

# ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЧАСТИЦ

## Программа курса

- 1. Введение.
- 2 Основные свойства атомных ядер
- 3. Радиоактивность
- 4. Нуклон - нуклонное взаимодействие и свойства ядерных сил
- 5. Модели атомных ядер
- 6. Ядерные реакции
- 7. Сверхтяжёлые ядра и экспериментальные методы физики низких энергий
- 8. Взаимодействие ядерного излучения с веществом
- 9. Деление ядер
- 10. Ядерные технологии
- 11. Частицы и взаимодействия
- 12. Фундаментальные частицы Стандартной модели.
- 13. Современные астрофизические представления
- 14. Эксперименты в физике высоких энергий
- 15. Космические лучи.

# Введение

Явление **радиоактивности** было открыто в 1896 году французским ученым Анри Беккерелем. В настоящее время оно широко используется в науке, технике, медицине, промышленности. **Радиоактивные элементы** естественного происхождения присутствуют повсюду в окружающей человека среде. В больших объемах образуются **искусственные радионуклиды**, главным образом в качестве побочного продукта на предприятиях оборонной промышленности и атомной энергетики. Попадая в окружающую среду они оказывают воздействия на живые организмы, в чем и заключается их опасность.

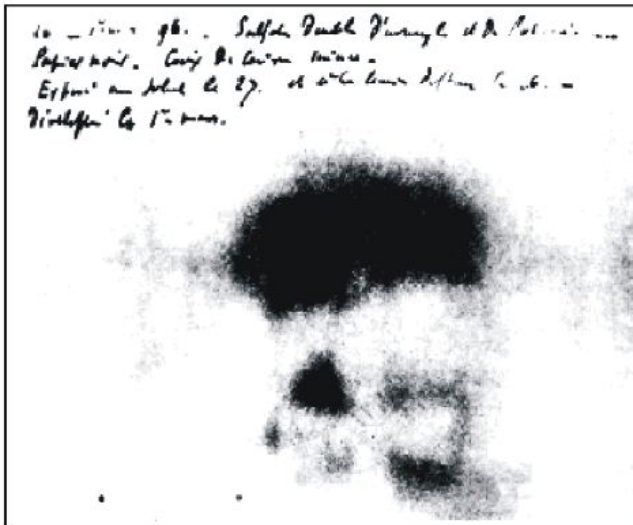
**Радиация**, связанная с нормальным развитием ядерной энергетики, составляет лишь малую долю радиации, порождаемой деятельностью человека.

Значительно большие дозы мы получаем от других источников, вызывающих меньше нареканий. Применение рентгеновских лучей в медицине, сжигание угля, использование воздушного транспорта, пребывание в хорошо герметизированных помещениях могут привести к значительному увеличению уровня облучения.

**1896**

## **Открытие радиоактивности**

**Анри  
Беккерель**



**Antoine Henri Becquerel  
(1852 – 1908)**

**Нобелевская премия по физике**

**1903 г. - А. Беккерель  
За открытие радиоактивности**

# Радиация

**Радиация** - обобщенное понятие. Оно включает различные виды излучений, часть которых встречается в природе, другие получаются искусственным путем.

Прежде всего следует различать **корпускулярное излучение** состоящее из частиц с массой отличной от нуля, и **электромагнитное излучение**.

Корпускулярное излучение может состоять как из заряженных, так и из нейтральных частиц.

## **Корпускулярное излучение**

**Альфа-излучение** - представляет собой ядра гелия, которые испускаются при радиоактивном распаде элементов тяжелее свинца или образуются в ядерных реакциях.

**Бета-излучение** - это электроны или позитроны, которые образуются при бета-распаде различных элементов от самых легких (нейтрон) до самых тяжелых.

**Космическое излучение**. Приходит на Землю из космоса. В его состав входят преимущественно протоны и ядра гелия. Более тяжелые элементы составляют менее 1%. Проникая вглубь атмосферы, космическое излучение взаимодействует с ядрами, входящими в состав атмосферы, и образует потоки вторичных частиц (мезоны, гамма-кванты, нейтроны и др.).

**Нейтроны**. Образуются в ядерных реакциях (в ядерных реакторах и в других промышленных и исследовательских установках, а также при ядерных взрывах).

**Продукты деления**. Содержатся в радиоактивных отходах переработанного топлива ядерных реакторов.

**Протоны, ионы**. В основном получают на ускорителях.

# Радиация

## Электромагнитное излучение

Электромагнитное излучение имеет широкий спектр энергий и различные источники: гамма-излучение атомных ядер и тормозное излучение ускоренных электронов, радиоволны.

Характеристики электромагнитных излучений.			
Энергия, эВ	Длина волны, м	Частота, Гц	Источник излучения
$10^9$	$10^{-16}$	$10^{24}$	Тормозное излучение
$10^5$	$10^{-12}$	$10^{20}$	Гамма излучение ядер
$10^3$	$10^{-10}$	$10^{18}$	Рентгеновское излучение
$10^1$	$10^{-8}$	$10^{16}$	Ультрафиолетовое излучение
$10^{-1}$	$10^{-6}$	$10^{14}$	Видимый свет
$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{12}$	Инфракрасное излучение
$10^{-5}$	$10^{-2}$	$10^{10}$	Микроволновое излучение
$10^{-7}$	$10^0$	$10^8$	СВЧ
$10^{-9}$	$10^2$	$10^6$	Радиоволны ВЧ
$10^{-11}$	$10^4$	$10^4$	Радиоволны НЧ

# Взаимодействие излучения со средой.

При прохождении ионизирующего излучения в среде возможны **упругое рассеяние частиц**, составляющих излучение, **и неупругие процессы**. При упругом рассеянии кинетическая энергия относительного движения частиц остается постоянной, но меняется направление их движения, т.е. поток ионизирующего излучения рассеивается; при неупругих процессах кинетическая энергия ионизирующего излучения расходуется на ионизацию и возбуждение частиц среды.

# Передача энергии радиации веществу

Различные виды радиации по разному взаимодействуют с веществом в зависимости от типа испускаемых частиц, их заряда, массы и энергии.

**Заряженные частицы ионизируют** атомы вещества, взаимодействуя с атомными электронами. **Нейтроны и гамма-кванты**, сталкиваясь с заряженными частицами в веществе, передают им свою **энергию**, в случае гамма - квантов возможно также рождение электрон-позитронных пар. Эти вторичные заряженные частицы, тормозясь в веществе, вызывают его ионизацию.

Воздействие излучения на вещество на промежуточном этапе приводит к **образованию быстрых заряженных частиц и ионов**. Радиационные повреждения вызываются в основном этими **вторичными частицами**, так как они взаимодействуют с большим количеством атомов, чем частицы первичного излучения. В конечном итоге энергия первичной частицы трансформируется в кинетическую энергию большого количества атомов среды и приводит к ее разогреву и ионизации.

# Передача энергии радиации веществу

## Тяжелые заряженные частицы - протоны, альфа - частицы, продукты деления и другие

Тяжелые заряженные частицы взаимодействуют главным образом с электронами атомных оболочек, вызывая ионизацию атомов. Максимальная энергия, которая может быть передана в одном акте взаимодействия тяжелой частицей, движущейся со скоростью  $v \ll c$ , неподвижному электрону, равна  $\Delta E_{\text{макс}} = 2m_e v^2$ .

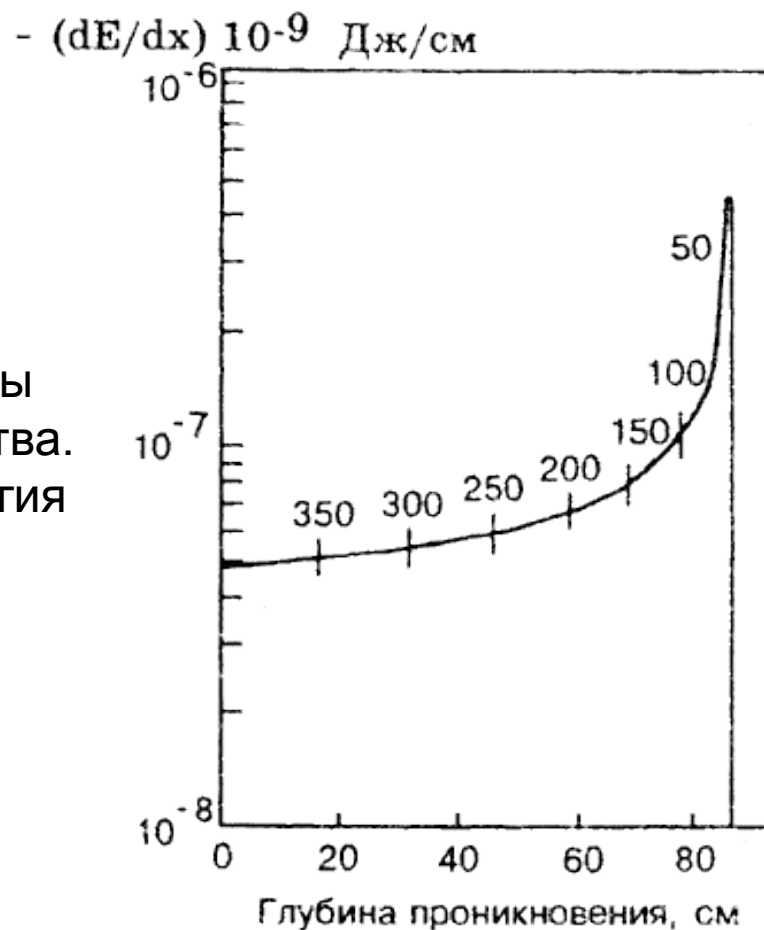
Проходя через вещество, заряженная частица совершает десятки тысяч соударений, постепенно теряя энергию. Тормозная способность вещества может быть охарактеризована величиной удельных потерь  $dE/dx$ . Удельные ионизационные потери представляют собой отношение энергии  $\Delta E$  заряженной частицы, теряемой на ионизацию среды при прохождении отрезка  $\Delta x$ , к длине этого отрезка.

Удельные потери энергии возрастают с уменьшением энергии частицы и особенно резко перед остановкой в веществе (пик Брэгга). Этот эффект используется в терапии рака, где очень важно обеспечить максимальное выделение энергии в глубоко расположенной опухоли, причиняя при этом минимальный вред окружающей здоровой ткани.

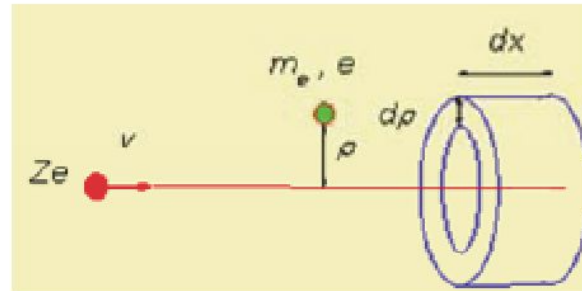


# Передача энергии радиации веществу

Зависимость тормозной способности биологической ткани для протонов с начальной энергией 400 МэВ от глубины проникновения протонов в слой вещества. Численные значения над кривой - энергия протона (в МэВ) на различной глубине проникновения. В конце пробега - пик Брэгга.



## Ионизационные потери энергии заряженной частицей



Тяжёлая нерелятивистская заряженная частица с зарядом  $Ze$  и скоростью  $v$  пролетает вдоль оси  $x$  на расстоянии  $\rho$  от электрона.

Сила взаимодействия в момент наибольшего сближения частиц  $F = Ze^2 / \rho^2$ .

Время взаимодействия  $\Delta t \approx 2\rho / v$ .

Переданный электрону импульс  $\Delta p \approx F \Delta t = 2Ze^2 / \rho v$ .

Переданная энергия  $\Delta E \approx (\Delta p)^2 / 2m_e = 2Z^2 e^4 / m_e v^2 \rho^2$

$n$  – число электронов в единице объёма.

