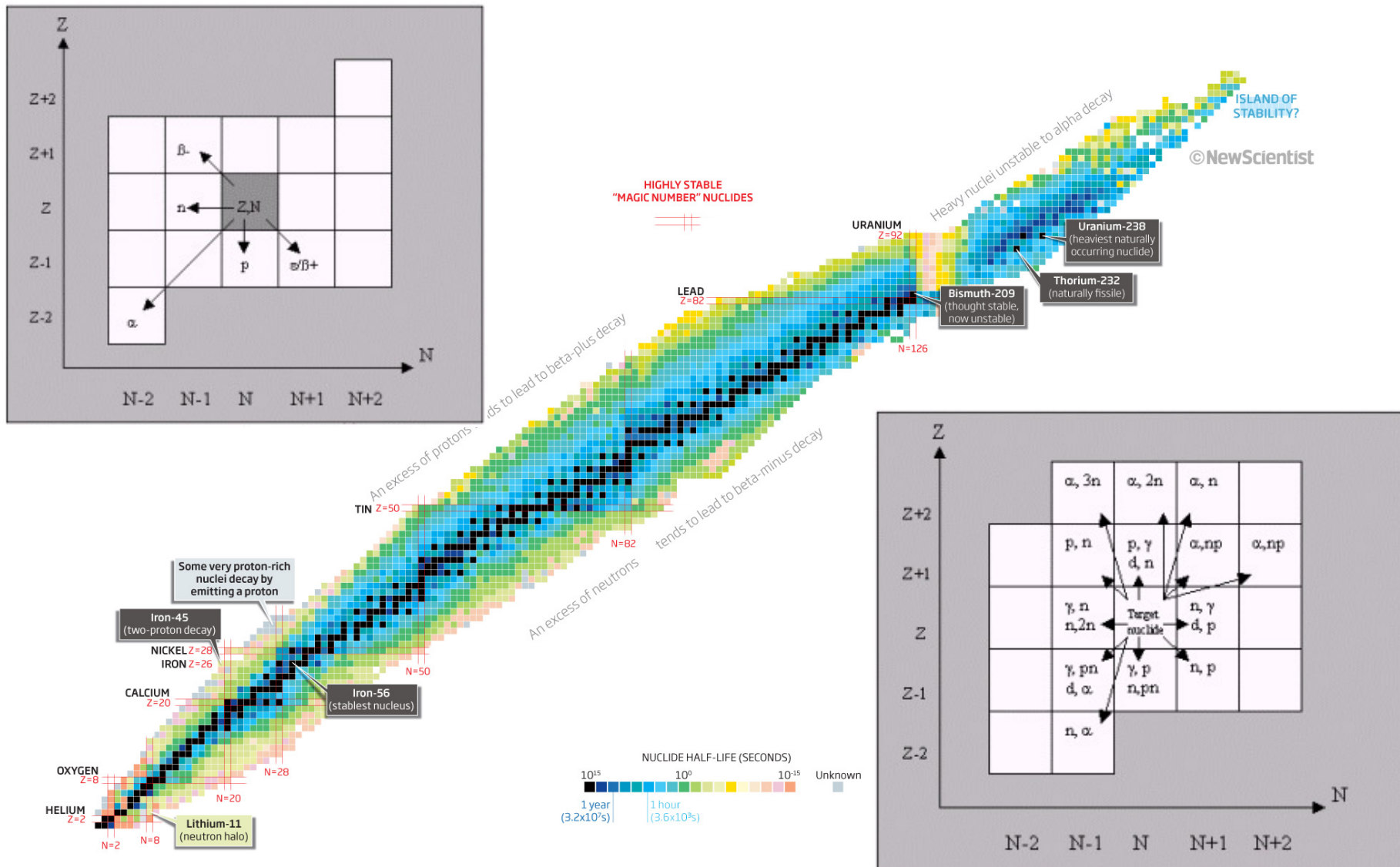




# Ядерная физика и Человек

# Радиация

# Ядерные превращения



# Корпускулярное излучение

- Альфа
- Бета
- Нейтроны
- Космический фон
- Осколки деления
- Протоны, ионы (ускорители)

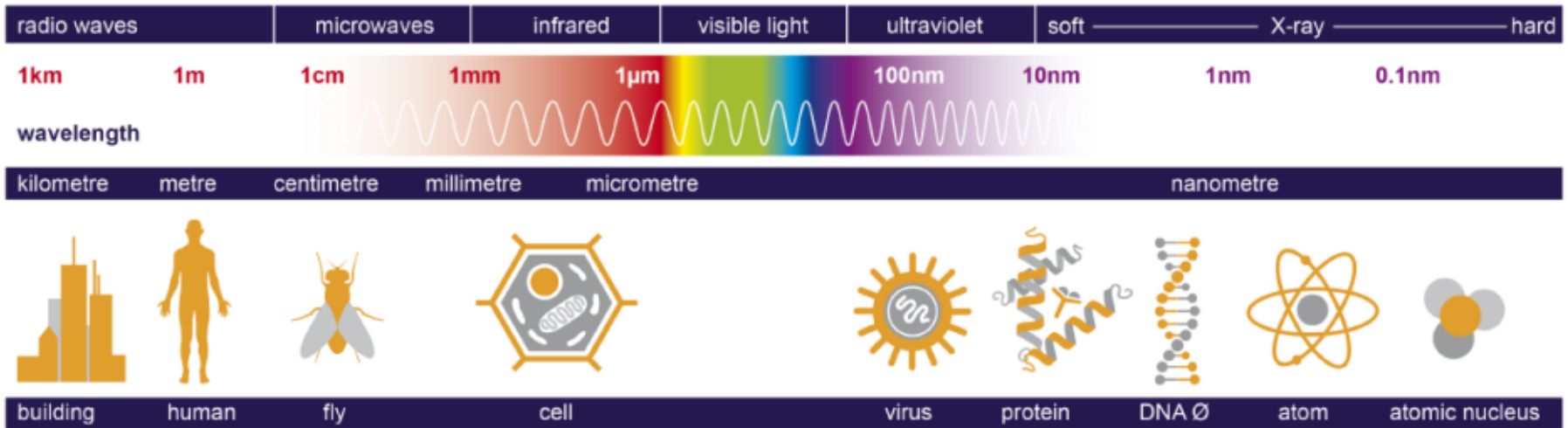
# Электромагнитное излучение

Энергия, эВ

$10^{-10}$     $10^{-7}$     $10^{-5}$     $10^{-4}$    0,1   1   10    $10^2$     $10^3$

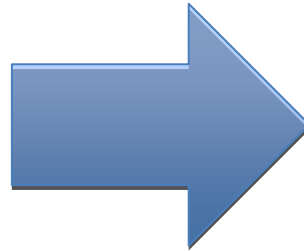
Частота, Гц

$10^5$     $10^8$     $10^{10}$     $10^{11}$     $10^{14}$     $10^{15}$     $10^{16}$     $10^{17}$     $10^{18}$



# Взаимодействие излучения с веществом

- Альфа
- Бета
- Нейтроны
- Космический фон
- Осколки деления
- Протоны, ионы
- Ультрафиолет
- Рентген и далее



- Тяжелые частицы
- Электроны
- Гамма-кванты
- Нейтроны

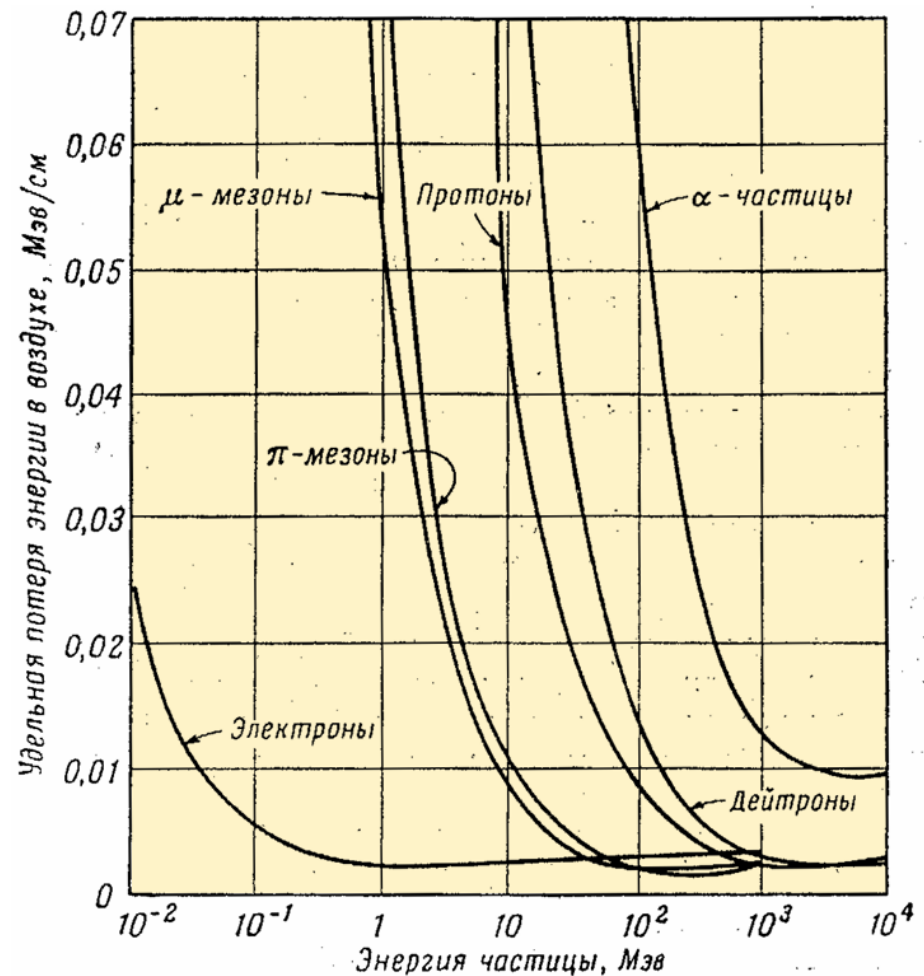
Взаимодействие частиц с веществом зависит от их типа, заряда, массы и энергии. **Заряженные частицы** ионизуют атомы вещества, взаимодействуя с атомными электронами. **Нейтроны и гамма-кванты**, сталкиваясь с частицами в веществе, передают им свою энергию, вызывая ионизацию за счет вторичных заряженных частиц.

В случае гамма-квантов основными процессами, приводящими к образованию заряженных частиц являются фотоэффект, эффект Комптона и рождение электрон-позитронных пар. Взаимодействие частиц с веществом зависит от таких характеристик вещества как его плотность, атомный номер и средний ионизационный потенциал вещества.

Тормозная способность вещества характеризуется величиной удельных ионизационных потерь энергии  $dE/dx$ .

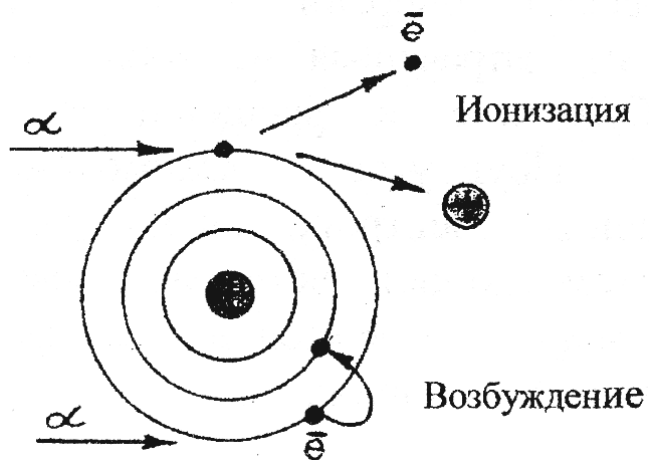
Удельные ионизационные потери энергии представляют собой отношение энергии  $E$  заряженной частицы, теряемой на ионизацию среды при прохождении отрезка  $x$ , к длине этого отрезка.

Удельные ионизационные потери энергии увеличиваются с уменьшением энергии частицы.



