того, что радиационное воздействие на родителей приводит к избыточному выходу наследственных заболеваний у их потомства, по-прежнему отсутствуют.

Однако, данная рекомендация не была реализована в Нормах радиационной безопасности, принятых в России в 2009 г. (НРБ-99/2009).

# Рекомендуемые значения $W_T$ (МКРЗ, 2007)

Органы или ткани	$W_T$
Красный костный мозг	0,12
Толстая кишка	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
<b>Молочная (грудная) железа</b>	0,12 ↑
Остальные ткани (надпочечники, экстракорокальные ткани (ЕТ), желчный пузырь, сердце, почки, лимфоузлы, мышечную ткань, слизистую оболочку рта, поджелудочную железу, простату (♂), тонкий кишечник (SI), селезенку, тимус, матку/шейку матки (♀))	0,12
<b>Гонады</b>	0,08 ↓
Мочевой пузырь	0,04
Пищевод	0,04
Печень	0,04
Щитовидная железа	0,04
Костная поверхность	0,01
Кожа	0,01
Головной мозг	0,01
Слюнные железы	0,01

# Использование понятия эффективной дозы

**Обратите внимание!**

**Использовать понятие эффективной дозы можно:**

**Только в отношении человека!!!**

**Только в отношении отдаленных неблагоприятных  
эффектов!!!**

**А значит, только в отношении низких доз хронического или  
кратковременного облучения!!!**

# Единицы эффективной дозы

Единицы эффективной дозы — такие же как и у эквивалентной дозы:

Единица  
в системе СИ

---

**Дж/кг** – единица,  
получившая специальное  
наименование  
**зиверт (Зв)**

Внесистемная  
единица

**бэр**  
(аббревиатура от  
*биологический эквивалент  
рентгена*)

---

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$$

# Итоговая таблица по дозам ИИ и их единицам

Дозы и их краткое определение	Единицы		Соотношение единиц
	внесистемные	в Международной системе (СИ)	
Экспозиционная $X = \overline{dQ}/dm$	рентген (Р)	Кл/кг	1 Р = 2,58 × 10 <sup>-4</sup> Кл/кг
Поглощенная $D = \overline{de}/dm$	рад	грей (Гр) 1 Гр = 1 Дж/кг	1 Гр = 100 рад
Эквивалентная $H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}$	бэр	зиверт (Зв)	1 Зв = 100 бэр
Эффективная $E = \sum_T W_T \times H_T$	бэр	зиверт (Зв)	1 Зв = 100 бэр



# Выводы по видам доз ИИ

Почувствуйте,  
когда и какие виды доз ИИ можно использовать!

При радиационном контроле (оценке радиационной опасности) используйте понятия эффективной и эквивалентной дозы!

В биологических экспериментах используйте понятие поглощенной дозы (в отношении облучаемого экспериментального биологического объекта)!

При радиотерапии опухоли в отношении лучевого воздействия на опухоль надо использовать понятие поглощенной дозы, а в отношении происходящего при этом лучевого воздействия на врача-радиолога – понятия эффективной и эквивалентной дозы!

# Понятие мощности дозы

Мощность дозы — отношение приращения дозы ИИ (экспозиционной  $dX$ , поглощенной  $dD$ , эквивалентной  $dH$ , эффективной  $dE$ ) за интервал времени  $dt$  к этому интервалу времени.

Соответственно различают:

**мощность экспозиционной дозы =  $dX/dt$**

[А/кг; Р/час, Р/мин, Р/с, Р/сут, Р/нед, Р/мес, Р/год]

**мощность поглощенной дозы =  $dD/dt$**

[Гр/с, Гр/мин, Гр/час и т.д.; рад/с, рад/мин, рад/час и т.д.],

**мощность эквивалентной дозы =  $dH/dt$**

[чаще Зв/год, Зв/час и др.; чаще бэр/год и др.; ],

**мощность эффективной дозы =  $dE/dt$**

[чаще Зв/год, Зв/час и др.; чаще бэр/год и др.; ].

**Мощность дозы (рус.) –  
Dose rate (англ.)**

**Exposure rate**

**Absorbed dose rate**

**Equivalent dose rate**

**Effective dose rate**

# Радиационный фон (γ-фон)

Одним из наиболее распространенных показателей радиационной обстановки на какой-либо территории или в каком-либо помещении является т.н. «радиационный фон», под которым обычно понимают мощность дозы ионизирующего электромагнитного излучения (γ- или рентгеновского).

Ранее радиационный фон характеризовали мощностью экспозиционной дозы.

В настоящее время для этих целей используют обычно мощность эффективной дозы и гораздо реже мощность поглощенной дозы.