Число электронов в элементе объёма

$$\Delta N = 2\pi\rho n d\rho dx.$$

Суммарная энергия, переданная электронам,

$$dE = \Delta E \Delta N = \frac{4\pi n Z^2 e^4}{m_e v^2} \frac{d\rho}{\rho} dx.$$

Величина удельных ионизационных потерь

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n Z^2 e^4}{m_e v^2} \ln \frac{\rho_{\text{макс}}}{\rho_{\text{мин}}}$$

# Передача энергии радиации веществу

Удельные ионизационные потери энергии для тяжёлых заряженных частиц при энергиях  $E \ll (M/m_e)Mc^2$ . Точный расчёт даёт при  $E \ll M^2c^2/m$ , где  $E$  — энергия частицы,  $M$  — её масса,

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз.}} = -\frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{\bar{I}} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right],$$

где

$M$  — масса заряженной частицы;

$m_e$  — масса электрона ( $m_e c^2 = 511$  кэВ — энергия покоя электрона);

$c$  — скорость света;  $v$  — скорость частицы;  $\beta = v/c$ ;

$Z$  — заряд частицы в единицах заряда позитрона;

$n_e$  — плотность электронов в веществе;

$\bar{I}$  — средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица:  $\bar{I} = 13.5 \cdot Z'$  эВ, где  $Z'$  — заряд ядер вещества среды в единицах заряда позитрона;

$r_0 = e^2/m_e c^2 = 2.8 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона.

# Передача энергии радиации веществу

Величина удельных ионизационных потерь энергии  $dE$  для тяжелых заряженных частиц в упрощенном полуэмпирическом виде:

$$dE/dx = 3.1 \cdot 10^5 \cdot Zz^2d/A\beta^2[11.2 + \ln(\beta^2/Z(1-\beta^2)) - \beta^2] \text{ эВ/см}$$

Где  $z$  – заряд частицы,  $Z, A$  – заряд и массовое число ядер вещества среды,  $d$  – плотность вещества среды в  $\text{г/см}^3$ .

Для определенной среды и частицы с данным зарядом  $Z$  величина  $dE/dx$  является функцией только кинетической энергии:  $dE/dx = \varphi(E)$ .

Проинтегрировав это выражение по всем значениям  $E$  от 0 до  $E_{\max}$ , можно получить полный пробег частицы, то есть полный путь ( $R$ ), который заряженная частица проходит до остановки и полной потери кинетической энергии:

$$R = \int_0^{E_{\max}} \frac{dE}{\varphi(E)}$$

Для пробегов протонов в фотоэмульсиях полуэмпирическая формула  $E_p = \alpha R^n$  где  $\alpha \sim 0.25$ ,  $n \sim 0.58$   $E$  измеряется в МэВ,  $R$  в микронах.

Для тяжелых заряженных частиц  $E = \alpha (m/m_p)^{1-n} z^{2n} R^n$

# Передача энергии радиации веществу

Для пробегов альфа частиц в воздухе

$$R_{\alpha} = 0.318 E^{3/2} \text{ для энергий альфа частиц } 4 < E < 10 \text{ МэВ, } R \text{ в см}$$

Для альфа частиц в веществе с массовым числом  $A$

$$R = 0.56 R_{\alpha} (\text{см}) A^{1/3} \text{ мг/см}^2$$

Для альфа частиц с энергией  $E < 200$  МэВ (в воздухе)

$$R = 10^2 (E/37.2)^{1.8}, \text{ } R \text{ в см, } E \text{ в МэВ}$$

Для протонов  $R = 10^2 (E/9.3)^{1.8}$

# Передача энергии радиации веществу

Тяжелые заряженные частицы взаимодействуют в основном с атомными электронами и поэтому мало отклоняются от направления своего первоначального движения. Вследствие этого **пробег тяжелой частицы R измеряют расстоянием по прямой от источника частиц до точки их остановки**. Обычно пробег измеряется в единицах длины (м, см, мкм) или длины, умноженной на плотность ( $\text{г/см}^2$ ). Пробеги протонов и альфа-частиц в некоторых средах приведены в таблицах.

## Пробеги протонов в алюминии.

Энергия: протонов, МэВ	1	3	5	10	20	40	100	1000
Пробег, см	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$	$2.7 \cdot 10^{-1}$	$7.0 \cdot 10^{-1}$	3.6	148
Пробег, $\text{мг/см}^2$	3.45	21	50	170	560	$1.9 \cdot 10^3$	$9.8 \cdot 10^3$	$400 \cdot 10^3$

## Пробеги альфа-частиц в воздухе, биологической ткани, алюминии.

Энергия $\alpha$ -частиц, МэВ	4	6	8	10
воздух, см	2.5	<b>4.6</b>	7.4	10.6
Биологическая ткань, мкм	31	<b>56</b>	96	130
алюминий, мкм	16	30	48	69

## Удельные ионизационные потери энергии заряженной частицей

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{4\pi Z^2}{\beta^2} n r_0^2 m_e c^2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{\bar{I}} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

$m_e$  — масса электрона ( $m_e c^2 = 511$  кэВ — энергия покоя электрона);

$c$  — скорость света;

$v$  — скорость частицы;  $\beta = v/c$ ;

$Z$  — заряд частицы в единицах заряда позитрона;

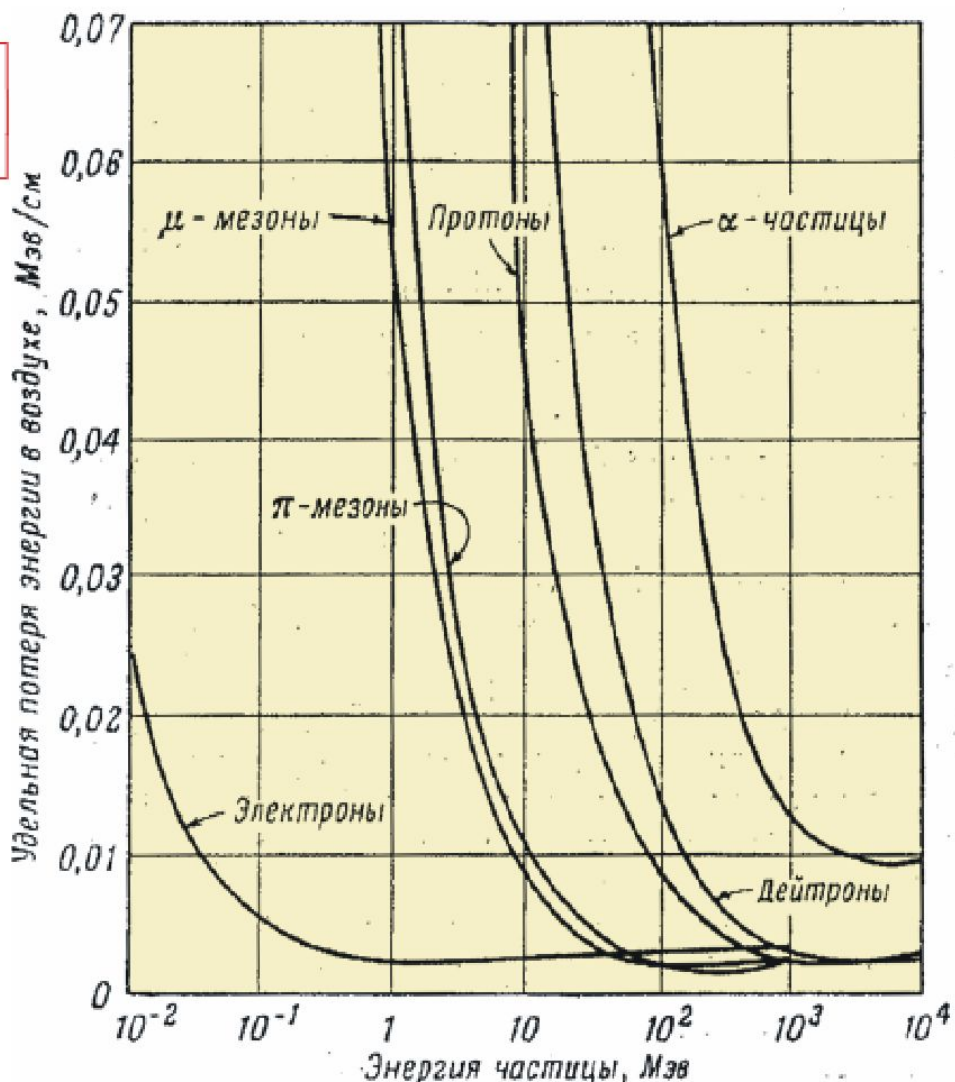
$n$  — плотность электронов вещества;

$\bar{I}$  — средний ионизационный потенциал атомов вещества, через которое проходит частица;  $\bar{I} = 13,5Z'$  эВ;

$Z'$  — заряд ядер вещества в единицах заряда позитрона;

$r_0 = e^2 / m_e c^2 = 2,8 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона.

## Удельные ионизационные потери энергии заряженной частицей



# Передача энергии радиации веществу

## Электроны, позитроны

Прохождение электронов и позитронов через вещество отличается от прохождения тяжелых заряженных частиц. Главная причина - малые массы покоя электрона и позитрона. Это приводит к относительно большому изменению импульса при каждом столкновении, что вызывает заметное изменение направления движения электрона или позитрона и как результат - электромагнитное радиационное излучение.

Ионизационные потери электронов преобладают в области относительно небольших энергий. С ростом энергии электрона  $E$  растут радиационные потери. Отношение ( $K$ ) удельных радиационных и ионизационных потерь энергии определяется зависимостью :

$$K = (dE/dx)_{\text{рад}} / (dE/dx)_{\text{иониз}} = 1.26 \cdot 10^{-3} ZE$$

где

$E$  выражается в Мегаэлектронвольтах,

$Z$  - средний заряд ядер атомов среды.

Энергия электронов  $E_{\text{крит}}$ , при которой величина удельных радиационных потерь равна величине удельных ионизационных потерь - называется критической. Критические энергии для различных веществ приведены в таблице.



# Передача энергии радиации веществу

Критические энергии электронов  $E_{\text{крит}}$  и радиационные длины  $L_r$  для различных веществ.

Вещество	Критическая энергия, $E_{\text{крит}}$ (МэВ)	Радиационная длина, $L_r$ г/см <sup>2</sup>	см
H	340	63.1	$7 \cdot 10^5$
C	103	42.7	19.4
Воздух	83	36.2	$3 \cdot 10^4$
Al	47	24	8.9
Fe	24	13.8	1.77
Cu	21.5	12.9	1.4
Pb	6.9	6.4	0.5

# Передача энергии радиации веществу

Радиационные потери при больших энергиях электронов можно описать с помощью следующего простого соотношения:

$$(-dE/dx)_{\text{рад}} = E/L_r, \text{ или } E = E_0 e^{-x/L_r}$$

где  $E_0$  - начальная энергия электрона,

$E$  - энергия электрона после прохождения длины  $x$ ,

$L_r$  - радиационная длина.

Прохождение позитронов в веществе описывается теми же соотношениями

Величина  $L_r$  называется радиационной длиной. **Радиационная длина - средняя толщина вещества, на которой энергия электрона уменьшается в  $e$  раз**

Масса электронов значительно меньше массы тяжелых частиц, что сказывается на характере их движения в веществе. При столкновении с атомными электронами и ядрами электроны значительно отклоняются от первоначального направления движения и двигаются по извилистой траектории. Для электронов вводится **эффективный пробег**, определяемый минимальной толщиной вещества, измеряемой в направлении исходной скорости пучка и соответствующей полному поглощению электронов.