Зависимость удельной потери энергии в воздухе от энергии частицы для нескольких типов частиц

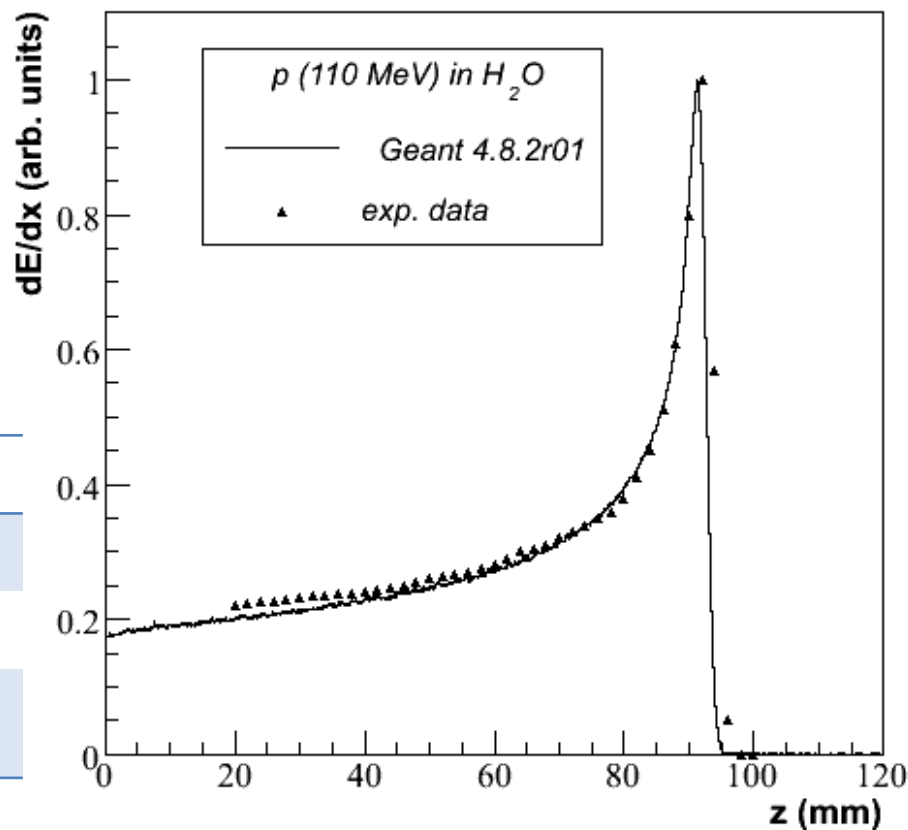
# Тяжелые частицы



- Альфа
- Осколки деления
- Протоны, ионы

Величина пробега  $\alpha$ -частицы в зависимости от энергии  $T_\alpha$

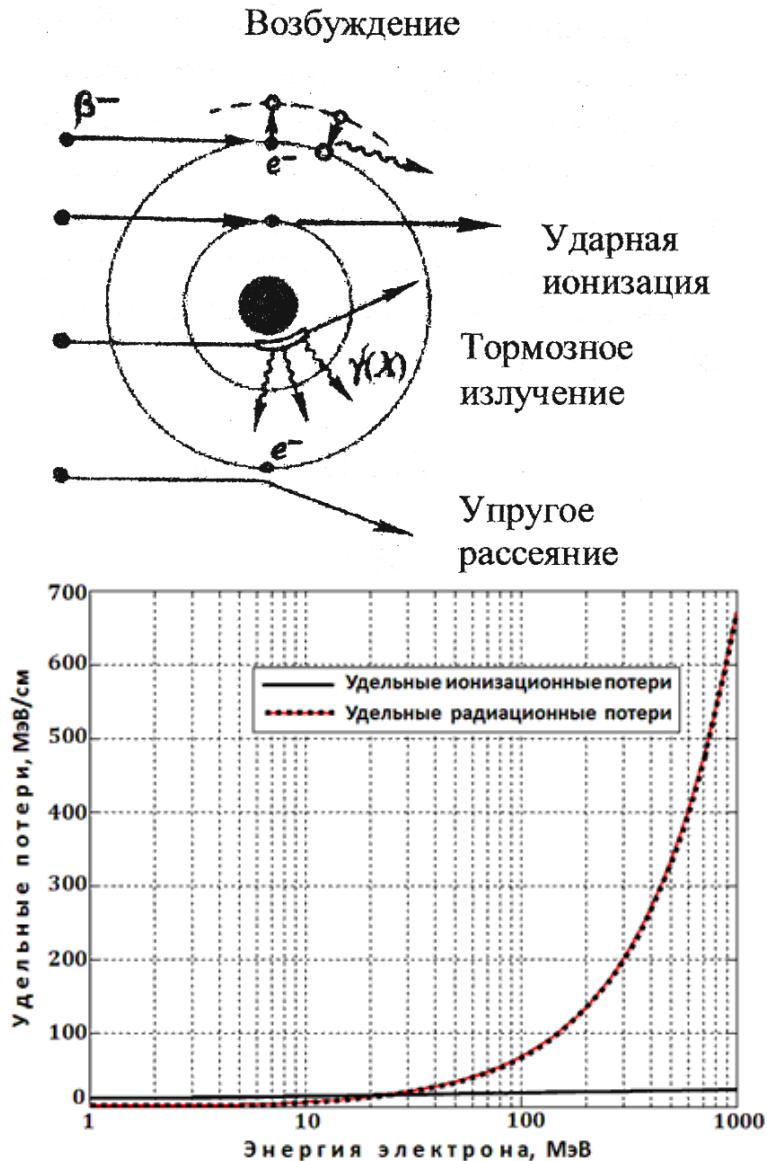
| $T_\alpha$ , МэВ | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10   |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Воздух, см       | 2,5 | 3,5 | 4,6 | 5,9 | 7,4 | 8,9 | 10,6 |
| Al, мкм          | 16  | 23  | 30  | 38  | 48  | 58  | 69   |
| Биол. ткань, мкм | 31  | 43  | 56  | 72  | 91  | 110 | 130  |



**Пик Брэгга**



# Электроны



Прохождение электронов через вещество отличается от прохождения тяжёлых заряженных частиц. Малая масса электрона приводит к относительно большому изменению импульса электрона при каждом его столкновении с частицами вещества, что вызывает заметное изменение направления движения электрона и как результат — электромагнитное радиационное излучение.

Удельные потери энергии электронов с кинетической энергией  $E$  складываются из суммы ионизационных и радиационных потерь энергии.

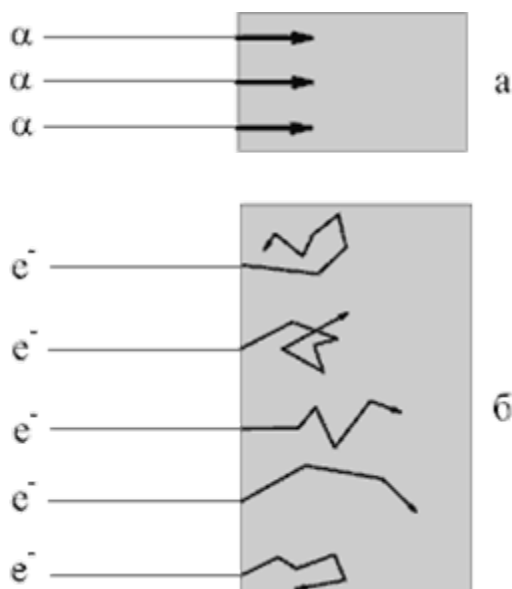
Отношение удельных радиационных и ионизационных потерь энергии  $K$  определяется зависимостью:

$$K = \frac{(dE/dx)_{\text{рад}}}{(dE/dx)_{\text{иониз}}} = 1,25 \cdot 10^{-3} ZE$$

где  $E$  выражается в МэВ,  $Z$  — средний заряд ядер атомов вещества.

# Электронны

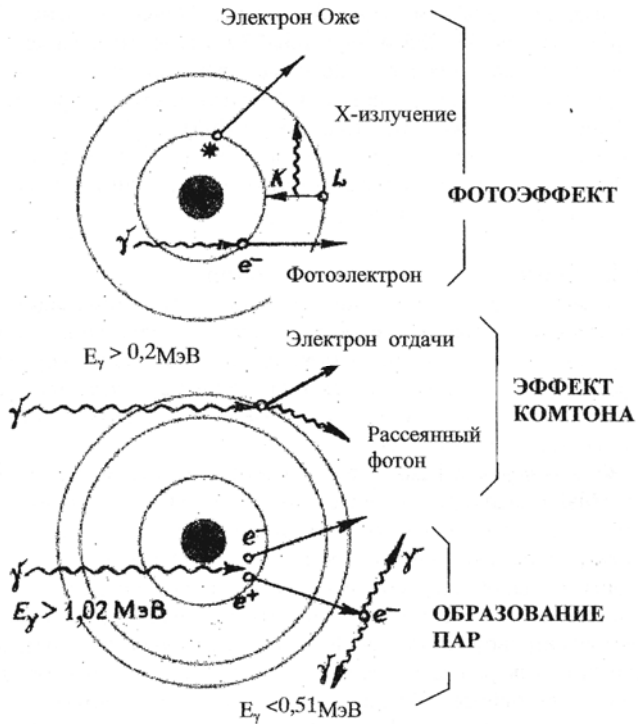
**Эффективный пробег** – минимальная толщина поглотителя, который задерживает (поглощает) все  $\beta$ -частицы с начальной энергией  $E_\beta$ .



Величина эффективного пробега электронов в зависимости от энергии

| <b>E, МэВ</b> | <b>0,05</b>         | <b>0,5</b> | <b>5</b>       | <b>50</b>        | <b>500</b>       |
|---------------|---------------------|------------|----------------|------------------|------------------|
| Воздух, см    | 4,1                 | 160        | $2 \cdot 10^3$ | $1,7 \cdot 10^4$ | $6,3 \cdot 10^4$ |
| Вода, см      | $4,7 \cdot 10^{-3}$ | 0,19       | 2,6            | 19               | 78               |
| Алюминий, см  | $2 \cdot 10^{-3}$   | 0,056      | 0,95           | 4,3              | 8,6              |
| Свинец, см    | $5 \cdot 10^{-4}$   | 0,026      | 0,30           | 1,25             | 2,5              |

# Электромагнитное излучение



**Падающие фотоны** →



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

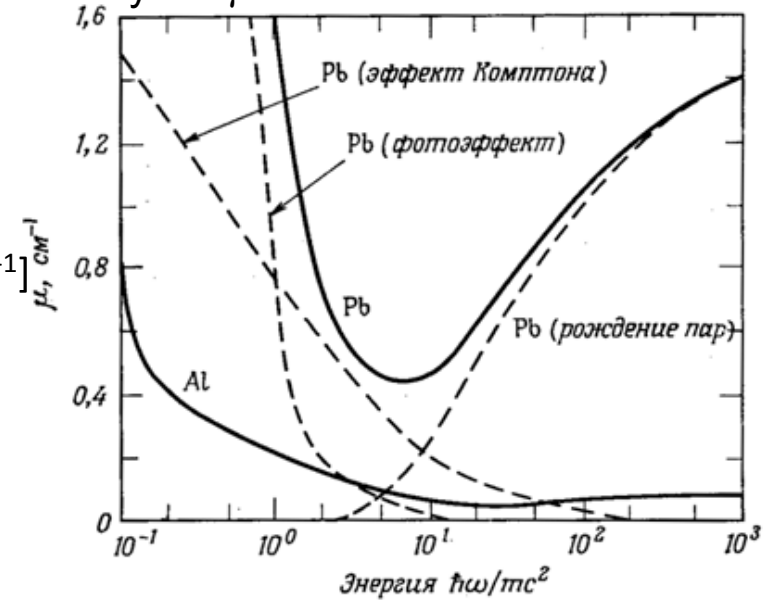
- $dI/I = -\mu dx$

- $I_x = I_0 \exp(-\mu x)$

$I$ : число фотонов на единицу площади в секунду [ $\text{с}^{-1}$ ]

$\mu = \mu_{\text{Комп}} + \mu_{\text{фото}} + \mu_{\text{пар}}$  :