В Москве естественный радиационный фон (γ-фон) составляет в среднем 12 мкР/час (0,12 мкЗв/час, 0,12 мкГр/час).

# Территории с повышенным естественным радиационным фоном

На Земле известны территории, где естественный радиационный фон ( $\gamma$ -фон) может составлять СОТНИ и даже ТЫСЯЧИ мкР/час.

Так, в Бразилии (расположенные на востоке страны штаты Эспириту-Санту и Рио-де-Жанейро) вдоль Атлантического побережья мощность дозы колеблется от 1 до 10 мкЗв/час (т.е. в 10-100 раз выше чем обычно), достигая на морских пляжах 20 мкЗв/ч.

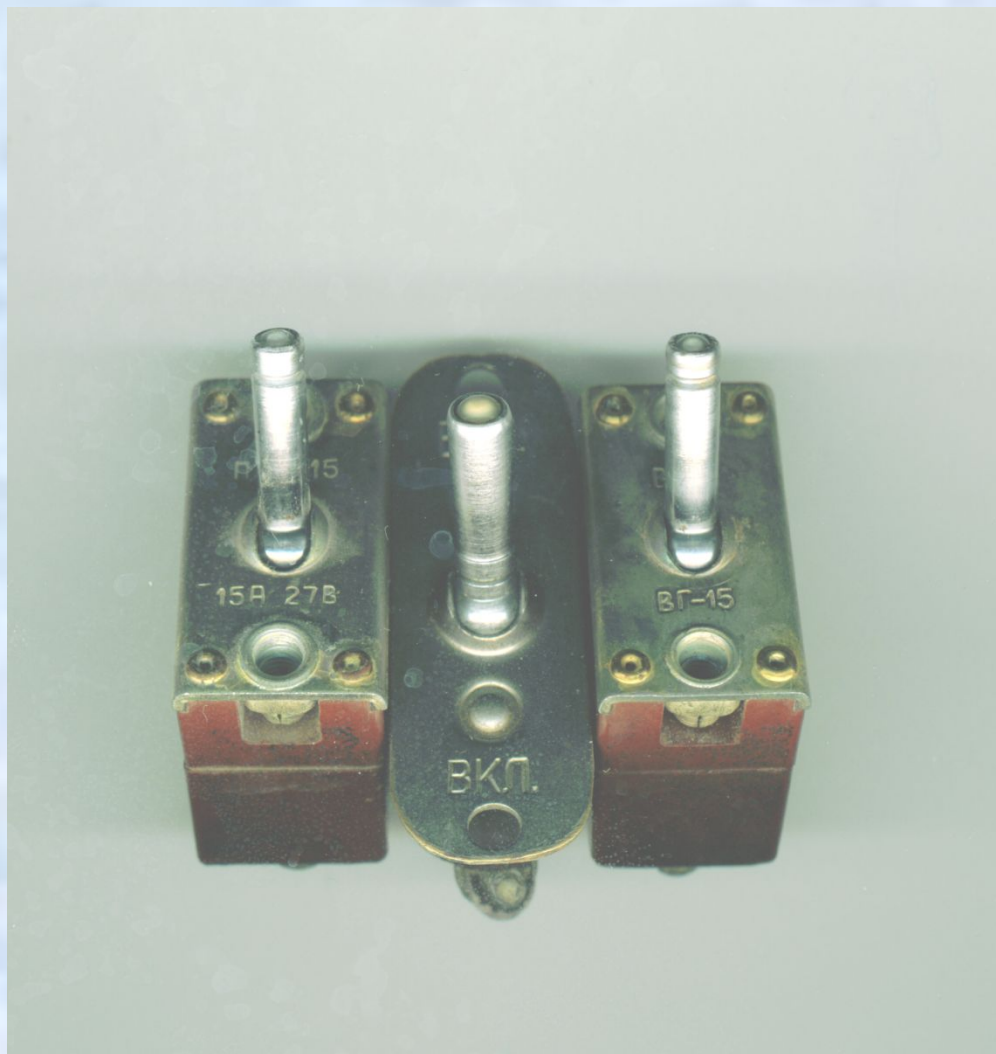
В Индии (расположенный на юго-западе страны штат Керала) вдоль прибрежной полосы у Индийского океана встречаются места выхода на поверхность монацитовых песков, содержащих около 10% по массе тория-232 и продуктов его распада. Естественный радиационный фон ( $\gamma$ -фон) достигает здесь 1-3 мкЗв/час.

На северном побережье Азовского моря (на Украине) на пляжах встречаются залежи монацитовых песков (т.н. «черный песок»). Основными радиоактивными элементами в них является торий-232, уран-238 и продукты их распада. В местах скопления «черных песков» радиационный фон в среднем составляют 0,5-3 мкЗв/час, но в различных местах (Белосарайская и Бердянская коса) в некоторые годы может достигать 9-10 мкЗв/час. В данных районах побережья Азовского моря имеется высокая плотность населения и расположены сотни учреждения отдыха.