# Передача энергии радиации веществу

Эффективные пробеги электронов в различных веществах приведены в таблице

**Эффективные пробеги (в см) электронов в различных веществах в зависимости от их энергии.**

Вещество	Энергия электрона, МэВ				
	0.05	0.5	5	50	500
Воздух	4.1	<b>160</b>	$2 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^4$	$6.3 \cdot 10^4$
Вода	$4.7 \cdot 10^{-3}$	0.19	2.6	19	78
Алюминий	$2 \cdot 10^{-3}$	0.056	0.95	4.3	8.6
Свинец	$5 \cdot 10^{-4}$	0.02	0.30	1.25	2.5

Удельные потери электронов с кинетической энергией (E) складываются из суммы ионизационных и радиационных потерь:

$$E = m_e c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$

# Передача энергии радиации веществу

## Ионизационные потери

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз.}} = -\frac{2\pi}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[ \ln \left( \frac{m_e c^2 E}{\bar{I}^2} \frac{\beta^2}{2(1-\beta^2)} \right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) \ln 2 + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8} (1 - \sqrt{1-\beta^2})^2 \right],$$

## Радиационные потери

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} = -\frac{16}{3} n_e E \frac{Zr_0^2}{137} \quad E \ll mc^2 = 511 \text{ кэВ},$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} = -n_e E \frac{Zr_0^2}{137} \left( 4 \ln \frac{2E}{mc^2} - \frac{4}{3} \right) \quad 1 \ll E/mc^2 \ll \frac{137}{Z^{1/3}},$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад.}} = -n_e E \frac{Zr_0^2}{137} \left( 4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right) \quad E/mc^2 \gg \frac{137}{Z^{1/3}}.$$

# Передача энергии радиации веществу

$m_e$  — масса электрона ( $m_e c^2 = 511$  кэВ — энергия покоя электрона);

$c$  — скорость света;  $v$  — скорость частицы;  $\beta = v/c$ ;

$Z$  — заряд ядер вещества в единицах заряда позитрона;

$n_e$  — плотность электронов в веществе;

$\bar{I}$  — средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица:  $\bar{I} = 13.5 \cdot Z$  эВ;

$r_0 = e^2/m_e c^2 = 2.8 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона.

**Радиационные потери** можно описать с помощью следующего простого соотношения:

$$\frac{dE}{dx_{\text{рад.}}} = -\frac{E}{L_r},$$

где  $L_r$  — радиационная длина.

# Передача энергии радиации веществу

## Нейтроны

В связи с отсутствием у нейтронов электрического заряда они проходят в веществе без взаимодействий сравнительно большие расстояния, измеряемые сантиметрами. Эффективные сечения взаимодействия нейтронов с электронами атома малы ( $\sigma \approx 10^{-22} \text{ см}^2$ ) по сравнению с сечением взаимодействия заряженной частицы с атомом ( $\sigma \approx 10^{-16} \text{ см}^2$ ). **Нейтроны** сталкиваются главным образом с **ядрами атомов**, входящих в состав вещества. Явления, происходящие при взаимодействии нейтронов с ядрами, зависят от кинетической энергии нейтронов. Поэтому обычно нейтроны делят на отдельные энергетические группы - **тепловые, медленные и быстрые** нейтроны. Границы этих энергетических групп условны.

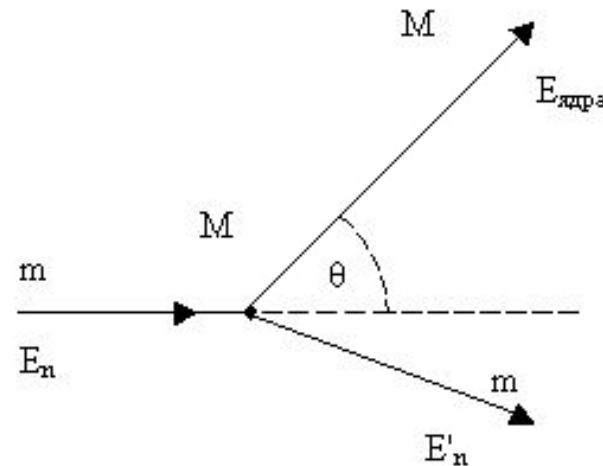
Классификация нейтронов по энергии.	
Энергия нейтронов	Типы нейтронов
<0.05 эВ	Тепловые нейтроны
0.05 эВ - 1 кэВ	Медленные нейтроны
> 1 кэВ	Быстрые нейтроны

# Передача энергии радиации веществу

**Быстрые нейтроны** передают энергию главным образом в результате прямых столкновений с атомными ядрами. Энергия, переданная от нейтрона ядру ( $E_{\text{ядра}}$ ), зависит от массы ядра и угла рассеяния.

В среде из легких ядер нейтроны могут передавать практически всю свою энергию в результате одного столкновения, если столкновение лобовое. Для быстрых нейтронов наиболее важным результатом взаимодействия являются упругие ( $n,n$ ) и неупругие ( $n,n'$ ) столкновения с атомными ядрами. В зависимости от типа ядра и энергии налетающего нейтрона величина сечения изменяется в интервале нескольких барн.

$$E_{\text{ядра}} = \frac{4Mm}{(M+m)} E_n \cos^2 \theta$$



где  $M$ ,  $m$  - масса ядра и масса нейтрона,  $E_n$  - начальная энергия нейтрона,  $\theta$  - угол между первоначальным направлением движения нейтрона и направлением движения ядра отдачи в лабораторной системе координат.

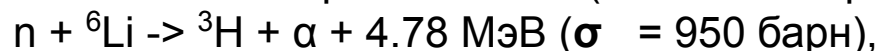
# Передача энергии радиации веществу

Для **медленных нейтронов** наблюдаются **максимумы** в сечении взаимодействия при определенных значениях энергий нейтронов  $E_n$ , характерных для данного вещества. Основные процессы - рассеяние и замедление нейтронов до тепловых скоростей.

Энергии **тепловых нейтронов** не превышают энергии связи атомов в водородосодержащих молекулах. Поэтому в случае, если не происходит ядерной реакции, тепловые нейтроны могут вызвать лишь возбуждения колебательных степеней свободы, что приводит к разогреву вещества.

Наиболее характерными реакциями при взаимодействии тепловых нейтронов с веществом являются реакции радиационного захвата ( $n, \gamma$ ). При уменьшении энергии нейтронов сечение упругого рассеяния ( $n, n$ ) остается примерно постоянным на уровне нескольких барн, а сечение ( $n, \gamma$ ) растет по закону  $1/v$ , где  $v$  - скорость налетающего нейтрона. Поэтому для очень медленных нейтронов возрастает не только абсолютная, но и относительная роль реакций радиационного захвата.

Наиболее существенные реакции, идущие под действием тепловых нейтронов, следующие:





# Передача энергии радиации веществу

В области **тяжелых ядер** начинают проявлять себя реакции вынужденного деления под действием нейтронов (n,f). Однако для живой материи, состоящей преимущественно из легких элементов, эти реакции несущественны.

Ослабление узкого коллимированного пучка нейтронов тонким слоем вещества происходит по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 \exp(-N \sigma x)$$

где  $I_0$  и  $I(x)$  - значения плотности потока до и после прохождения слоя вещества  $x$ ,  $N$  - число ядер в единице объема вещества,  $\sigma$  - полное сечение взаимодействия нейтронов с веществом.

Величина  $\Sigma = N \sigma$  имеет размерность обратной длины ( $\text{см}^{-1}$ ) и называется - линейный коэффициент ослабления потока нейтронов в веществе.

Величина  $\lambda = 1/\Sigma$  имеет размерность длины и называется - длина свободного пробега нейтрона в веществе.

# Передача энергии радиации веществу

Средняя длина пробега по отношению к поглощению  $\lambda_a$  - это расстояние, при прохождении которого плотность потока нейтронов из-за поглощения уменьшается в  $e$  раз.

Плотность потока нейтронов  $N(R)$  на расстоянии  $R$  от точечного источника, испускающего  $N_0$  моноэнергетических нейтронов в единицу времени, определяется соотношением:

$$N(R) = \frac{N_0}{4 \pi R^2} e^{-R/\lambda_a}$$

Для **защиты от нейтронных источников** высокой интенсивности наиболее употребительным материалом в промышленности является **бетон**.

В лабораторных условиях для защиты от быстрых нейтронов обычно используют комбинированную защиту, состоящую из **парафина (воды), кадмия (бора) и свинца**. В такой защите последовательно происходит замедление быстрых нейтронов (парафин, вода), поглощение нейтронов в результате  $(n, \gamma)$  реакции (кадмий, бор) и ослабление интенсивности образующихся  $\gamma$ -квантов (свинец).

# Передача энергии радиации веществу

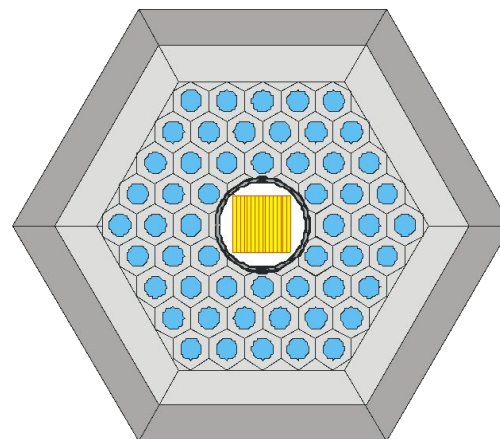
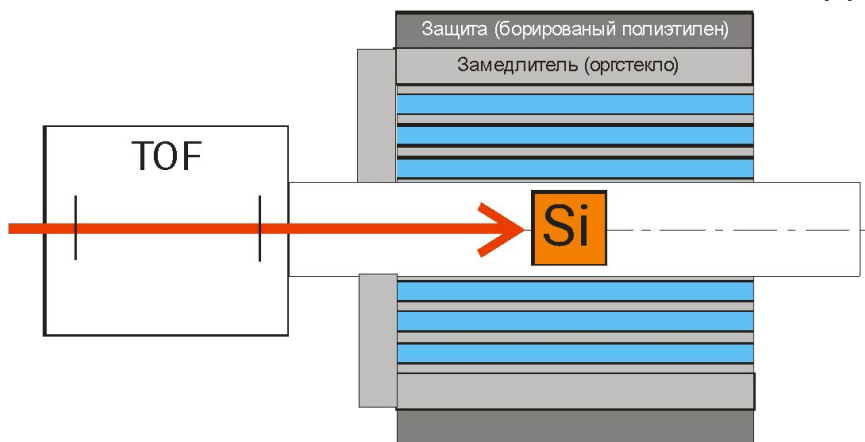
Данные о длине свободного пробега быстрых нейтронов в различных материалах приведены в таблице.

**Длина свободного пробега быстрых нейтронов ( $\lambda$ )  
в различных материалах**

Материал	Химическая формула	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\lambda$ (см) при энергиях	
			4 МэВ	14.9 МэВ
Полиэтилен	(СН <sub>2</sub> ) <sub>4</sub>	0.92	5.5	13.9
Плексиглас	С <sub>5</sub> Н <sub>8</sub> О <sub>2</sub>	1.18	6.3	15.2
Карбид бора	В <sub>4</sub> С	1.67	12.0	17.2
Графит	С	1.67	11.4	24.0
Алюминий	Al	2.7	14.1	15.9
Железо	Fe	7.89	7.6	8.3
Свинец	Pb	11.34	15.0	15.5

# Передача энергии радиации веществу

Регистрация нейтронов спонтанного деления тяжелых ядер



## «Нейтронная бочка»

54  $^3\text{He}$ -счетчика в замедл. из капролона  
окрыжены 5 см замедлителя (орг. стекло)  
и 5 см защиты (бар.полиэтилен)

Счетчики «Аспект» - диам. 30мм, длинна  
500 мм

давление  $^3\text{He}$  – 4 Атм

Эффективность регистрации **41 %**

(MCNP-code; Кузнецова Е.А.)