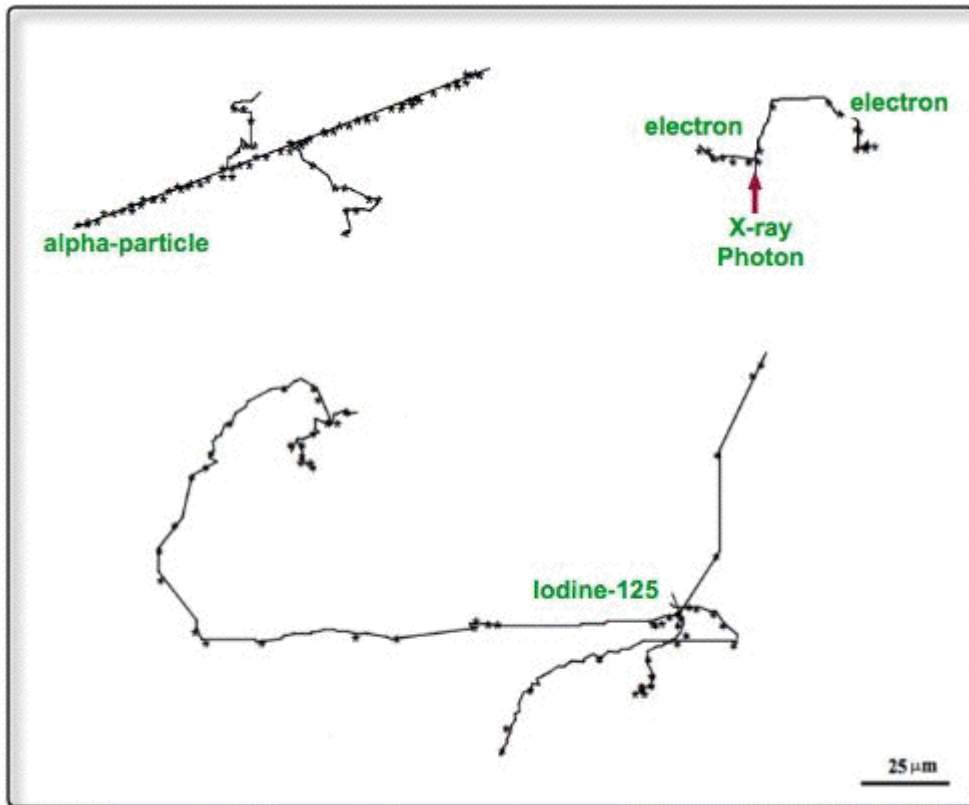
$\mu$  коэффициент линейного ослабления [ $\text{м}^{-1}$ ]



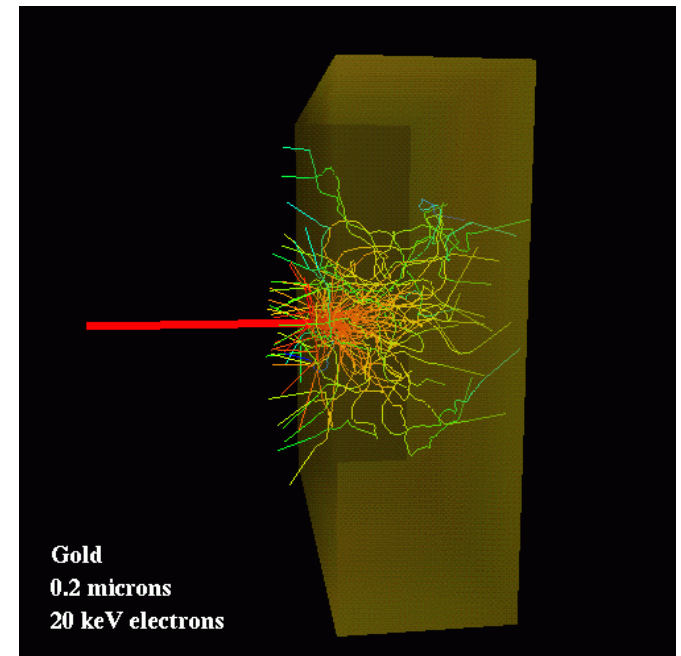
Для характеристики **проникающей способности**  $\gamma$ -квантов используют

1. значение  $1/\mu$  - средняя глубина проникновения фотонов в данный материал;
2. значение  $d_{1/2}$  - слой половинного ослабления потока  $\gamma$ -квантов.

|          | $E_{\beta} = 1,7 \text{ МэВ}$ |                | $E_{\gamma} = 1,7 \text{ МэВ}$ |                |
|----------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
|          | R, см                         | $d_{1/2}$ , см | $1/\mu$ , см                   | $d_{1/2}$ , см |
| Воздух   | 600                           | 90             | 16000                          | 23000          |
| Алюминий | 0,3                           | 0,043          | 7,8                            | 11,3           |

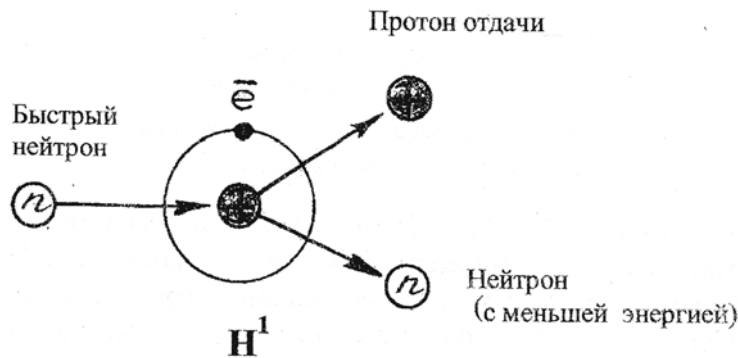


Ионизация вдоль трека частицы в воде, для  $\alpha$ -частицы 5.4 МэВ (слева вверху), для электронов, образованных в результате поглощения фотона рентгеновского диапазона 1.5 кэВ (справа вверху) и электронов, образовавшихся в результате распада изотопа иода  $^{125}\text{I}$ . Звездочками отмечены акты взаимодействия в атомами среды



Моделирование рассеяния электронов в золотой фольге

# Нейтроны



Нейтроны не имеют заряда, что позволяет им беспрепятственно проникать в глубь атомов. При этом возможно упругое и неупругое рассеяние нейтронов на ядрах.

При упругом рассеянии на ядрах углерода, азота, кислорода и других элементов, входящих в состав тканей, нейтрон теряет лишь 10-15% энергии, а при столкновении с протонами, энергия нейтрона уменьшается в среднем вдвое, передаваясь протону отдачи.

Нейтрон рассеяния отклоняется от прежнего направления и обладает меньшей энергией. Протон отдачи, получивший дополнительную энергию, движется с повышенной скоростью и вызывает ионизацию встречающихся на его пути атомов.

| $E_n$                       | Тип       | Реакция                  |
|-----------------------------|-----------|--------------------------|
| $< 0,05$ эВ ( $\sim 580$ К) | тепловые  | $(n, \gamma)$ , $(n, p)$ |
| $0,05$ эВ – $1$ кэВ         | медленные | $(n, n)$                 |
| $> 1$ кэВ                   | быстрые   | $(n, n)$ , $(n, n')$     |

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**.

| Длина свободного пробега быстрых нейтронов ( $\lambda$ ) в различных |                                  |                           |                              |          |
|--|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------|
| Материал   | Химическая формула               | Плотность $\text{г/см}^3$ | $\lambda$ (см) при энергии : |          |
|  |                                  |                           | 4 МэВ                        | 14.9 МэВ |
| Полиэтилен   | $(\text{CH}_2)_4$                | 0.92                      | 5.5                          | 13.9     |
| Плексиглас   | $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ | 1.18                      | 6.3                          | 15.2     |
| Карбид бора  | $\text{B}_4\text{C}$             | 1.67                      | 12.0                         | 17.2     |
| Графит   | C                                | 1.6                       | 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     |

# Биологическое воздействие

**Альфа-излучение** не может проникнуть сквозь кожные покровы. Пробег альфа-частиц с энергией 4 Мэв в биологической ткани составляет 31 мкм.

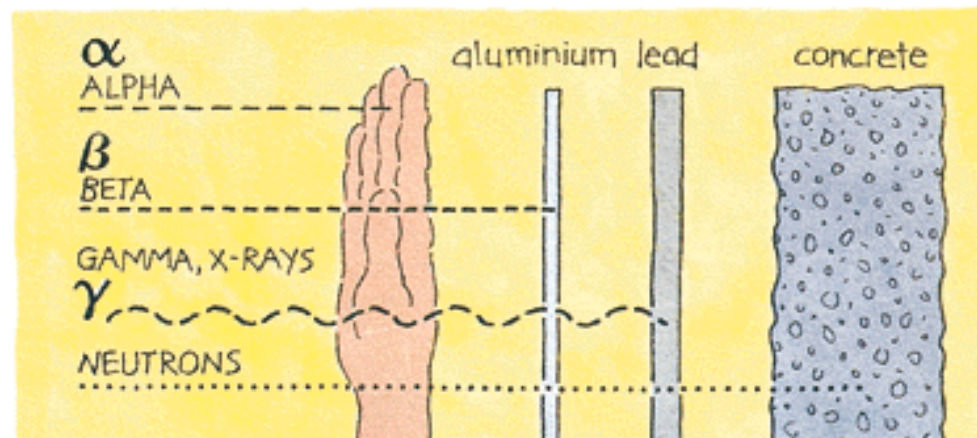
**Бета-излучение** обладает большей проникающей способностью. Пробег электронов с энергией 4 Мэв в воздухе составляет 17.8 м, а в биологической ткани 2.6 см.

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

**Тепловые нейтроны**:  $\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  ( $\sigma = 0.33$  барн) и  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  ( $\sigma = 1.76$  барн). Основной эффект воздействия на биологическую ткань происходит под действием протонов, образующихся в реакции (n,p) и теряющих всю свою энергию в месте рождения.

**Медленные нейтроны**: 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.



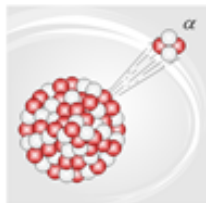


# Биологическое воздействие

| Стадия            | Процессы  | Время                   |
|-------------------|---|-------------------------|
| Физическая        | Ионизация и возбуждение атомов (молекул), прежде всего, молекул воды  | $10^{-15} - 10^{-14}$ с |
| Физико-химическая | Перераспределение поглощенной энергии внутри молекул, разрыв связей, образование свободных радикалов ( $H^*$ , $OH^*$ )   | $10^{-14} - 10^{-11}$ с |
| Химическая        | Реакции радикалов друг с другом и взаимодействие радикалов с молекулами белка, ферментов и др. Химическая модификация важных в биологическом отношении молекул. | $10^{-6} - 10^{-3}$ с   |
| Биологическая     | Последовательное поражение на всех уровнях биосистемы от субклеточного до организменного  | Секунды - годы          |

# Дозы излучения и единицы измерения

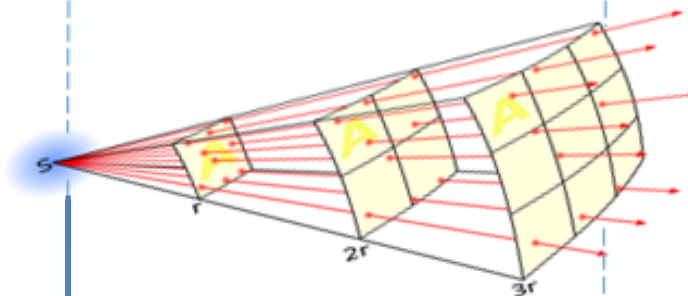
## Радиоактивный распад



### Единицы измерения

1 Беккерель (Бк) =  
= 1 распад в секунду

## Ионизирующее излучение



### Факторы, влияющие на прохождение излучения

- Расстояние ( $1/r^2$ )
- Рассеяние
- Поглощение

## Регистрация



### Единицы измерения

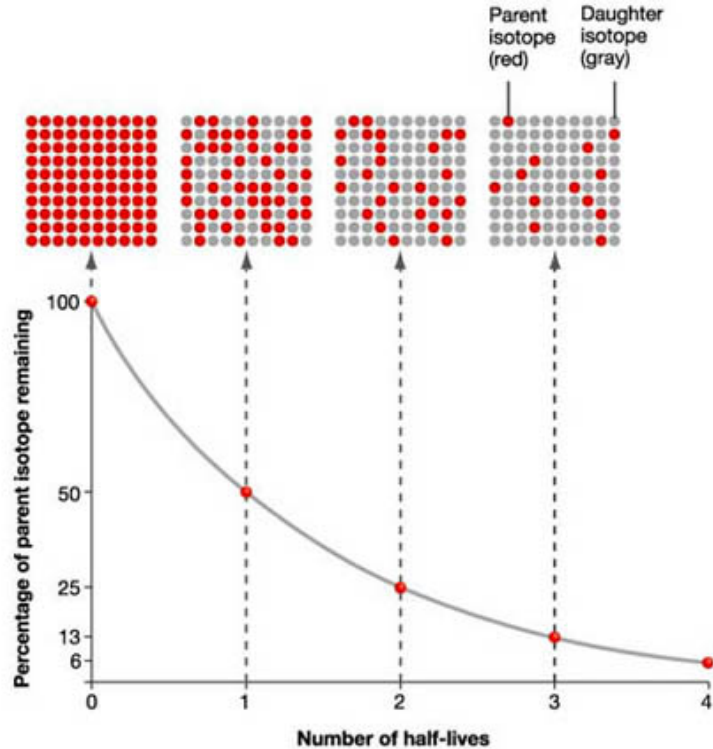
#### Доза:

- Поглощенная (физическая) - Грей (Гр)
- Эквивалентная (биологическая) - Зиверт (Зв)

#### Число отсчетов:

- В секунду
- В минуту

# Основной закон радиоактивного распада



**Активность  $A$**  (радиоактивность) – число ядер, распадающихся в единицу времени.

Ядра распадаются независимо друг от друга, каждое ядро может распасться в любой момент => активность пропорциональна числу радио-активных ядер  $N$  в образце. Закономерности распада атомных ядер наблюдаются только в среднем, при распаде достаточно большого числа ядер.

$$a_t = a_0 \exp(-\lambda t) = a_0 e^{-\lambda t}$$

$\lambda$  (постоянная распада) характеризует неустойчивость ядер.