# Радиоактивные штучки



**Шкалы различных приборов, выпущенных до 70-х годов, выполнены с использованием светомассы постоянного действия (СПД) на основе солей Радия-226.**



**Тумблеры – самый распространенный в настоящее время радиоактивный источник, на который можно довольно часто наткнуться в различных лабораториях и на барахолках.  
Уровень  $\gamma$ -излучения – до 1500 мкР/ч (15 мкЗв/ч)**





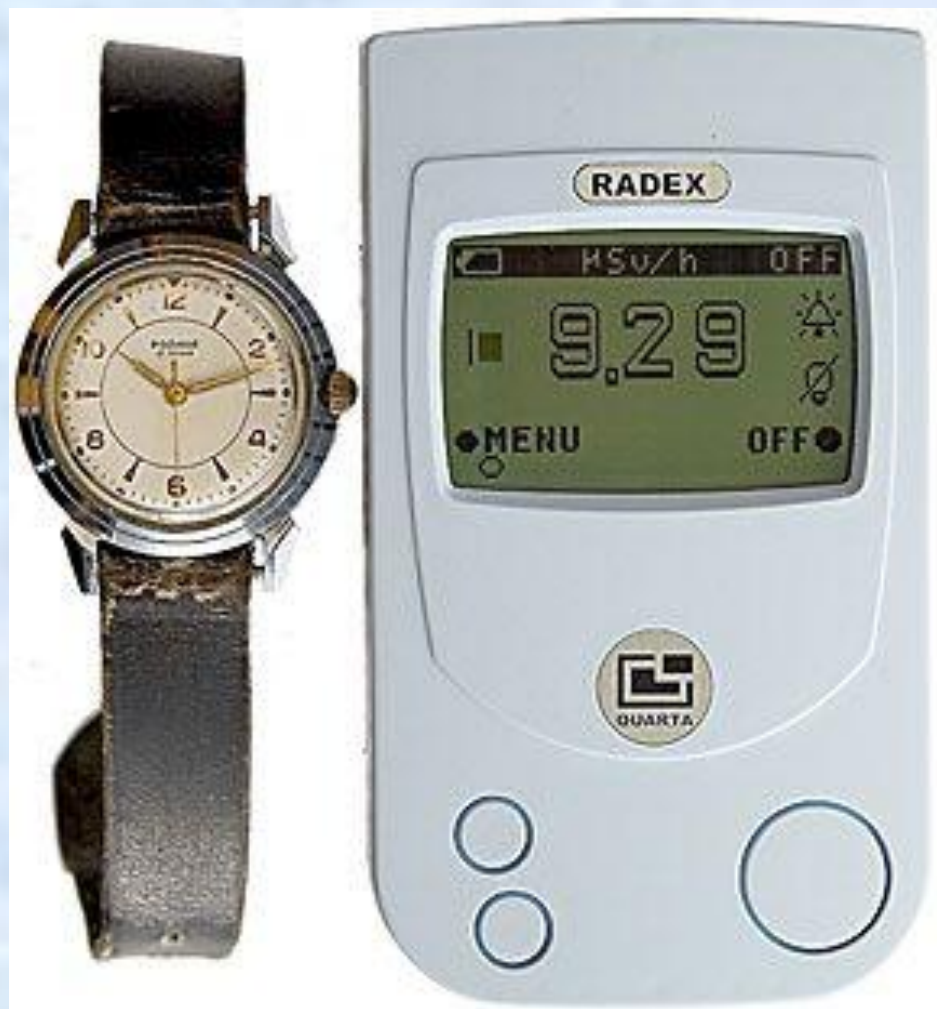
**Шкалы авиаприборов**



**Часы авиационные**



**Высотомер**



**Часы «Родина» 1959 года — уровень  $\gamma$ -излучения 929 мкР/ч (9,29 мкЗв/ч).**



**Посуда 1930х-1940х годов.**

**Радиоактивная глазурь для покрытия керамики была необычайно популярна в это время — 1500 мкР/ч (15 мкЗв/ч).**



**Набор для школьника (1950-е годы, США).**

**В комплекте: много альфа-, гамма- и бета-источников ионизирующего излучения, счетчик Гейгера, руководство «как обогатить уран» и другие устройства для проведения «экспериментов». При этом ни слова о возможных опасностях радиации и никаких средств защиты.**



**Компас – 3477 мкР/ч (34,77 мкЗв/ч).**







**Рентгеновский аппарат в обувной секции ГУМа**