Фон –  $50 \text{ с}^{-1}$  нейтронов (при раб. У-400)

# Передача энергии радиации веществу

## Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

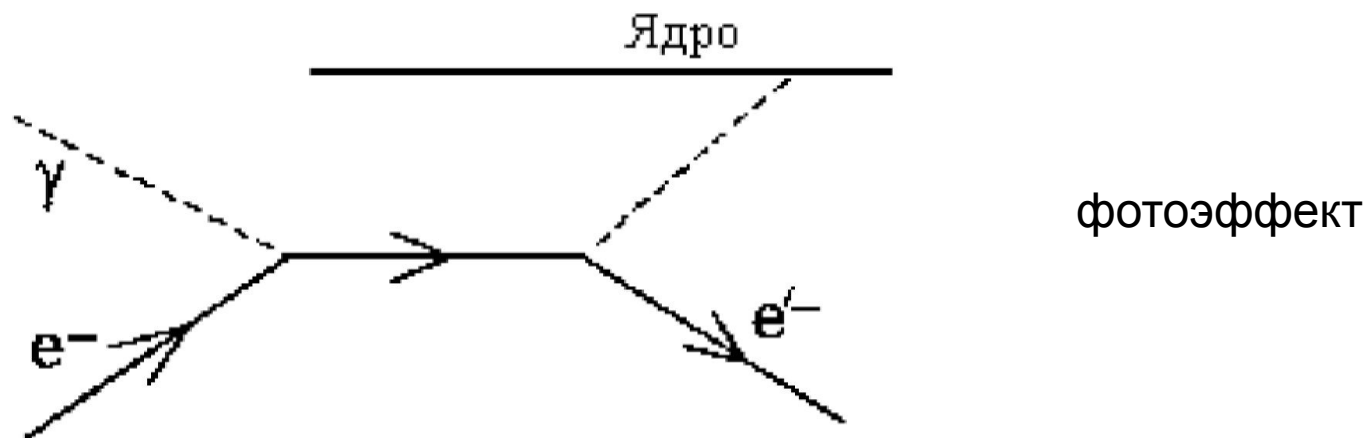
При прохождении через вещество фотоны (гамма-кванты) взаимодействуют с атомами, электронами и ядрами, в результате их интенсивность уменьшается. В области энергий до 10 МэВ наиболее существенными процессами являются **фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар**. При энергии гамма-квантов больше 10 МэВ превышает порог фотоядерных реакций и в результате взаимодействия фотонов с ядрами становятся возможны реакции типа  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, \alpha)$ . Сечения фотоядерных реакций в области энергий до 100 МэВ составляют 1% полного сечения взаимодействия гамма-квантов с атомом. Однако фотоядерные реакции необходимо учитывать в процессах преобразования фотонного излучения в веществе, так как вторичные заряженные частицы, такие как протоны и альфа-частицы, могут создавать высокую плотность ионизации.

При **фотоэффекте** фотон поглощается атомом и высвобождается электрон. Энергетические соотношения при этом выглядят следующим образом :

$$E_{\gamma} = E_e + E_i ,$$

где  $E_{\gamma}$  - энергия первичного фотона,  $E_i$  - энергия связи электрона в атоме,  $E_e$  - кинетическая энергия вылетевшего электрона.

# Передача энергии радиации веществу



После вылета фотоэлектрона в атомной оболочке образуется вакансия. Переход менее связанных электронов на вакантные уровни сопровождается выделением энергии, которая может передаваться одному из электронов верхних оболочек атома, что приводит к его вылету из атома (эффект Оже) или трансформироваться в энергию характеристического рентгеновского излучения. Таким образом, при фотоэффекте часть энергии первичного гамма-кванта преобразуется в энергию электронов (фотоэлектроны и электроны Оже), а часть выделяется в виде характеристического излучения. Линейный коэффициент фотопоглощения можно записать в виде :

$$\tau = \tau_k + \tau_s ,$$

где  $\tau_k$  - характеризует часть коэффициента поглощения, приводящую к преобразованию первичной энергии фотона в кинетическую энергию электрона.  $\tau_s$  - характеризует преобразование энергии первичных фотонов в энергию характеристического излучения.

# Передача энергии радиации веществу

Линейный коэффициент фотоэлектрического поглощения пропорционален отношению:

$$\tau = \frac{Z^5}{E_\gamma^{3.5}} .$$

Величина  $\tau$  резко уменьшается с ростом энергии и при  $E_\gamma > 10$  Мэв фотоэлектроны практически не образуются.

Ослабление интенсивности  $I$  падающего пучка фотонов в зависимости от толщины слоя вещества описывается соотношением:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} , \quad \mu = \tau + \varepsilon + \chi ,$$

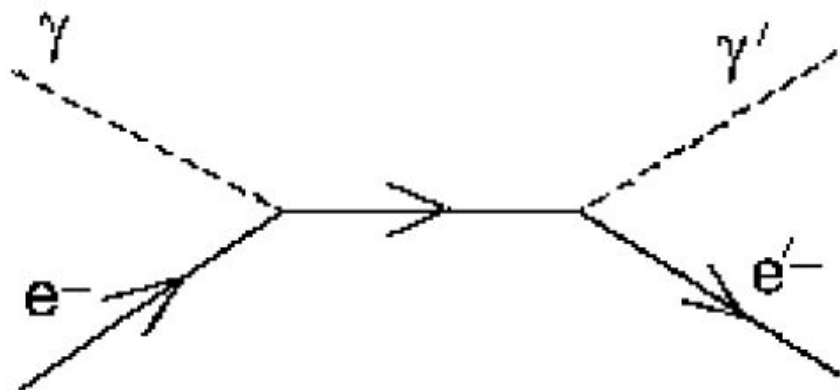
где

$\tau$  — линейный коэффициент ослабления в случае фотоэффекта;

$\varepsilon$  — линейный коэффициент ослабления для комптон-эффекта;

$\chi$  — линейный коэффициент ослабления в случае эффекта образования пар.

# Передача энергии радиации веществу



эффект Комптона

В случае **эффекта Комптона**, часть энергии  $\gamma$ -кванта преобразуется в кинетическую энергию электронов отдачи, а часть энергии уносит рассеянный фотон. Аналогично фотоэффекту линейный коэффициент комptonовского взаимодействия можно представить в виде:

$$\epsilon = \epsilon_k + \epsilon_s ,$$

где  $\epsilon_k$  и  $\epsilon_s$  имеют тот же смысл, что и  $\tau_k$  и  $\tau_s$  в случае фотоэффекта.

Вероятность рассеяния  $\gamma$ -квантов в случае эффекта Комптона зависит от плотности атомных электронов  $n_e \sim Z$ . Линейный коэффициент комptonовского рассеяния  $\epsilon \sim Z/E_\gamma$ . Поэтому с увеличением энергии число рассеянных  $\gamma$ -квантов уменьшается.



# Передача энергии радиации веществу



эффект образования пар

В случае **образования электрон-позитронных пар** баланс энергии имеет следующий вид:

$$E_{\gamma} = 2m_e c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} ,$$

где  $E_{e^-}$  и  $E_{e^+}$  — кинетические энергии электрона и позитрона.

В случае эффекта образования электрон-позитронных пар энергия первичного фотона преобразуется в кинетическую энергию электрона и позитрона и в энергию аннигиляционного излучения.

# Передача энергии радиации веществу

Таким образом, во всех трех процессах взаимодействия первичного фотона с веществом часть энергии преобразуется в кинетические энергии электронов и позитронов, а часть — в энергию вторичного фотонного излучения.

Поэтому коэффициент линейного ослабления потока фотонов можно записать в виде:

$$\mu = \mu_k + \mu_s ,$$

$\mu_k$  — линейный коэффициент передачи энергии излучения. Он определяет долю энергии  $\gamma$ -излучения, переданную электронам и позитронам в слое вещества. Значения  $\mu$  и  $\mu_k$  в различных средах даны в таблице 8.

$\mu_s$  — линейный коэффициент рассеяния. Он определяет долю энергии  $\gamma$ -излучения, преобразованную в энергию вторичного  $\gamma$ -излучения.

Величина  $\mu$  зависит от плотности  $\rho$ , заряда ядер вещества  $Z$  и энергии  $\gamma$ -квантов:

$$\mu = \mu(\rho, Z, E_\gamma) .$$

Можно ввести **массовый коэффициент ослабления**  $\mu_m = \mu/\rho$ . Тогда соотношение  $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$  будет иметь вид:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_m M_x} .$$

где  $M_x = \rho x$ . Если точечный источник  $\gamma$ -излучения находится в вакууме, то плотность потока  $\gamma$ -излучения  $I$  будет меняться с изменением расстояния  $R$  до источника по закону:

$$I(R) = \frac{I_0}{4\pi R^2} .$$

## Взаимодействие $\gamma$ -квантов с веществом

При прохождении  $\gamma$ -квантов через вещество энергия  $\gamma$ -квантов не изменяется, но в результате взаимодействий ослабляется интенсивность пучка  $\gamma$ -квантов.

Ослабление интенсивности моноэнергетического пучка  $\gamma$ -квантов описывается соотношением

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

$I_0$  — начальная интенсивность пучка,

$I$  — интенсивность пучка на глубине  $x$ ,

$\mu$  — линейный коэффициент поглощения.

Величина  $\mu$  имеет размерность  $\text{см}^{-1}$ .

Коэффициент поглощения  $\mu$  можно представить в виде суммы трёх членов соответствующих трём основным механизмам взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом:

1. фотоэлектрический эффект,
2. эффект Комптона,
3. рождение электрон-позитронных пар.

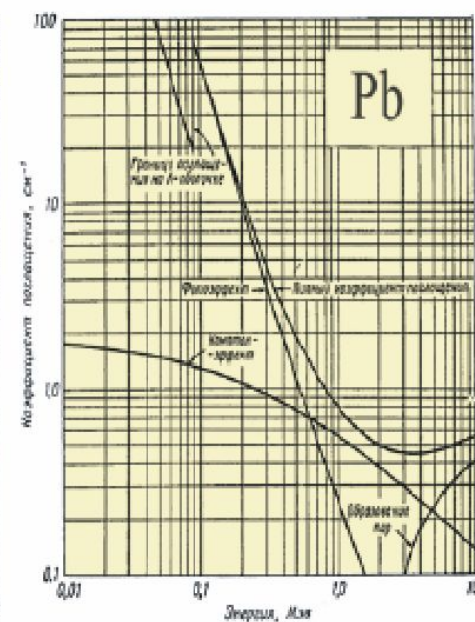
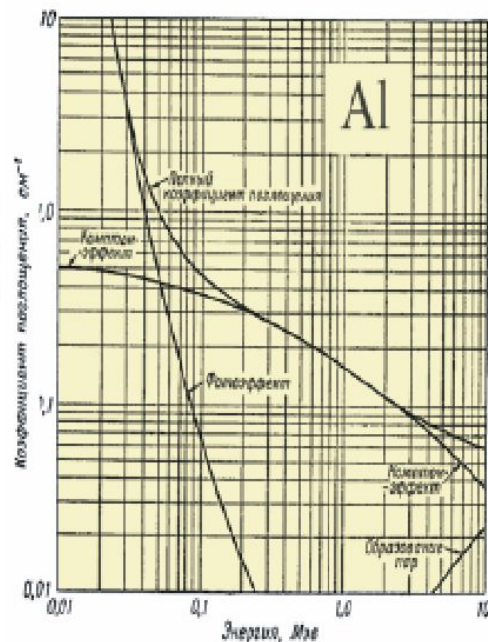
$$\mu = \mu_{\text{Ф.Э.}} + \mu_{\text{Э.К.}} + \mu_{\text{Э.П.}}$$

Коэффициент поглощения  $\mu$  полностью характеризует процесс прохождения  $\gamma$ -квантов через вещество. Он зависит от свойств вещества и энергии  $\gamma$ -квантов.