Период полураспада

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Средняя продолжительность жизни ядер

$$T_{cp} = 1 / \lambda$$

# АКТИВНОСТЬ

Единица измерения активности – число распадов в секунду

• **1 Беккерель = 1 распад/сек**

• **1 Кюри =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк**

• Активность может измеряться в числе распадов на единицу объема или массы

Картофель = 170 Бк/кг

Зерна кофе = 490 Бк/кг

Бананы = 130 Бк/кг

Гранит = 1000 Бк/кг

Угольная зола = 2000 Бк/кг

Радиоактивность человека по  $^{40}\text{K}$  – 5500 Бк, по  $^{14}\text{C}$  - 3000Бк

**Радиоактивный источник для терапии  $\sim 10^{14}$  Бк**

$^{239}\text{Pu}$  =  $2,3 \cdot 10^{12}$  Бк/кг = 63 Ки/кг

Специальных условий (например, защиты) требует применение радионуклидов, имеющих  $A > 10^8$  Бк (очень приблизительная оценка)

# Экспозиционная доза (X)

**Экспозиционная доза** пропорциональна количеству ионов, которые создают **гамма-** и **рентгеновское** излучения в единице массы воздуха. Ее принято измерять в рентгенах (Р).

$$X = dQ/dm$$

**dQ** -- заряд вторичных частиц, образующихся в массе вещества **dm** при полном торможении всех заряженных частиц .

1 Ренген (Р) = доза **рентгеновского или гамма** излучения , создающая в 1 см<sup>3</sup> воздуха при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст. суммарный заряд ионов одного знака в одну электростатическую единицу количества электричества.

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

Для рентгеновской аппаратуры часто используются единицы экспозиционной дозы мР/час.

# Поглощенная доза (D)

*Поглощенная доза* — количество энергии излучения, поглощенное единицей массы вещества.

$$D = dE/dm$$

Единица поглощённой дозы – **грей** (Гр).

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад} = 10^4 \text{ эрг/г.}$$

Внесистемная единица **рад** определяется как поглощённая доза любого ионизирующего излучения, равная 100 эрг на 1 грамм облучённого вещества.

# Эквивалентная доза (H)

**Эквивалентная доза** дополнительно учитывает разницу в разрушительной способности разных типов радиации. Ранее ее измеряли в «биологических эквивалентах рада» — бэрах (бэр), сейчас — в зивертах (Зв).

$$H = \sum W_r D_r$$

$D_r$  --- поглощённая доза, созданная облучением  $r$  и усреднённая по анализируемому органу или по всему организму,

$W_r$  --- коэффициент качества излучения.

|         | $\gamma$ | $\beta$ | Нейтроны |            |         |        |      | $p$ | $\alpha$ |
|---------|----------|---------|----------|------------|---------|--------|------|-----|----------|
| E (МэВ) |          |         | < 0,01   | 0,01 ÷ 0,1 | 0,1 ÷ 2 | 2 ÷ 20 | > 20 |     |          |
| $W_r$   | 1        | 1       | 5        | 10         | 20      | 10     | 5    | 5   | 20       |

**Эффективная эквивалентная доза ( $E_{эфф}$ )** учитывает различную чувствительность органов к радиации: так, облучать руку менее опасно, чем спину или грудь.

$$E_{эфф} = \sum W_t H_t$$

## Основные радиологические величины и единицы

| Величина                      | Наименование и обозначение единицы измерения |                           | Соотношения между единицами   |
|-------------------------------|--|---------------------------|---|
|                               | Внесистемные                                 | Си                        |   |
| Активность нуклида, <b>A</b>  | Кюри (Ки, Ci)                                | Беккерель (Бк, Bq)        | $1 \text{ Ки} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$<br>$1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с}$<br>$1 \text{ Бк} = 2.7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$    |
| Экспозиционная доза, <b>X</b> | Рентген (Р, R)                               | Кулон/кг<br>(Кл/кг, C/kg) | $1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$<br>$1 \text{ Кл/кг} = 3.88 \cdot 10^3 \text{ Р}$                                       |
| Поглощенная доза, <b>D</b>    | Рад (рад, rad)                               | Грей (Гр, Gy)             | $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$<br>$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$  |
| Эквивалентная доза, <b>H</b>  | Бэр (бэр, rem)                               | Зиверт (Зв, Sv)           | $1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$<br>$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$  |
| Интегральная доза излучения   | Рад-грамм<br>(рад·г, rad·g)                  | Грей·кг<br>(Гр·кг, Gy·kg) | $1 \text{ рад} \cdot \text{г} = 10^{-5} \text{ Гр} \cdot \text{кг}$<br>$1 \text{ Гр} \cdot \text{кг} = 10^5 \text{ рад} \cdot \text{г}$ |



# Воздействие на человека

- **Соматические** (телесные) – возникающие в организме человека, который подвергался облучению;
- **Генетические** – связанные с повреждением генетического аппарата и проявляющиеся в последующих поколениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки человека, подвергшегося облучению.

| Соматические эффекты  | Генетические эффекты                    |
|---|---|
| Лучевая болезнь<br>Локальные лучевые поражения<br>Лейкозы<br>Опухоли разных органов | Генные мутации<br>Хромосомные aberrации |

# Воздействие на человека

| Доза, мЗв           | Причина и результат воздействия  |
|---------------------|--|
| 0.7 ÷ 2             | Доза от естественных источников в год  |
| 50                  | Предельно допустимая доза профессионального облучения в год  |
| 100                 | Уровень удвоения вероятности генных мутаций  |
| 250                 | Однократная доза оправданного риска в чрезвычайных обстоятельствах   |
| 1 000               | Доза возникновения острой лучевой болезни  |
| 3 000 ÷ 5 000       | Без лечения 50% облученных умирает в течение 1–2 месяцев вследствие нарушения деятельности клеток костного мозга |
| $(10 \div 50) 10^3$ | Смерть наступает через 1–2 недели вследствие поражений главным образом желудочно-кишечного тракта                |
| $10^5$ (100 Зв)     | Смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы               |

# Пределные дозы

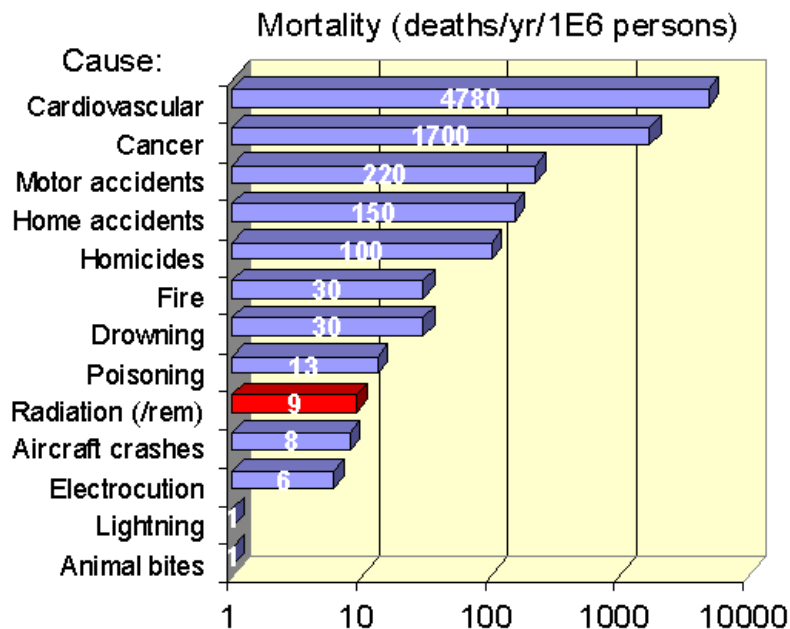
| Нормируемые величины      | Пределы доз  |  |
|---------------------------|--|--|
|                           | Персонал (группа А)  | Население  |
| Эффективная доза          | <b>20 мЗв в год</b> в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более <b>50 мЗв в год</b> | <b>1 мЗв в год</b> в среднем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

Предел индивидуального пожизненного риска (вероятности возникновения у человека какого-либо эффекта в результате облучения) в условиях нормальной эксплуатации для техногенного облучения в течение года персонала принимается равным  $1.0 \cdot 10^{-3}$ , а для населения –  $5.0 \cdot 10^{-5}$ . Уровень пренебрежимого риска составляет  $10^{-6}$ .

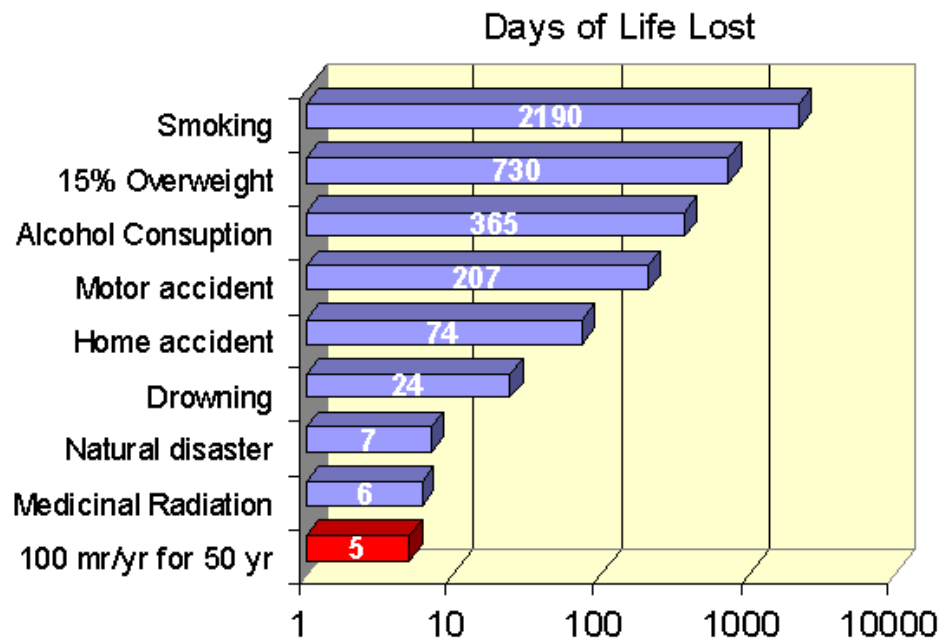
## Эффективные эквивалентные годовые дозы (в среднем по всему земному шару)

| Источник<br>(или вид деятельности)                                       | Доза на 1<br>человека в<br>среднем , мЗв | Типичные<br>индивидуальны<br>е дозы, мЗв |
|--|--|--|
| Естественный фон   | 3,1                                      | 1,0 – 5,0                                |
| Медицинская  | 0,5 – 0,1                                | 0,1 – 10,0                               |
| Профессиональное<br>облучение  | 0,002                                    | 0,5 – 5,0                                |
| Производство ядерной<br>энергии  | 0,0002                                   | 0,001 – 0,1                              |
| Все ядерные взрывы и<br>все аварии, связанные с<br>утечкой радионуклидов | 0,04                                     | 0,01                                     |

# Воздействие на человека. Риски



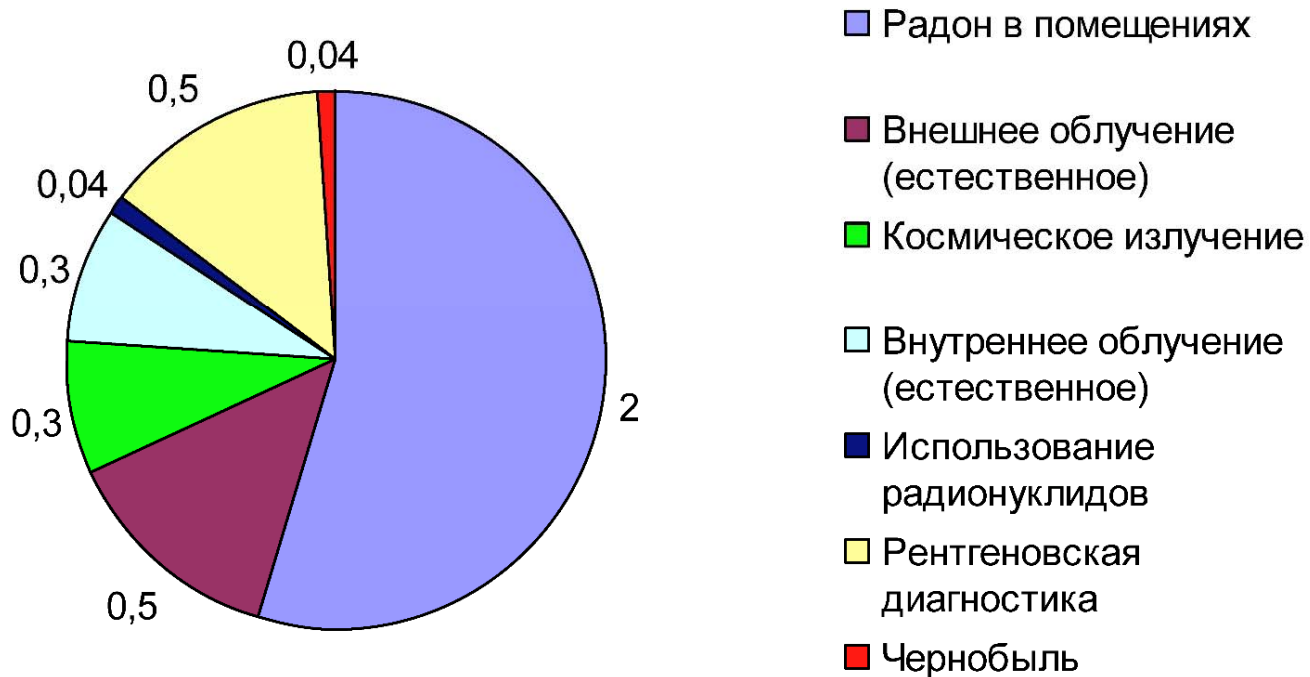
Количество смертей на 1 млн. чел. в год (США, 2002 г)

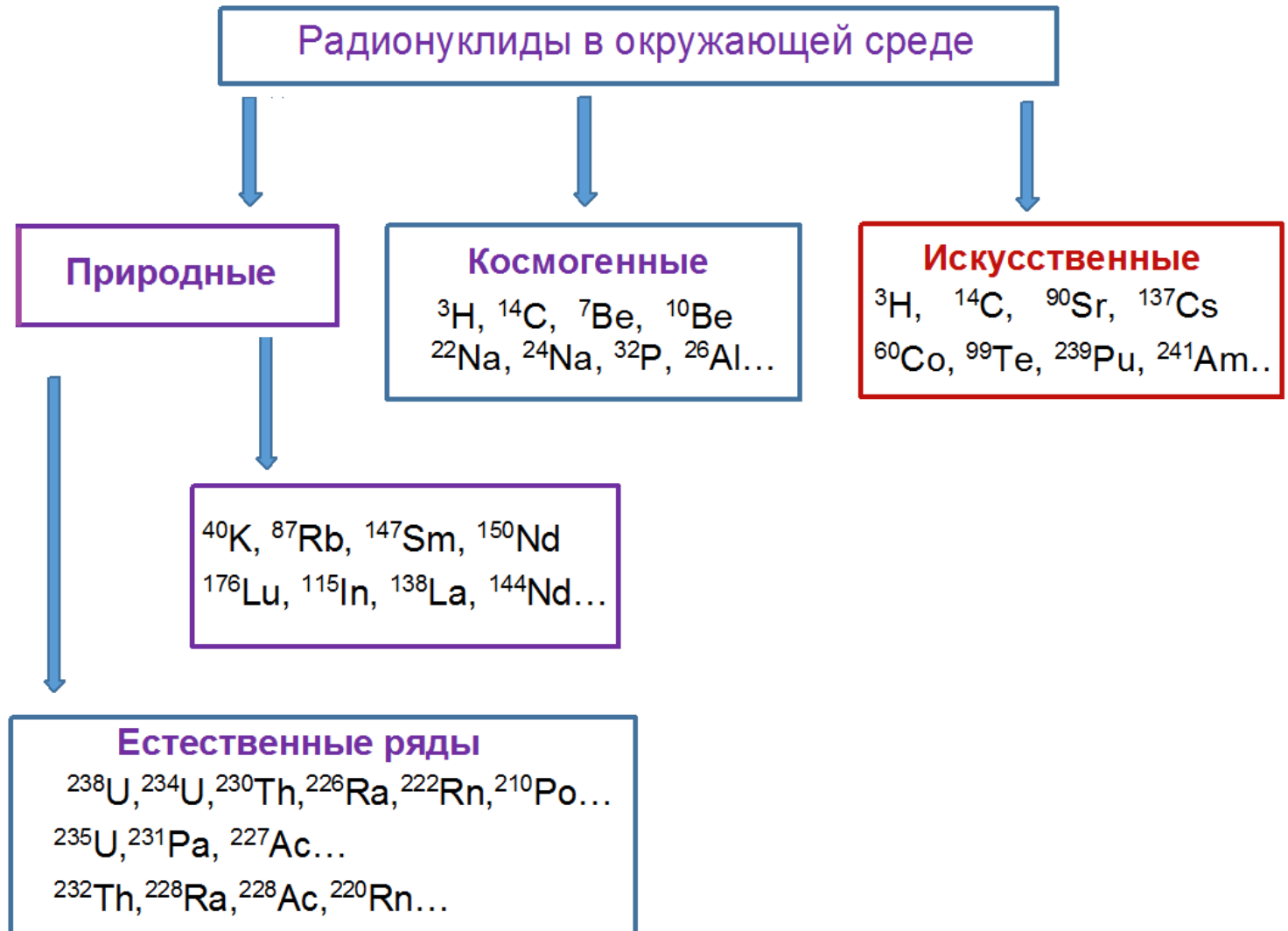


Уменьшение продолжительности жизни (США, 2002 г)

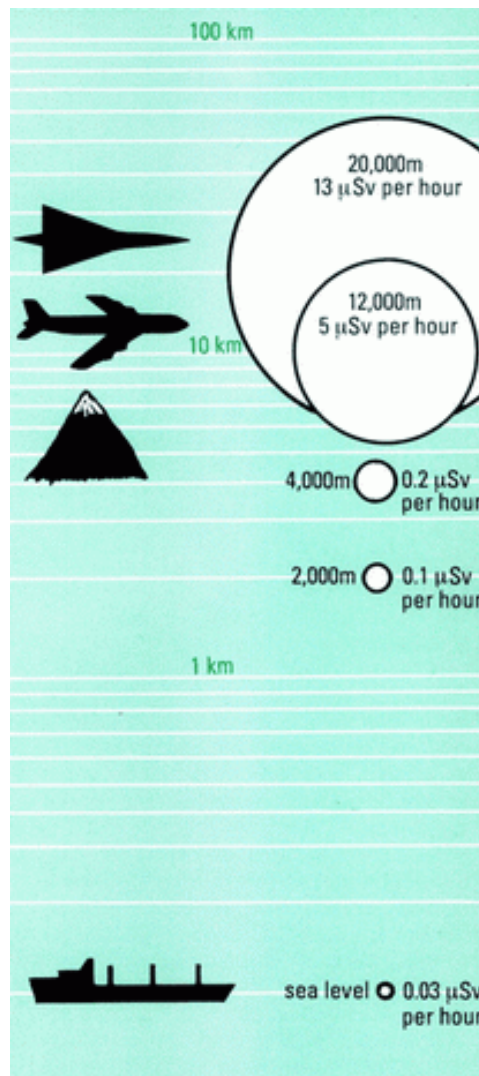
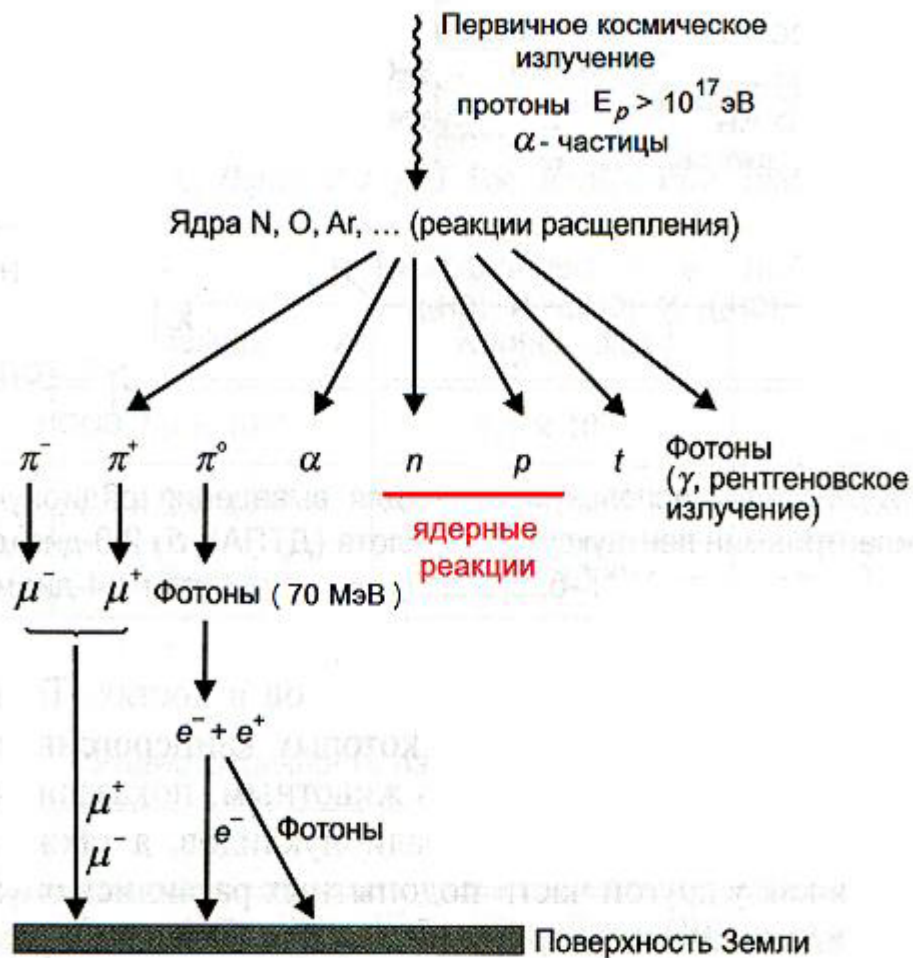
# Естественный фон