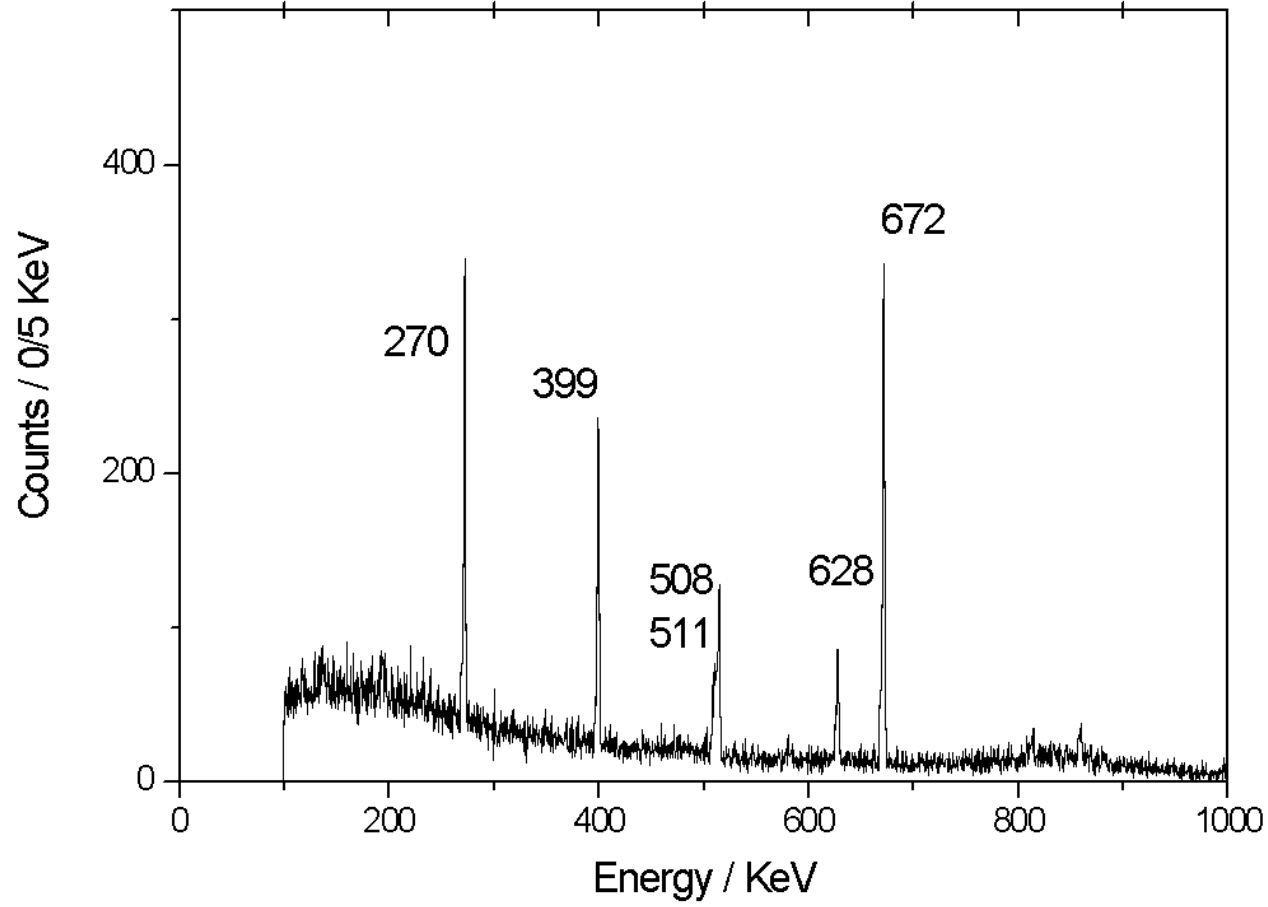
## Взаимодействие $\gamma$ -квантов с веществом

В области энергий  $\gamma$ -квантов от 10 КэВ до 10 МэВ наиболее существенны три процесса взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом:

- фотоэффект,
- комптоновское (некогерентное) рассеяние
- образование электрон – позитронных пар.



Зависимость линейного коэффициента поглощения в алюминии и свинце от энергии  $\gamma$ -квантов



# Передача энергии радиации веществу

Линейные коэффициенты передачи  $\mu_k$  и линейные коэффициенты ослабления  $\mu$ , в различных средах,  $\text{см}^{-1}$

Энергия $\gamma$ -квантов, МэВ	Вода		Алюминий		Свинец	
	$\mu_k$	$\mu$	$\mu_k$	$\mu$	$\mu_k$	$\mu$
0.1	0.0253	0.171	0.1002	0.444	24.494	60.0
0.2	0.0299	0.137	0.0742	0.323	6.645	11.8
0.5	0.0330	0.097	0.0775	0.228	1.022	1.72
1.0	0.0310	0.0706	0.0726	0.166	0.435	0.79
2.0	0.0260	0.0493	0.0613	0.117	0.218	0.51
5.0	0.0189	0.0302	0.0486	0.075	0.308	0.49
10.0	0.0154	0.0221	0.0451	0.062	0.372	0.60

# Воздействие радиации на ткани живого организма

В органах и тканях биологических объектов как и в любой среде при облучении в результате поглощения энергии идут процессы ионизации и возбуждения атомов. Эти процессы лежат в основе биологического действия излучений. Его мерой служит количество поглощенной в организме энергии.

В реакции организма на облучение можно выделить **четыре фазы**. Длительность первых трех быстрых фаз не превышает единиц микросекунд, в течение которых происходят различные молекулярные изменения. В четвертой медленной фазе эти изменения переходят в функциональные и структурные нарушения в клетках, органах и организме в целом.

**Первая, физическая фаза** ионизации и возбуждения атомов длится  $10^{-13}$  сек. **Во второй, химико-физической фазе**, протекающей  $10^{-10}$  сек образуются высокоактивные в химическом отношении радикалы, которые, взаимодействуя с различными соединениями, дают начало вторичным радикалам, имеющим значительно большие по сравнению с первичными сроки жизни. **В третьей, химической фазе**, длящейся  $10^{-6}$  сек, образовавшиеся радикалы, вступают в реакции с органическими молекулами клеток, что приводит к изменению биологических свойств молекул.

# Воздействие радиации на ткани живого организма

Описанные процессы первых трех фаз являются первичными и определяют дальнейшее развитие лучевого поражения. В следующей за ними **четвертой, биологической фазе** химические изменения молекул преобразуются в клеточные изменения. Наиболее чувствительным к облучению является ядро клетки, а наибольшие последствия вызывает повреждение ДНК, содержащей наследственную информацию. В результате облучения в зависимости от величины поглощенной дозы клетка гибнет или становится неполноценной в функциональном отношении. Время протекания четвертой фазы очень различно и в зависимости от условий может растянуться на годы или даже на всю жизнь.

Различные виды излучений характеризуются различной биологической эффективностью, что связано с отличиями в их проникающей способности и характером передачи энергии органам и тканям живого объекта, состоящего в основном из легких элементов.

# Воздействие радиации на ткани живого организма

## Химический состав мягкой ткани и костей в организме человека

Элемент	Заряд, $Z$	Процентное отношение по весу	
		Мягкая ткань	Кости
Водород	1	10.2	6.4
Углерод	6	12.3	27.8
Азот	7	3.5	2.7
Кислород	8	72.9	41.0
Натрий	11	0.08	—
Магний	12	0.02	0.2
Фосфор	15	0.2	7.0
Сера	16	0.5	0.2
Калий	19	0.3	—
Кальций	20	0.007	14.7



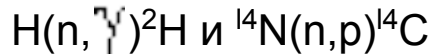
# Воздействие радиации на ткани живого организма

**Альфа-излучение** имеет малую длину пробега частиц и характеризуется слабой проникающей способностью. Оно не может проникнуть сквозь кожные покровы. Пробег альфа-частиц с энергией 4 Мэв в воздухе составляет 2.5 см, а в биологической ткани лишь 31 мкм. Альфа-излучающие нуклиды представляют большую опасность при поступлении **внутрь организма** через органы дыхания и пищеварения, открытые раны и ожоговые поверхности.

**Бета-излучение** обладает большей проникающей способностью. Пробег бета-частиц в воздухе может достигать нескольких метров, а в биологической ткани нескольких сантиметров. Так пробег электронов с энергией 4 Мэв в воздухе составляет 17.8 м, а в биологической ткани 2.6 см.

**Гамма-излучение** имеет еще более высокую проникающую способность. Под его действием происходит облучение всего организма.

Биологический эффект от действия **тепловых нейтронов** в основном обусловлен процессами

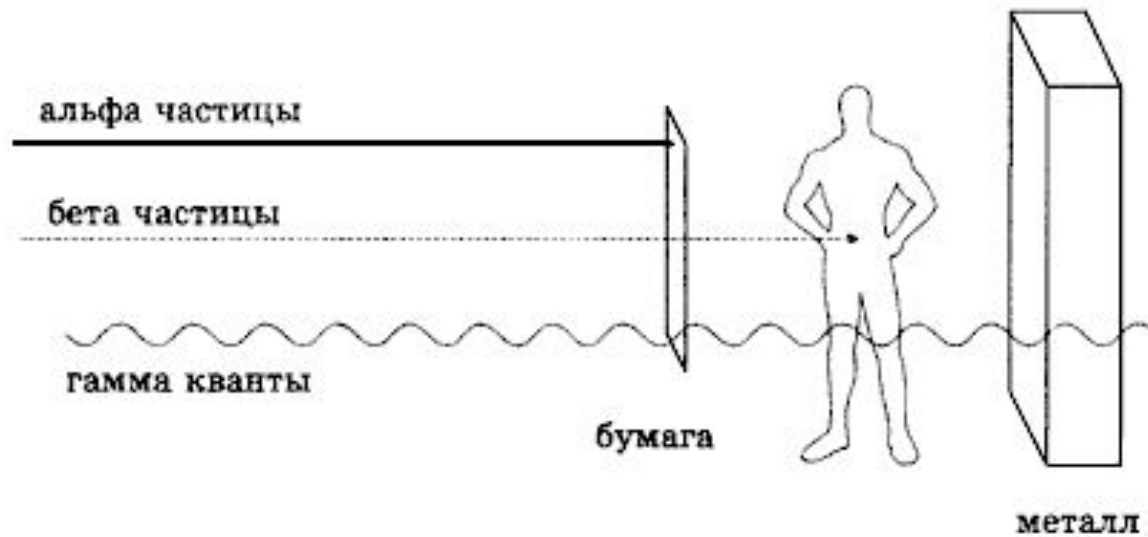


Сечения этих реакций составляют соответственно 0.33 и 1.76 барн. Основной эффект воздействия на биологическую ткань происходит под действием **протонов**, образующихся в реакции (n,p) и теряющих всю свою энергию в месте рождения.

Для **медленных нейтронов** сечения захвата нейтронов малы. Большая часть энергии расходуется на возбуждение и расщепление молекул ткани.

Для **быстрых нейтронов** до 90% энергии в ткани теряется при упругом взаимодействии. При этом решающее значение имеет рассеяние нейтронов на протонах. Дальнейшее выделение энергии происходит в результате ионизации среды **протонами отдачи**.

# Воздействие радиации на ткани живого организма



Схематическое изображение проникающей способности различных излучений.

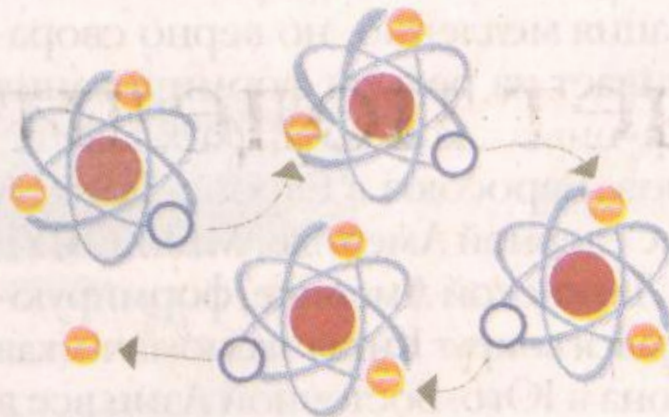
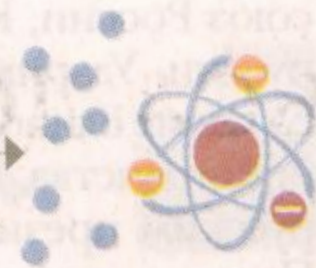
# Воздействие радиации на ткани живого организма

## Разрушение тканей под действием радиации



Радиоактивное  
вещество

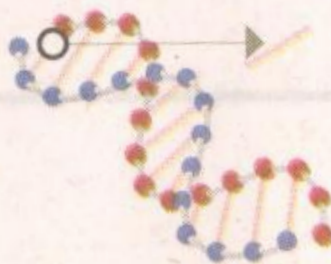
Частицы, которые выделяются при распаде радиоактивных веществ, обладают очень высокой скоростью (энергией). Столкнувшись с атомом, они могут его разрушить.



При столкновении образуется свободный радикал, который пытается отобрать «недостающий» электрон у соседних соединений.



В результате разрушаются клетки тканей человеческого тела.



У детей облученных родителей могут развиваться наследственные заболевания.

# Дозы излучения и единицы измерения

Действие ионизирующих излучений представляет собой сложный процесс. Эффект облучения зависит от величины поглощенной дозы, ее мощности, вида излучения, объема облучения тканей и органов. Для его количественной оценки введены специальные единицы, которые делятся на внесистемные и единицы в системе СИ. Сейчас используются преимущественно единицы системы СИ. Ниже в таблице дан перечень единиц измерения **радиологических величин** и проведено сравнение единиц системы СИ и внесистемных единиц.