Эффективные эквивалентные годовые дозы  
(в среднем по всему земному шару), мЗв





# Космические лучи

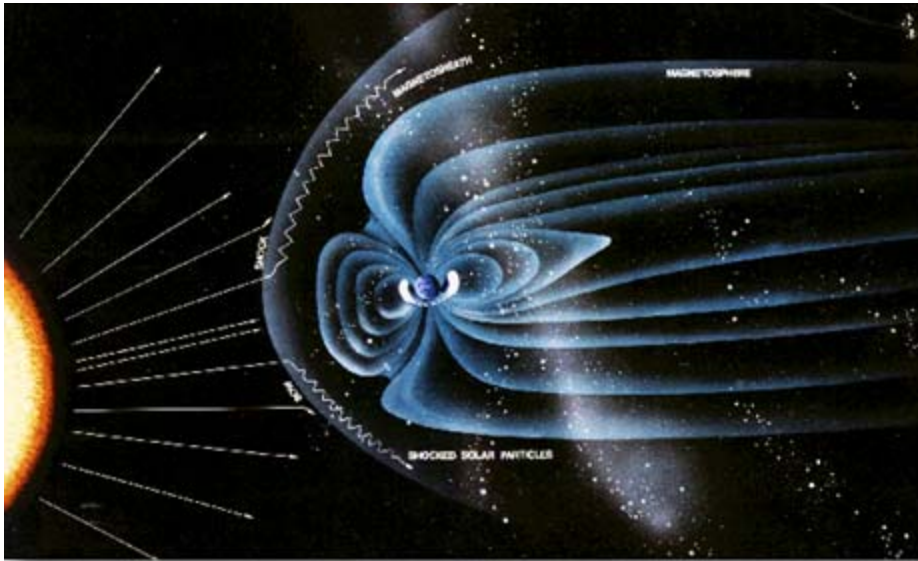


5 мкЗв/час

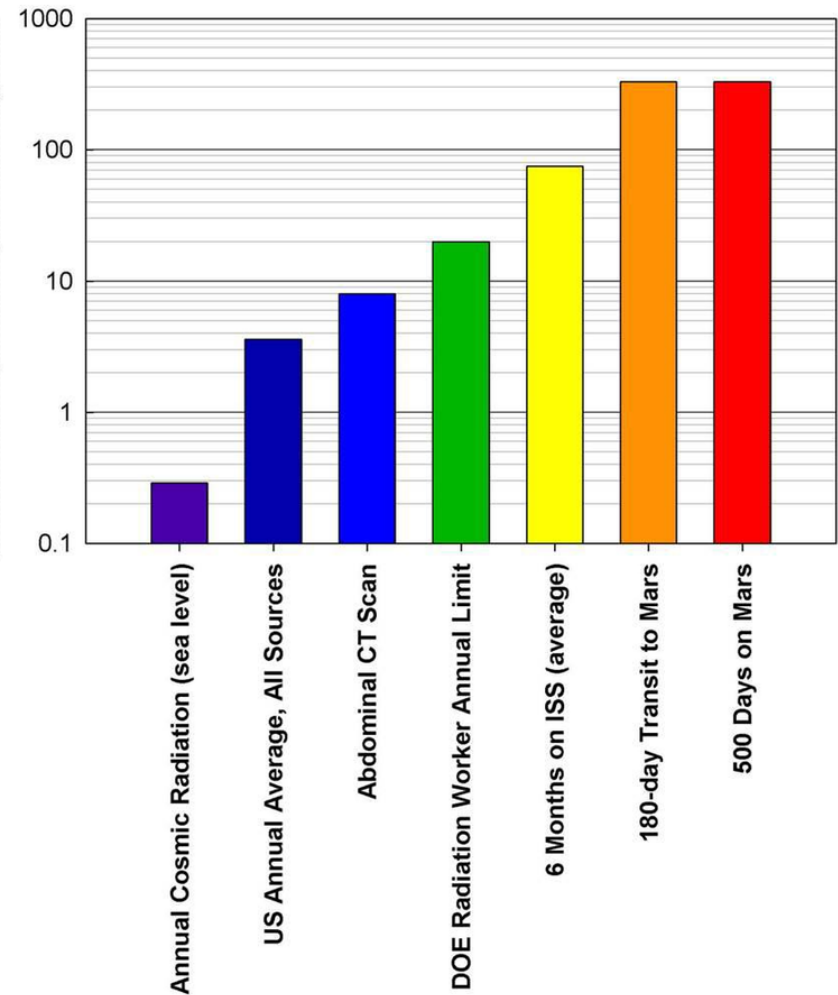
0,03 мкЗв/час



# Космические лучи

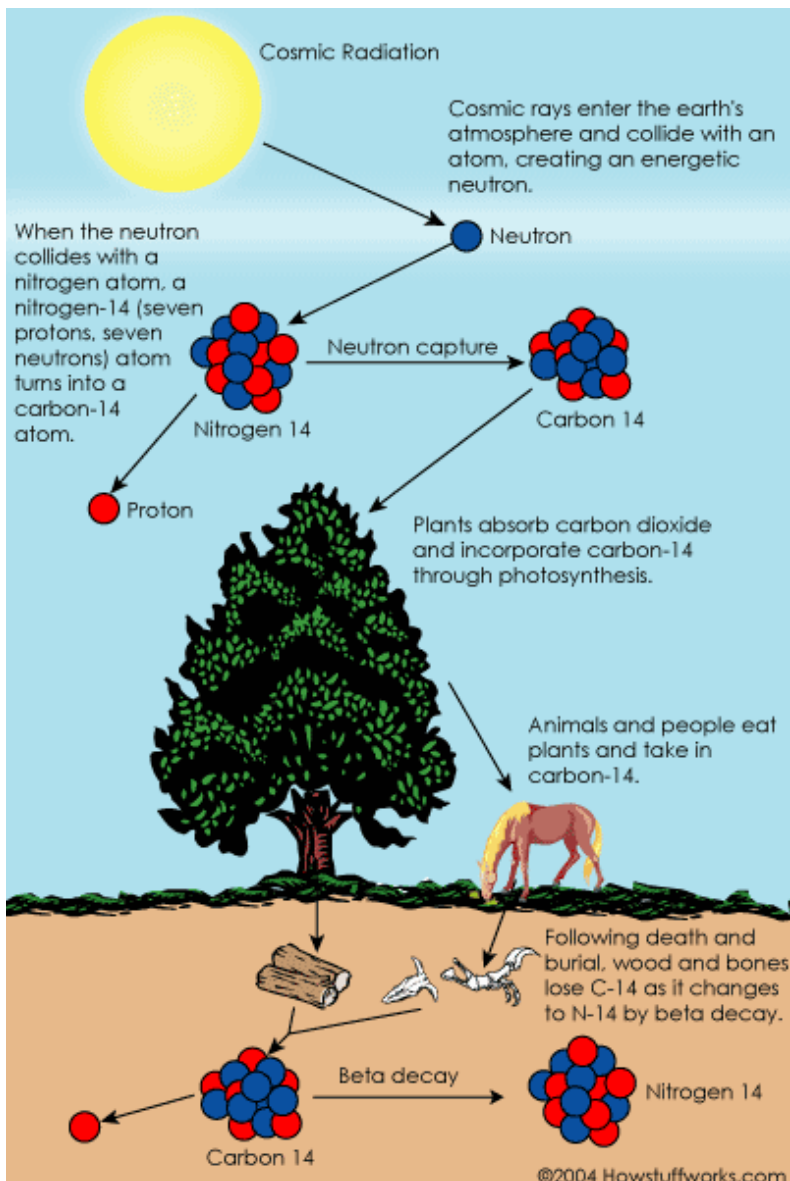


За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около **0.35 мЗв /год**.  
Эффективная доза от глобальных авиаперевозок составляет на душу населения в мире в среднем около **1 мкЗв/год**, а в Северной Америке около **10 мкЗв**.



МКС (400 км) – 1 мЗв/день

# Космогенные радионуклиды



В создание дозы наибольший вклад вносят  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{C}$  и  ${}^{22}\text{Na}$  которые поступают вместе с пищей в организм человека

Среднее годовое поступление космогенных радионуклидов в организм человека

| Радионуклид        | Поступление, Бк/год | Годовая эффективная доза, мкЗв |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|
| ${}^3\text{H}$     | 250                 | 0.004                          |
| ${}^7\text{Be}$    | 50                  | 0.002                          |
| ${}^{14}\text{C}$  | 20000               | <b>12</b>                      |
| ${}^{22}\text{Na}$ | 50                  | 0.15                           |

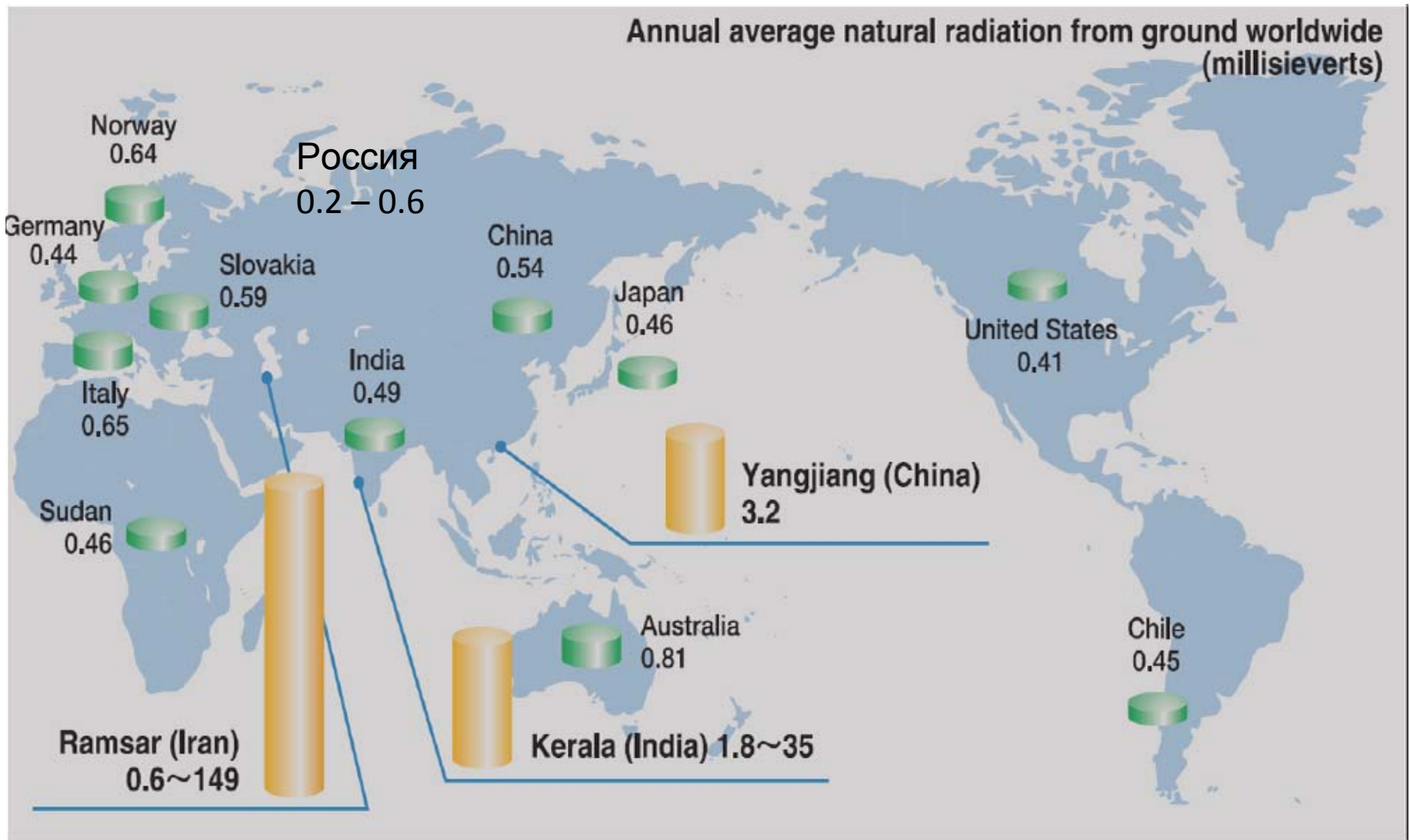
Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет около **15 мкЗв/год.**

# Земные радионуклиды

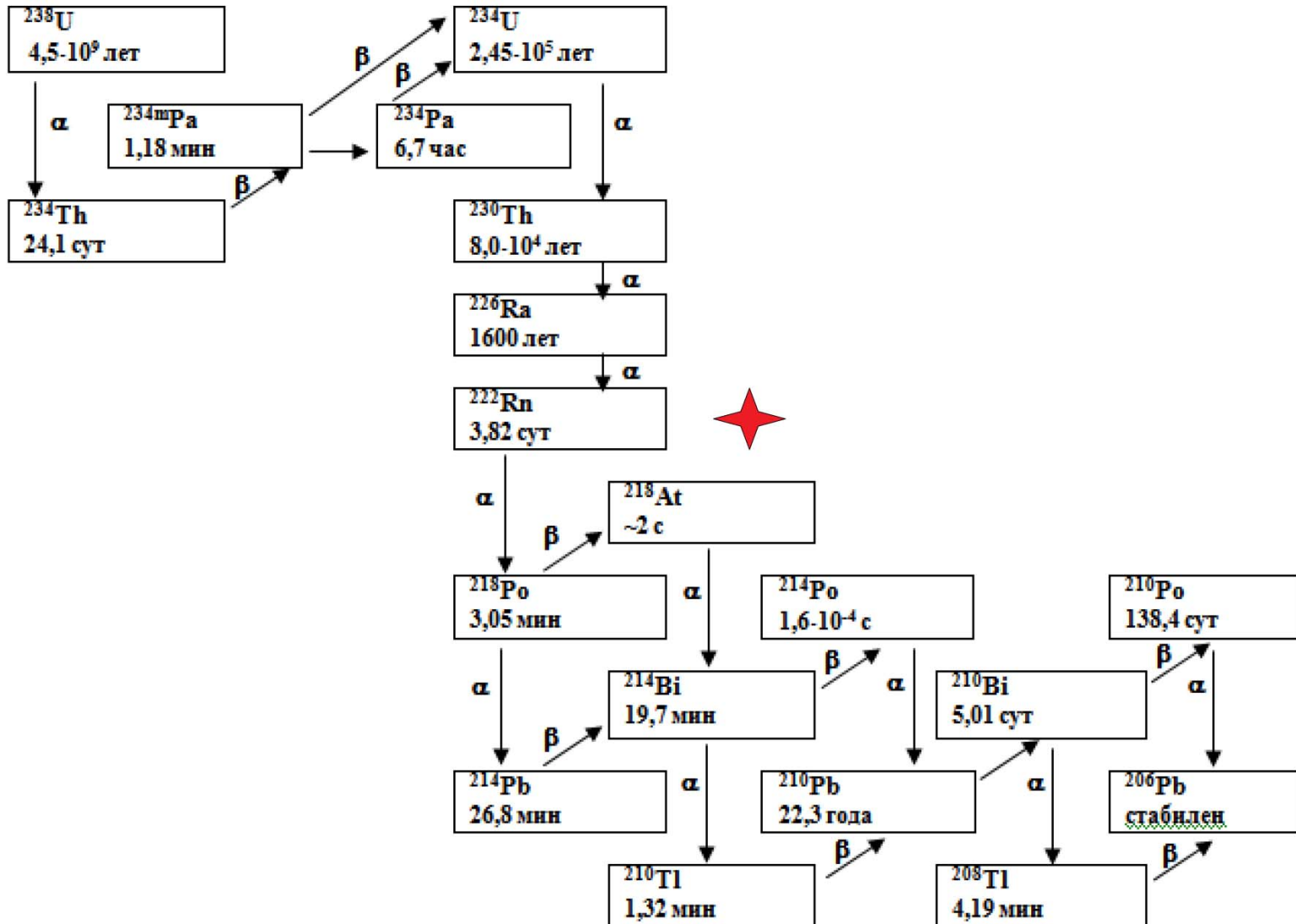
| Радиоактивные изотопы, изначально присутствующие на Земле. |                                  |                          |                                    |
|--|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Радионуклид  | Весовое содержание в земной коре | Период полураспада, лет: | Тип распада:                       |
| Уран-238   | $3 \cdot 10^{-6}$                | $4.5 \cdot 10^9$         | $\alpha$ -распад                   |
| Торий-232  | $8 \cdot 10^{-6}$                | $1.4 \cdot 10^{10}$      | $\alpha$ -распад, $\gamma$ -распад |
| Калий-40   | $3 \cdot 10^{-16}$               | $1.3 \cdot 10^9$         | $\beta$ -распад, $\gamma$ -распад  |
| Ванадий-50   | $4.5 \cdot 10^{-7}$              | $5 \cdot 10^{14}$        | $\gamma$ -распад                   |
| Рубидий-87   | $8.4 \cdot 10^{-5}$              | $4.7 \cdot 10^{10}$      | $\beta$ -распад                    |
| Индий-115  | $1 \cdot 10^{-7}$                | $6 \cdot 10^{14}$        | $\beta$ -распад                    |
| Лантан-138   | $1.6 \cdot 10^{-8}$              | $1.1 \cdot 10^{11}$      | $\beta$ -распад, $\gamma$ -распад  |
| Самарий-147  | $1.2 \cdot 10^{-6}$              | $1.2 \cdot 10^{11}$      | $\alpha$ -распад                   |
| Лютеций-176  | $3 \cdot 10^{-8}$                | $2.1 \cdot 10^{10}$      | $\beta$ -распад, $\gamma$ -распад  |

Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет около **0.35 мЗв**

# Земные радионуклиды



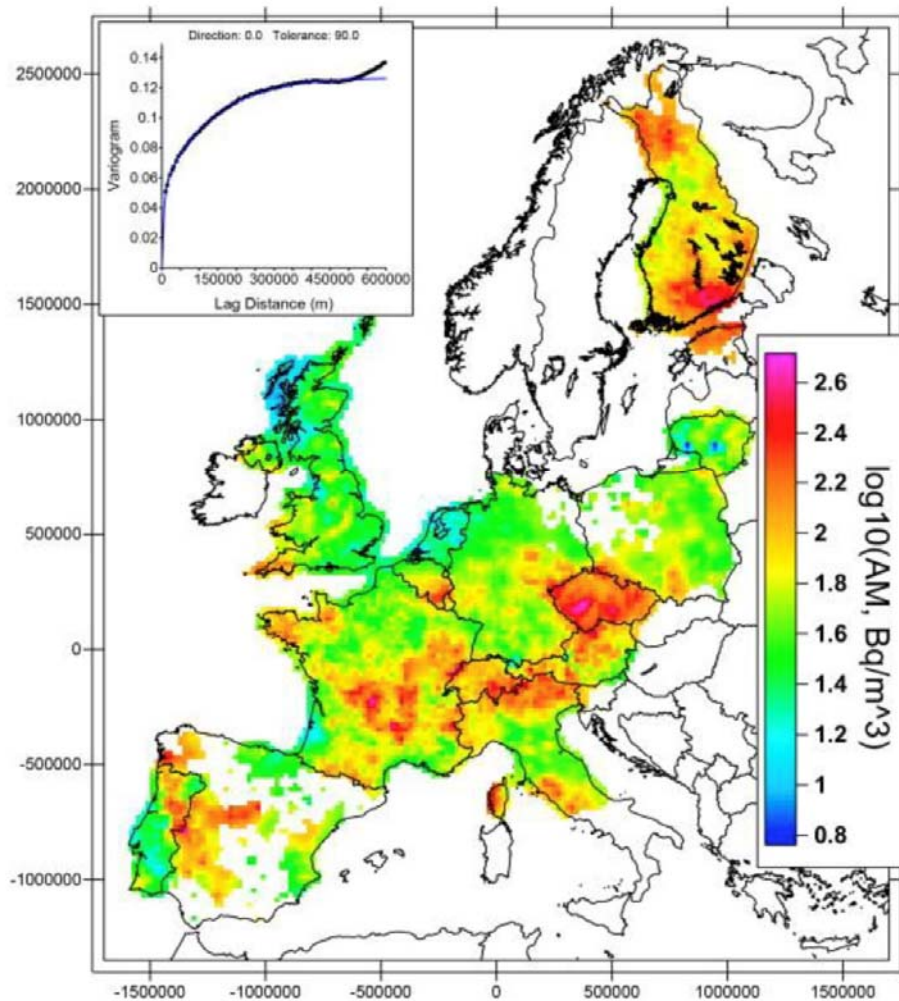
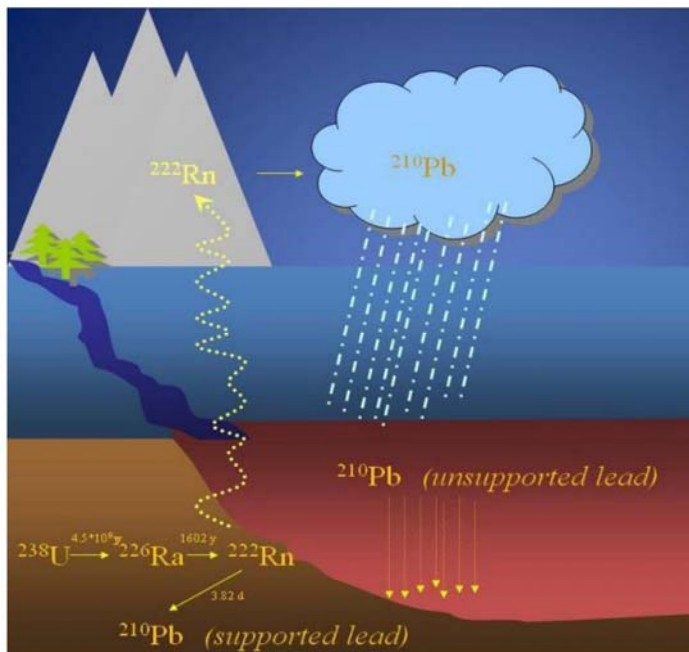
## Ряд урана-238



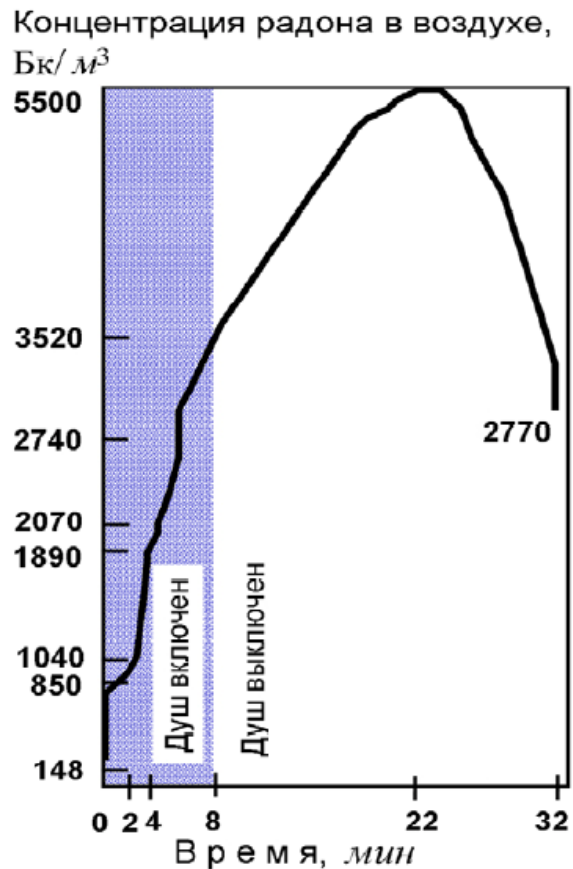


# Радон

радон-222 в помещениях



# Радон



| Мощность излучения различных источников радона |                             |
|--|-----------------------------|
| Источник радона                                | Мощность излучения, кБк/сут |
| Природный газ                                  | 3                           |
| Вода   | 4                           |
| Наружный воздух                                | 10                          |
| Стройматериалы, грунт под зданием              | 60                          |

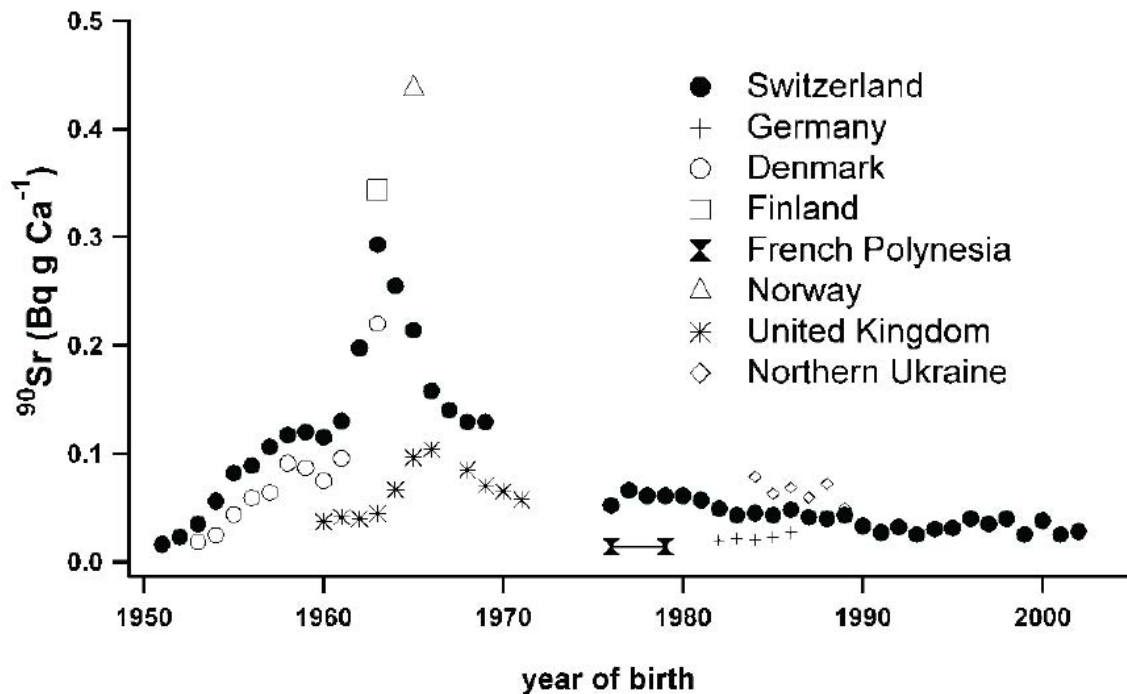
# Земные радионуклиды

## Внутреннее облучение

| Тело человека (70 кг)   |                       |       | Доза,      |
|-------------------------|-----------------------|-------|------------|
| Нуклид                  | $T_{1/2}$             | A, Бк | мкЗв/год   |
| $^{40}\text{K}$         | $1,28 \cdot 10^9$ лет | 4 400 | 180        |
| $^{14}\text{C}$         | 5700 лет              | 3 200 | 10         |
| $^{226}\text{Ra}$       | 1600 лет              | 1,5   | 13         |
| $^{210}\text{Po}$       | 160 сут               | 19,5  | 130        |
| $^{220}\text{Ra}$       | 54 сек                |       | 170 - 220  |
| $^{222}\text{Ra}$       | 3,8 сут               |       | 800 - 1000 |
| $^{90}\text{Sr}$ (1973) | 30 лет                | 48    | 45         |

Средняя доза внутреннего облучения за счет радионуклидов земного происхождения составляет **1.35 мЗв/год.**





Pascal Froidevaux, Max Haldimann and François Bochud (2011). Long-Term Effects of Exposure to Low-Levels of Radioactivity: a Retrospective Study of  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{90}\text{Sr}$  from Nuclear Bomb Tests on the Swiss Population, Nuclear Power - Operation, Safety and Environment, Dr. Pavel Tsvetkov (Ed.), ISBN: 978-953-307-507-5

Fig. 1.  $^{90}\text{Sr}$  activities (Bq/gCa) in milk teeth as a function of the year of birth of the children.