Для описания влияния ионизирующих излучений на вещество используются следующие понятия и единицы измерения :

**Активность радионуклида в источнике (A)**. Активность равна отношению числа самопроизвольных ядерных превращений в этом источнике за малый интервал времени ( $dN$ ) к величине этого интервала ( $dt$ ) :

$$A = \frac{dN}{dt} .$$

Единица активности в системе СИ - Беккерель (Бк).

Внесистемная единица - Кюри (Ки).

# Дозы излучения и единицы измерения

## Основные радиологические величины и их единицы

Физическая величина	Единица, её наименование, обозначение (международное, русское)		Соотношение между внесистемной единицей и единицей СИ
	внесистемные	СИ	
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри (Ci, Ки)	беккерель (Bq, Бк)	1 Ки = $3.7 \cdot 10^{10}$ Бк
Экспозиционная доза излучения	рентген (R, Р)	кулон на килограмм (C/kg, Кл/кг)	1 Р = $2.58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
Поглощённая доза излучения	рад (rad, рад)	грей (Gy, Гр)	1 рад = 0.01 Гр
Эквивалентная доза излучения	бэр (rem, бэр)	зиверт (Sv, Зв)	1 бэр = 0.01 Зв
Мощность экспозиционной дозы излучения	рентген в секунду (R/s, Р/с)	ампер на килограмм (A/kg, А/кг)	1 Р/с = $2.58 \cdot 10^{-4}$ А/кг
Мощность поглощённой дозы излучения	рад в секунду (rad/s, рад/с)	грей в секунду (Gy/s, Гр/с)	1 рад/с = 0.01 Гр/с
Мощность эквивалентной дозы излучения	бэр в секунду (rem/s, бэр/с)	зиверт в секунду (Sv/c, Зв/с)	1 бэр/с = 0.01 Зв/с
Интегральная доза излучения	рад-грамм (rad · g, рад · г)	грей-килограмм (Gy · kg, Гр · кг)	1 рад · г = $10^{-5}$ Гр · кг

# Дозы излучения и единицы измерения

Число радиоактивных ядер  $N(t)$  данного изотопа уменьшается со временем по закону:

$$N(t) = N_0 e^{-t \ln 2 / T_{1/2}} = N_0 e^{-0.693t / T_{1/2}} .$$

где  $N_0$  - число радиоактивных ядер в момент времени  $t = 0$ ,  $T_{1/2}$  - период полураспада - время, в течение которого распадается половина радиоактивных ядер.

Массу  $m$  радионуклида активностью  $A$  можно рассчитать по формуле :

$$m = 2.4 \cdot 10^{-24} M T_{1/2} A ,$$

где  $M$  - массовое число радионуклида,  $A$  - активность в Беккерелях,  $T_{1/2}$  - период полураспада в секундах. Масса получается в граммах.

# Дозы излучения и единицы измерения

**Экспозиционная доза (X).** В качестве количественной меры рентгеновского и  $\gamma$ -излучения принято использовать во внесистемных единицах экспозиционную дозу, определяемую зарядом вторичных частиц (dQ), образующихся в массе вещества (dm) при полном торможении всех заряженных частиц :

$$X = dQ/dm$$

Единица экспозиционной дозы - **Рентген (Р)**. Рентген - это экспозиционная доза рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, создающая в 1 куб.см воздуха при температуре 0°С и давлении 760 мм рт.ст. суммарный заряд ионов одного знака в одну электростатическую единицу количества электричества. Экспозиционной дозе 1 Р соответствует  $2.08 \cdot 10^9$  пар ионов ( $2.08 \cdot 10^9 = 1/(4.8 \cdot 10^{-10})$ ). Если принять среднюю энергию образования 1 пары ионов в воздухе равной 33.85 эВ, то при экспозиционной дозе 1 Р одному кубическому сантиметру воздуха передается энергия, равная :

$$T = (2.08 \cdot 10^9) \cdot 33.85 \cdot (1.6 \cdot 10^{-12}) = 0.113 \text{ эрг} ,$$

Поглощение энергии ионизирующего излучения является первичным процессом, дающим начало последовательности физико-химических преобразований в облученной ткани, приводящей к наблюдаемому радиационному эффекту. Поэтому естественно сопоставить наблюдаемый эффект с количеством поглощенной энергии или поглощенной дозы.

# Дозы излучения и единицы измерения

**Поглощенная доза (D)** - основная дозиметрическая величина. Она равна отношению средней энергии  $dE$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе  $dm$  вещества в этом объеме :  
 $D = dE/dm$

Единица поглощенной дозы - Грей (Гр). Внесистемная единица Рад определялась как поглощенная доза любого ионизирующего излучения, равная 100 эрг на 1 грамм облученного вещества.

**Эквивалентная доза (H)**. Для оценки возможного ущерба здоровью человека в условиях хронического облучения в области радиационной безопасности введено понятие эквивалентной дозы  $H$ , равной произведению поглощенной дозы  $D_r$ , созданной облучением -  $r$  и усредненной по анализируемому органу или по всему организму, на весовой множитель  $w_r$  (называемый еще - коэффициент качества излучения)

$$H = \sum_r W_r D_r .$$

Единицей измерения эквивалентной дозы является Джоуль на килограмм. Она имеет специальное наименование **Зиверт** (Зв).



# Дозы излучения и единицы измерения

Влияние облучения носит неравномерный характер. Для оценки ущерба здоровью человека за счет различного характера влияния облучения на разные органы (в условиях равномерного облучения всего тела) введено понятие эффективной эквивалентной дозы  $E_{\text{эфф}}$  применяемое при оценке возможных стохастических эффектов - злокачественных новообразований.

**Эффективная доза** равна сумме взвешенных эквивалентных доз во всех органах и тканях:

$$E_{\text{эфф}} = \sum_t W_t H_t ,$$

где  $w_t$  - тканевый весовой множитель, а  $H_t$  - эквивалентная доза, поглощенная в ткани -  $t$ . Единица эффективной эквивалентной дозы - Зиверт.

# Дозы излучения и единицы измерения

Взвешивающие коэффициенты  $W_T$   
для различных видов излучения

Вид и энергия излучения	Весовой множитель излучения $W_T$
Фотоны, все энергии	1
Электроны и мюоны, все энергии	1
нейтроны с энергией	
< 10 кэВ	5
10 ÷ 100 кэВ	10
100 кэВ ÷ 2 МэВ	20
2 ÷ 20 МэВ	10
> 20 МэВ	5
протоны с энергией > 2 МэВ (кроме протонов отдачи)	5
$\alpha$ -частицы, осколки деления, тяжёлые ядра	20

## Дозы излучения и единицы измерения

Тканевые весовые множители  $W_t$  для разных органов

Ткань или орган	Множитель
Половые железы	0,20
Печень	0,05
Красный костный мозг	0,12
Пищевод	0,05
Толстый кишечник	0,12
Щитовидная железа	0,05
Лёгкие	0,12
Кожа	0,01
Желудок	0,12
Поверхность костей	0,01
Мочевой пузырь	0,05
Остальные органы	0,05
Молочные железы	0,05

# Предельно допустимые дозы облучения

По отношению к облучению население делится на 3 категории.

**Категория А** облучаемых лиц или персонал (профессиональные работники) - лица, которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений.

**Категория Б** облучаемых лиц или ограниченная часть населения - лица, которые не работают непосредственно с источниками ионизирующего излучения, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений.

**Категория В** облучаемых лиц или население - население страны, республики, края или области.

Для категории А вводятся предельно допустимые дозы -наибольшие значения индивидуальной эквивалентной дозы за календарный год, при которой равномерное облучение в течение 50 лет не может вызвать в состоянии здоровья неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами. Для категории Б определяется предел дозы.

# Дозы излучения и единицы измерения

## Основные пределы доз

Нормируемые величины*	Пределы доз	
	Персонал (группа А)**	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в		
хрусталике глаза***	150 мЗв	15 мЗв
коже****	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

\* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

\*\* Основные пределы доз, как и все остальные уровни облучения персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А.

# Дозиметры

- **Дозиметр** — устройство для измерения **дозы** или мощности дозы **ионизирующего излучения**, полученной прибором (и тем, кто им пользуется) за некоторый промежуток времени, например, за период нахождения на некоторой территории или за рабочую смену. Измерение вышеописанных величин называется **дозиметрией**.
- Иногда „дозиметром“ не совсем точно называют **радиометр** — прибор для измерения **активности** радионуклида в источнике или образце (в объеме жидкости, газа, аэрозоля, на загрязненных поверхностях) или **плотности потока** ионизирующих излучений для проверки на **радиоактивность** подозрительных предметов и оценки радиационной обстановки в данном месте в данный момент. Измерение вышеописанных величин называется **радиометрией**.
- **Рентгенометр** — разновидность радиометра для измерения мощности  $\gamma$  излучения.
- Бытовые приборы, как правило, комбинированные, имеют оба режима работы с переключением «дозиметр» — «радиометр», световую и (или) звуковую сигнализацию и дисплей для отсчёта измерений. Масса бытовых от 400 до нескольких десятков граммов, размер позволяет положить их в карман. Некоторые современные модели можно надеть на руку, как часы. Время *непрерывной* работы от одной батареи от нескольких суток до нескольких месяцев.
- Диапазон измерения бытовых радиометров, как правило, от 10 микрорентген в час до 9.999 миллирентген в час (0.1 — 99.99 **микрориверт** в час), погрешность измерения  $\pm 30\%$ .

# Дозиметры

- **Детектором** (чувствительным элементом дозиметра или радиометра, служащим для преобразования явлений, вызываемых ионизирующими излучениями в электрический или другой сигнал, легко доступный для измерения) может являться **ионизационная камера** (военный прямопоказывающий дозиметр «ДП-50», похож на авторучку с окошком в торце), **сцинтиллятор** (геологический поисковый радиометр «СРП-88»), **счетчик Гейгера** (военный радиометр «ДП-12», бытовые комбинированные «Белла», «Сосна», «Эксперт» (позволяет измерять мягкое бета излучение), «РКСБ-104» (радиометр с возможностью работы в дежурном режиме, подаёт сигнал при превышении установленного пользователем уровня), «Мастер» (маленький экономичный рентгенметр) и т. д.) или же специальный **полупроводниковый детектор**.

# Дозиметры



Бытовой дозиметр-радиометр «Сосна» (СССР, 1990).  
Батарейный отсек приоткрыт.  
Показывает 16 микрорентген/час.

Блок детекторов прибора «Сосна». Хорошо видны 4 счетчика Гейгера СБМ-20 и часть корректора спектра чувствительности (свинцовая фольга справа).



# Дозиметры

- ДКР-04 — электронный прямопоказывающий персональный дозиметр рентгеновского излучения, позволяющий измерять мощность индивидуальной эквивалентной дозы, текущую накопленную и общую накопленную эквивалентную дозу.
- Дозиметр имеет простое трехкнопочное управление, возможность установления порогов по мощности дозы и накопленной дозе, определения времени накопления дозы, звуковую и световую сигнализацию превышения порогов.



ДКР-04 применяется для контроля радиационной безопасности при работе рентгенкабинетов, рентгенодефектоскопических лабораторий, просмотровых аппаратов, учета доз облучения персонала и других специалистов, работающих с источниками рентгеновского излучения.

## НАЗНАЧЕНИЕ

Измерение дозы и мощности эквивалентной дозы рентгеновского и гамма-излучения. Измерение текущей (со времени последнего включения) и общей (за все время эксплуатации) накопленной дозы.