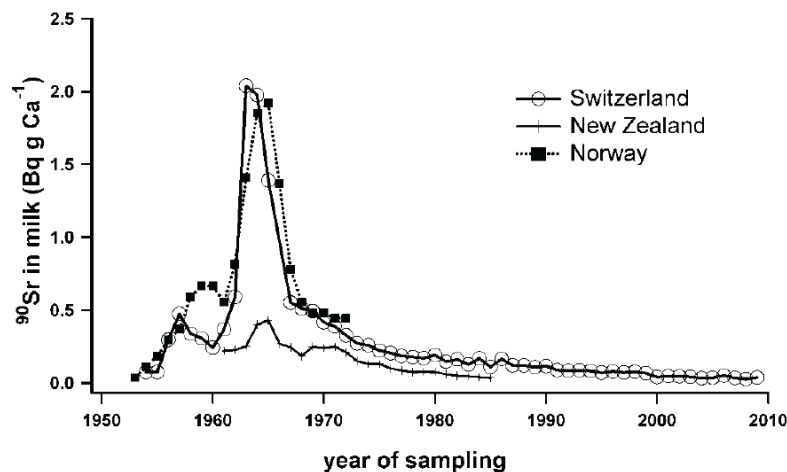


Fig. 2.  $^{90}\text{Sr}$  activities (Bq/gCa) in milk sampled in Switzerland, Norway and New-Zealand.

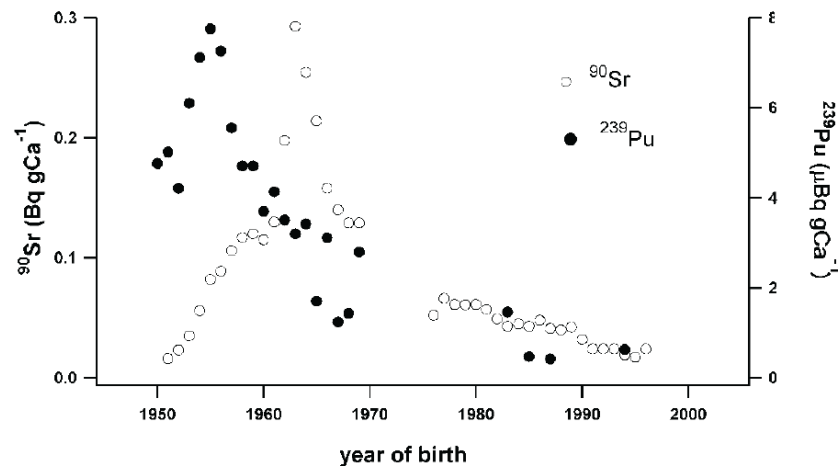
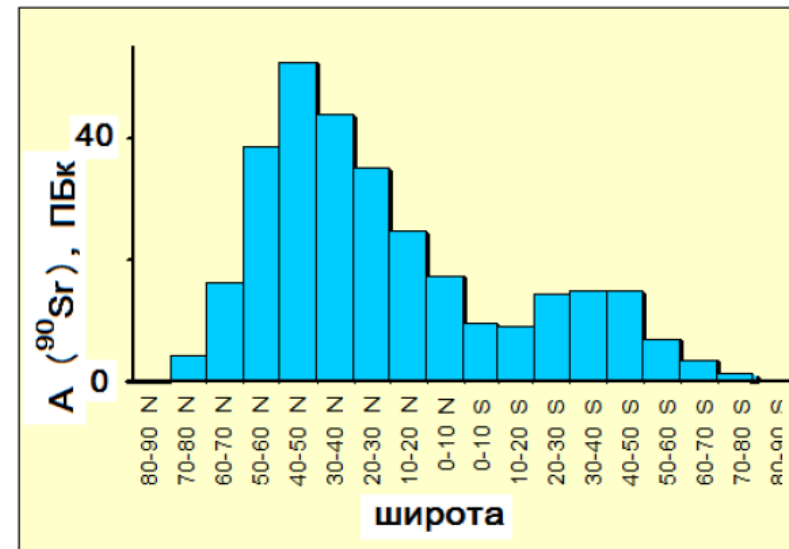
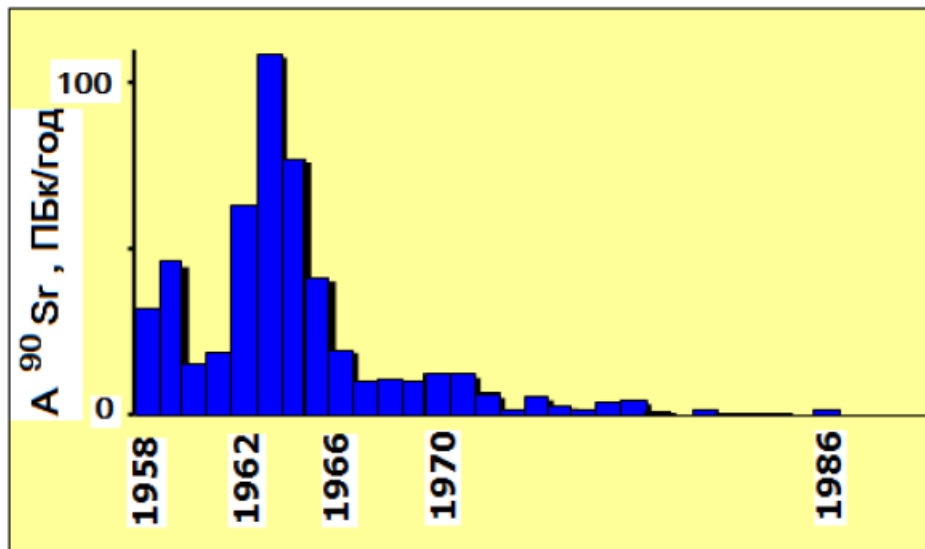
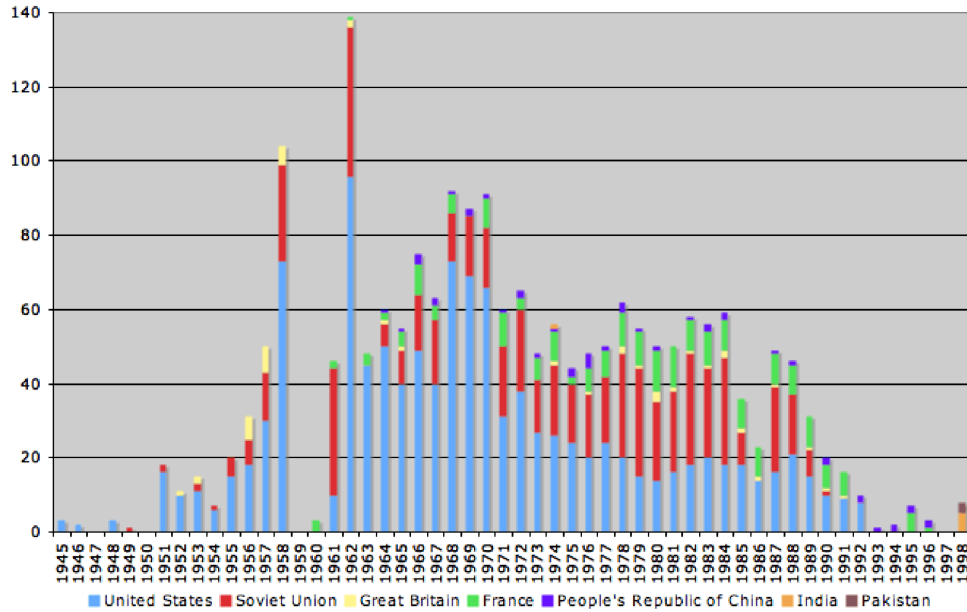


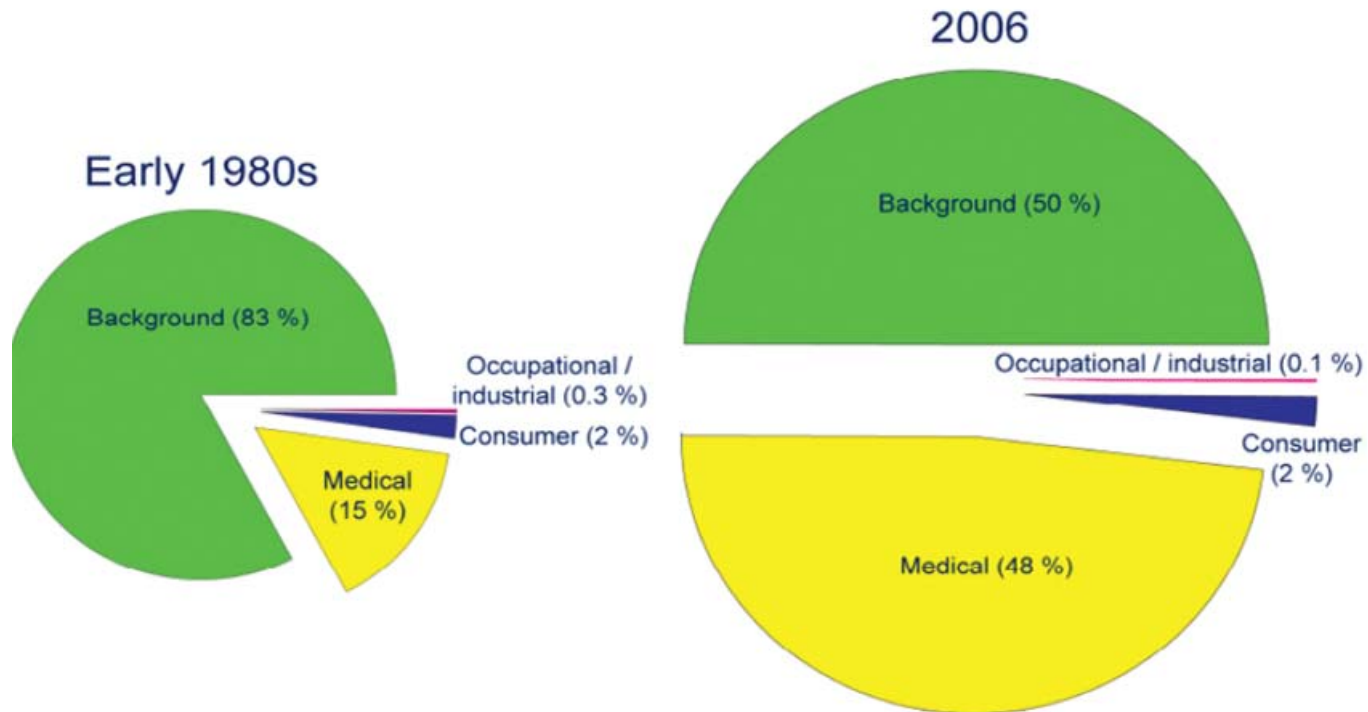
Fig. 4.  $^{239}\text{Pu}$  (mBq/gCa) and  $^{90}\text{Sr}$  (Bq/gCa) activities in milk teeth of children born in Switzerland 1950-1996.

# Ядерные испытания

Worldwide nuclear testing, 1945-1998



# Медицина



|  | Early 1980s | 2006      |
|--|-------------|-----------|
| Collective effective dose (person-Sv)                      | 835,000     | 1,870,000 |
| Effective dose per individual in the U.S. population (mSv) | 3.6         | 6.2       |