# Естественные источники радиации

Радиационный фон Земли складывается из трех компонентов :

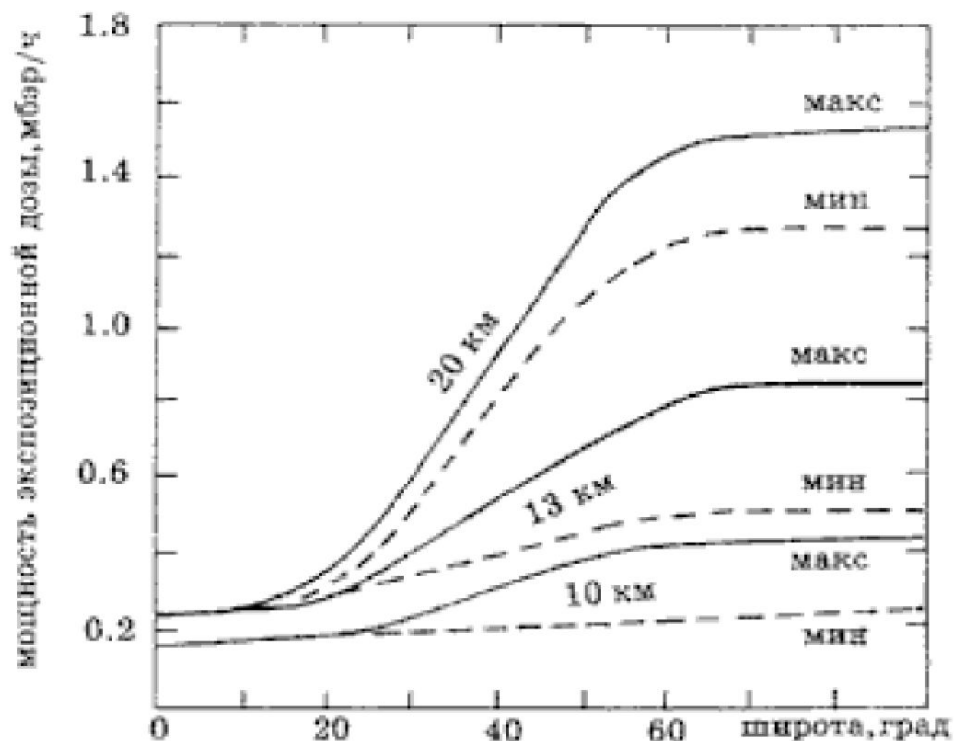
1. космическое излучение;
2. излучение от рассеянных в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды природных радионуклидов;
3. излучение от искусственных (техногенных) радионуклидов.

Облучение по критерию месторасположения источников излучения делится на внешнее и внутреннее. **Внешнее облучение** обусловлено источниками, расположенными вне тела человека. Источниками внешнего облучения являются космическое излучение и наземные источники. Источником **внутреннего облучения** являются радионуклиды, находящиеся в организме человека.

# Космическое излучение

Космическое излучение складывается из частиц, захваченных магнитным полем Земли, галактического космического излучения и корпускулярного излучения Солнца. В его состав входят в основном электроны, протоны и альфа-частицы. Это так называемое первичное космическое излучение, взаимодействуя с атмосферой Земли, порождает вторичное излучение. В результате на уровне моря излучение состоит почти полностью из мюонов (подавляющая часть) и нейтронов.

За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около **0.35 мЗв в год**.



# Внешнее облучение от радионуклидов земного происхождения

В настоящее время на Земле сохранилось 23 долгоживущих радиоактивных элемента с периодами полураспада от  $10^7$  лет и выше. Физические характеристики некоторых из них представлены в таблице

Радиоактивные изотопы, изначально присутствующие на Земле

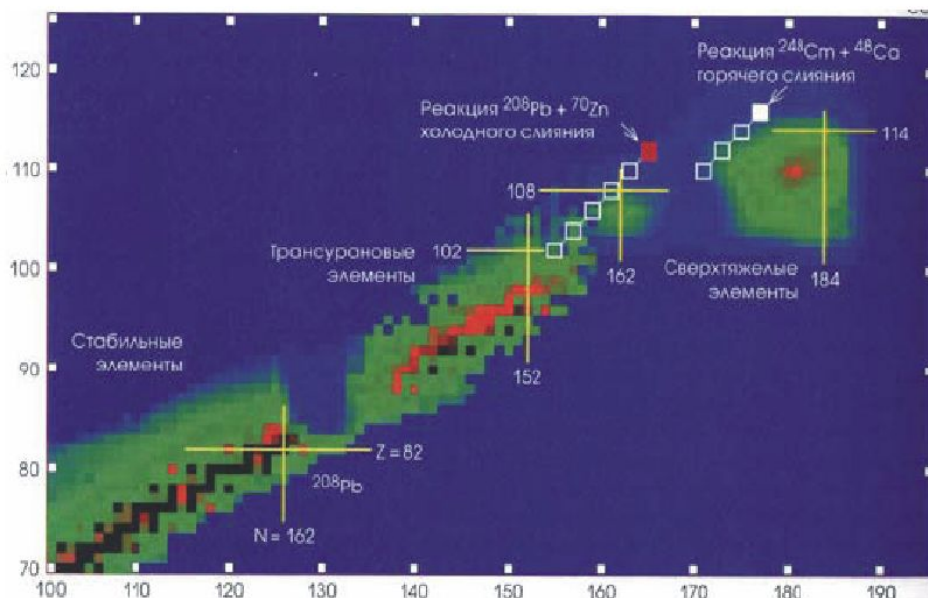
Радио- нуклид	Весовое содержание в земной коре	Период полураспада, лет	Тип распада
${}_{92}^{238}\text{U}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$4.47 \cdot 10^9$	$\alpha$
${}_{90}^{232}\text{Th}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1.41 \cdot 10^{10}$	$\alpha, \gamma$
${}_{19}^{40}\text{K}$	$3 \cdot 10^{-16}$	$1.28 \cdot 10^9$	$\beta, \gamma$
${}_{23}^{50}\text{V}$	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{14}$	$\gamma$
${}_{37}^{87}\text{Rb}$	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{10}$	$\beta$
${}_{49}^{115}\text{In}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{14}$	$\beta$
${}_{57}^{138}\text{La}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$\beta, \gamma$
${}_{62}^{147}\text{Sm}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{11}$	$\alpha$
${}_{71}^{176}\text{Lu}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$2.1 \cdot 10^{10}$	$\beta, \gamma$

## Радиоактивные семейства U и Th

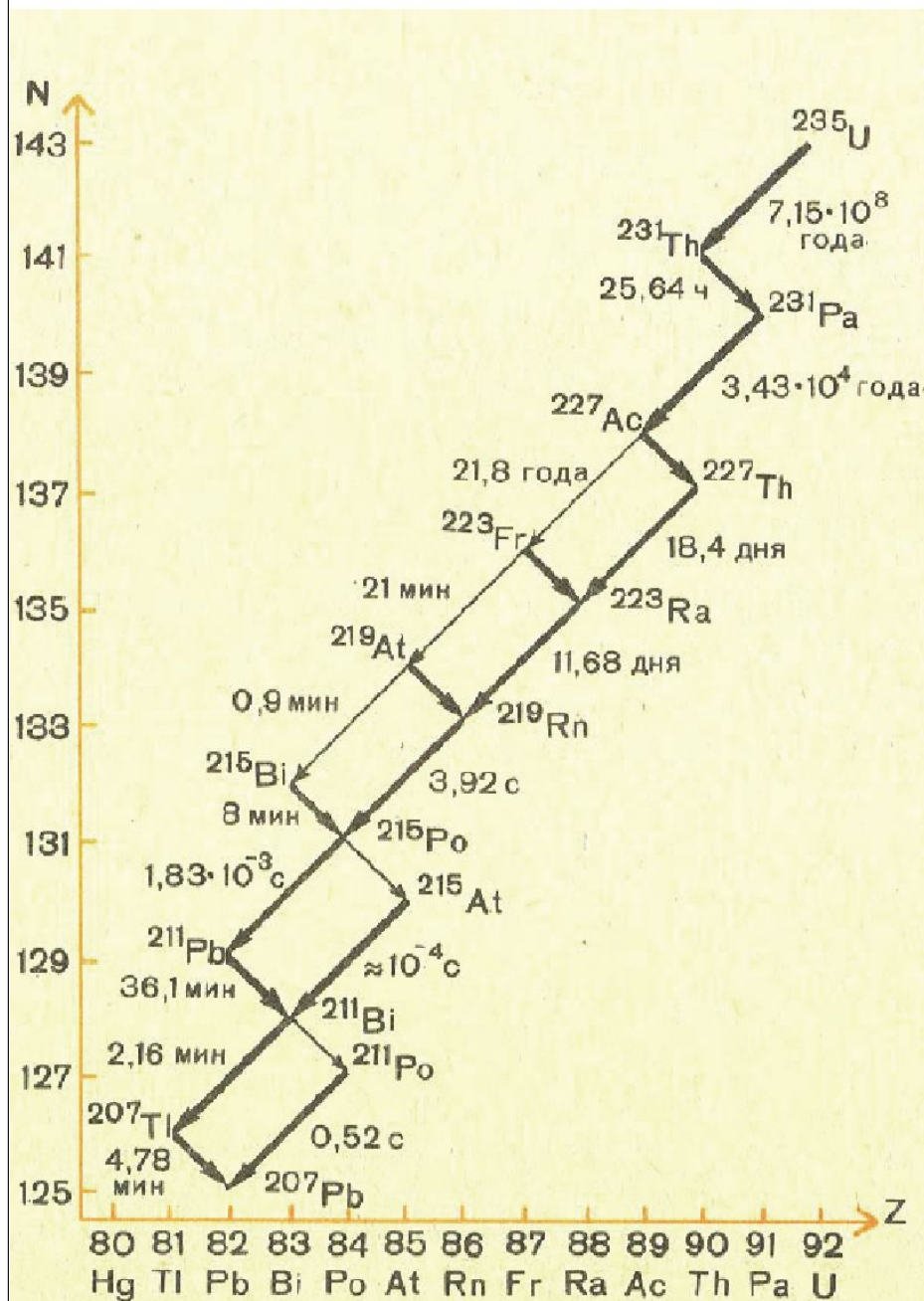
Выделенность изотопов Th и U обусловлена их большим периодом полураспада, сравнимым со временем существования Земли.

Изотоп	Период полураспада
$^{232}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет
$^{235}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^{10}$ лет
$^{238}\text{U}$	$4,46 \cdot 10^9$ лет

Эти ядра нестабильны и являются источником существования целой группы ядер, расположенных между ураном и свинцом. Так, например, изотоп  $^{235}\text{U}$  является родоначальником одного из четырех радиоактивных семейств.



## Радиоактивное семейство $^{235}\text{U}$



# Внешнее облучение от радионуклидов земного происхождения

В трех радиоактивных семействах: урана ( $^{238}\text{U}$ ), тория ( $^{232}\text{Th}$ ) и актиния ( $^{235}\text{Ac}$ ) в процессах радиоактивного распада постоянно образуется 40 радиоактивных изотопов. Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет около **0.4 мЗв**, т.е. чуть больше средней индивидуальной дозы, обусловленной облучением из-за космического фона на уровне моря.

Если человек находится в помещении, доза внешнего облучения **изменяется** за счет двух противоположно действующих факторов:

- 1) **Экранирование** внешнего излучения зданием.
- 2) **Облучение** за счет естественных радионуклидов, находящихся в материалах, из которого построено здание.

В зависимости от концентрации изотопов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  в различных строительных материалах мощность дозы в домах изменяется от  $4 \times 10^{-8}$  до  $12 \times 10^{-8}$  Гр/ч. В среднем в кирпичных, каменных и бетонных зданиях **мощность дозы в 2-3 раза выше, чем в деревянных**

# Внутреннее облучение от радионуклидов земного происхождения

В организме человека постоянно присутствуют радионуклиды земного происхождения, поступающие через органы дыхания и пищеварения. Наибольший вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ , и нуклиды рядов распада  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$

Среднегодовая эффективная эквивалентная доза внутреннего  
облучения

Радио- нуклид	Период полураспада	Тип распада	Доза, мкЗв
$^{40}_{19}\text{K}$	$1.28 \cdot 10^9$ лет	$\beta, \gamma$	180
$^{87}_{37}\text{Rb}$	$4.7 \cdot 10^{10}$ лет	$\beta$	6
$^{210}_{84}\text{Po}$	160 сут.	$\alpha$	130
$^{220}_{86}\text{Rn}$	54 сек.	$\alpha$	170 ÷ 220
$^{222}_{86}\text{Rn}$	3.8 сут.	$\alpha$	800 ÷ 1000
$^{226}_{86}\text{Ra}$	1600 лет	$\alpha$	13

# Внутреннее облучение от радионуклидов земного происхождения

Средняя доза внутреннего облучения за счет радионуклидов земного происхождения составляет **1.35 мЗв/год**. Наибольший вклад (около 3/4 годовой дозы) дают не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ **радон** и продукты его распада.

Радон высвобождается из земной коры повсеместно, но его концентрации в наружном воздухе существенно различаются для различных точек Земного шара. Однако большую часть дозы облучения от радона человек получает, находясь в закрытом непроветриваемом помещении. **Концентрация радона в закрытых помещениях в среднем примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе.** Источниками радона являются также строительные материалы. Так, например, большой удельной радиоактивностью обладают гранит и пемза, кальций-силикатный, шлак и ряд других материалов. Радон проникает в помещение из земли и через различные трещины в межэтажных перекрытиях, через вентиляционные каналы и т.д. Источниками поступления радона в жилые помещения являются также природный газ и вода



# Радиация от источников, созданных человеком

В результате деятельности человека во внешней среде появились искусственные радионуклиды и источники излучения. В природную среду стали поступать в больших количествах естественные радионуклиды, извлекаемые из недр Земли вместе с углем, газом, нефтью, минеральными удобрениями, строительными материалами. Сюда относятся геотермические электростанции, создающие в среднем выброс около  $4 \cdot 10^{14}$  Бк изотопа  $^{222}\text{Rn}$  на 1 ГВт выработанной электроэнергии; **фосфорные удобрения**, содержащие  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{238}\text{U}$  (до 70 Бк/кг в Кольском апатите и 400 Бк/кг в фосфорите); **уголь**, сжигаемый в жилых домах и электростанциях, содержит естественные радионуклиды  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  в равновесии с их продуктами распада. Роль различных искусственных источников излучений в создании радиационного фона иллюстрируется таблице.

В настоящее время основной вклад в дозу от источников, созданных человеком, вносит внешнее радиоактивное облучение при **диагностике и лечении**. В развитых странах на каждую тысячу населения приходится от 300 до 900 таких обследований в год не считая массовой флюорографии и рентгенологических обследований зубов.

# Радиация от источников, созданных человеком

Для исследования различных процессов, протекающих в организме и для диагностики опухолей используются также **радиоизотопы, вводимые в организм человека**. В промышленно развитых странах ориентировочно проводится 10 - 40 обследований на 1 млн. жителей в год.

Средняя эффективная эквивалентная доза, получаемая от всех источников облучения в медицине, в промышленно развитых странах составляет  $\approx$  **1 мЗв в год** на каждого жителя, т.е. примерно половину средней дозы от естественных источников.

**Среднегодовые дозы, получаемые от естественного радиационного фона и различных искусственных источников излучения**

Источник излучения	Доза, мбэр/год
Природный радиационный фон	200
Стройматериалы	140
Атомная энергетика	0.2
Медицинские исследования	140
Ядерные испытания	2.5
Полеты в самолетах	0.5
Бытовые предметы	4
Телевизоры и мониторы ЭВМ	0.1
Общая доза	500

# Испытания ядерного оружия

Радиологические последствия испытаний ядерного оружия определяются количеством испытаний, суммарными энерговыделением и активностью осколков деления, видами взрывов (воздушные, наземные, подводные, надводные, подземные) и геофизическими факторами окружающей среды в период испытаний (район, метеообстановка, миграция радионуклидов и др.). Испытания ядерного оружия, которые особенно интенсивно проводились в период 1954-1958 и 1961-1962 гг. стали одной из основных причин повышения радиационного фона Земли и, как следствие этого, глобального повышения доз внешнего и внутреннего облучения населения.

**Продукты ядерного деления** представляют собой сложную смесь более чем 200 радиоактивных изотопов 36 элементов (от цинка до гадолиния). Большую часть активности составляют короткоживущие радионуклиды. Так, через 7, через 49 и через 343 суток после взрыва активность ПЯД снижается соответственно в 10, 100 и 1000 раз по сравнению с активностью через час после взрыва. Выход наиболее биологически значимых радионуклидов приведен в таблице. Кроме продуктов радиоактивное загрязнение обусловлено радионуклидами наведенной активности ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ .,  $^{28}\text{Al}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и др.) и не разделившейся частью урана и плутония. Особенно велика роль наведенной активности при термоядерных взрывах.

# Испытания ядерного оружия



# Испытания ядерного оружия

Выход некоторых продуктов деления при ядерном взрыве

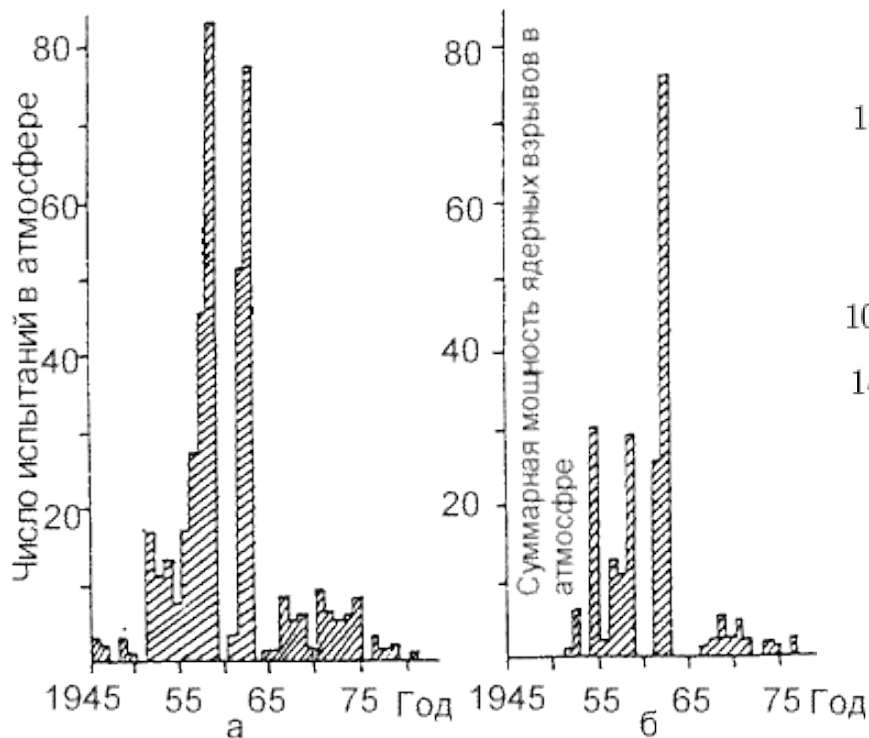
Радио- нуклид	Период полураспада	Выход на одно деление, %	Активность на 1 Мт, $10^{15}$ Бк
$^{89}_{38}\text{Sr}$	50.5 сут.	2.56	590
$^{90}_{38}\text{Sr}$	29.12 лет	3.5	3.9
$^{95}_{40}\text{Zr}$	65 сут.	5.07	920
$^{103}_{44}\text{Ru}$	41 сут.	5.2	1500
$^{106}_{44}\text{Ru}$	365 сут.	2.44	78
$^{131}_{53}\text{I}$	8.05 сут.	2.9	4200
$^{136}_{55}\text{Cs}$	13.2 сут.	0.036	32
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30 лет	5.57	5.9
$^{140}_{56}\text{Ba}$	12.8 сут.	5.18	4700
$^{141}_{58}\text{Ce}$	32.5 сут.	4.58	1600
$^{144}_{58}\text{Ce}$	288 сут.	4.69	190
$^3_1\text{H}$	12.3 лет	0.01	$2.6 \cdot 10^{-2}$

## Испытания ядерного оружия

Дозы облучения населения от глобальных выпадений в год

Зона	Индивидуальная ожидаемая доза, мЗв	Вклады отдельных видов облучения, %		
		внешнее	внутреннее	
			пища	воздух
Умеренный пояс Северного полушария	4.5	24	71	5
Умеренный пояс Южного полушария	3.1	8	90	2
Весь Земной шар	3.8	18	79	3

# Испытания ядерного оружия



$^{14}\text{C}$	$T_{1/2} = 5730$ лет	69 %
$^{137}\text{Cs}$	$T_{1/2} = 30$ лет	14 %
$^{95}\text{Zr}$	$T_{1/2} = 65$ дней	5,3 %
$^{90}\text{Sr}$	$T_{1/2} = 28$ лет	3,2 %
$^{106}\text{Ru}$	$T_{1/2} = 373$ дня	2,2 %
$^{144}\text{Ce}$	$T_{1/2} = 285$ дней	1,4 %
$^3\text{H}$	$T_{1/2} = 12$ лет	1,2 %
$^{131}\text{I}$	$T_{1/2} = 8$ дней	0,9 %

Из суммарной дозы основной вклад дадут следующие радионуклиды

Данные по ядерным испытаниям в атмосфере:

- число испытаний в атмосфере;
- суммарная мощность ядерных взрывов за год в мегатоннах

# Атомная энергетика

Источником облучения, вокруг которого ведутся наиболее интенсивные споры, являются атомные электростанции. Преимущество атомной энергетики состоит в том, что она требует существенно меньших количеств исходного сырья и земельных площадей, чем тепловые станции, не загрязняет атмосферу дымом и сажей.

Опасность состоит в возможности возникновения катастрофических аварий реактора, а также в реально не решенной проблеме утилизации радиоактивных отходов и утечке в окружающую среду небольшого количества радиоактивности.

**Расход природных ресурсов для производства 1 ГВт в год электроэнергии в угольном и ядерном топливных циклах**

Ресурс	Ядерный топливный цикл	Угольный топливный цикл
Земля, га	20 ÷ 60	100 ÷ 400
Вода, млн. м <sup>3</sup>	32 50 ÷ 200* 1500**	21
Материалы (без топлива), тыс. т	32 16	12
Кислород, млн. т	—	8

\* — При содержании урана в руде менее 0.1 %.

\*\* — При прямоточном охлаждении.



# Атомная энергетика

В настоящее время более 20 % электроэнергии вырабатывается на АЭС

Доля атомной энергетики в производстве энергии в отдельных странах в 2001 г.

Страна	Доля АЭС, %	Страна	Доля АЭС, %
Франция	76.4	Испания	27.6
Литва	73.7	Великобритания	21.9
Бельгия	56.8	США	19.8
Словакия	53.4	Чехия	18.5
Украина	47.3	Россия	14.9
Болгария	45.0	Канада	11.8
Венгрия	42.2	Румыния	10.9
Южная Корея	40.7	Аргентина	7.3
Швеция	39.0	Южная Африка	6.7
Словения	37.4	Нидерланды	4.0
Швейцария	35.5	Мексика	3.9
Япония	33.8	Индия	3.1
Армения	33.0	Пакистан	1.7
Финляндия	32.1	Бразилия	1.4
Германия	30.6	Китай	1.2

## Предельно-допустимые дозы излучения

Острая лучевая болезнь развивается при дозе облучения в **1 зиверт**.

Смертельная доза **2 зиверта**.

Наиболее чувствительными органами являются красный костный мозг и гонады. Для природной радиации допускается радиация 5 бэр = 0,05 зиверта, для искусственных источников 0,5 бэр.

Вторая группа по чувствительности к радиации - это мышцы, щитовидная железа и другие внутренние органы. Для природной радиации 15 бэр в год, для искусственной 1,5 бэр в год.

Третья группа кожа и костная ткань. Для природной радиации 30 бэр, для искусственной 3 бэра.

# Воздействие радиации на ткани живого организма

## Воздействие радиации на организм человека

1 Зв (зиверт) = 1 Гр (грей) = 100 Р (рентген)

1-10 Зв в час (Зт/ч) – костномозговая форма острой лучевой болезни (ОЛБ). Рвота, головная боль, повышение температуры, слабость. Бессимптомные изменения крови. Нарушение иммунитета, радиационный гепатит, синдром сердечно-сосудистых осложнений.  
При лечении летальный исход может быть исключен.

10-20 Зт/ч – кишечная форма ОЛБ.  
Вероятен летальный исход.

20-80 Зт/ч – сосудистая форма ОЛБ.  
Вероятен летальный исход.

80-120 Зт/ч – церебральная форма ОЛБ.  
Летальный исход.

120 Зт/ч и выше – смерть под лучом.

