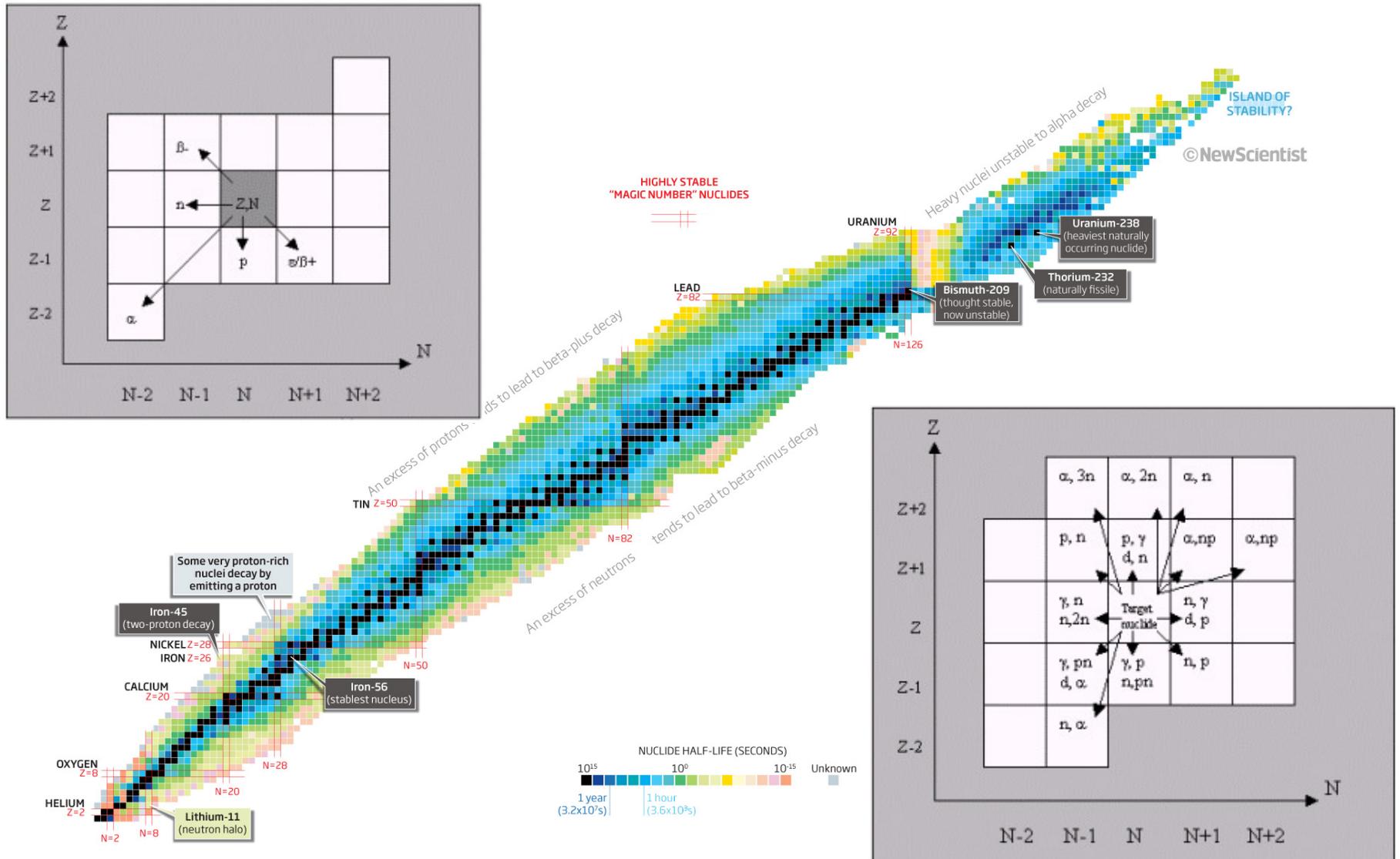




Ядерная физика и Человек

Радиация

Ядерные превращения



Корпускулярное излучение

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

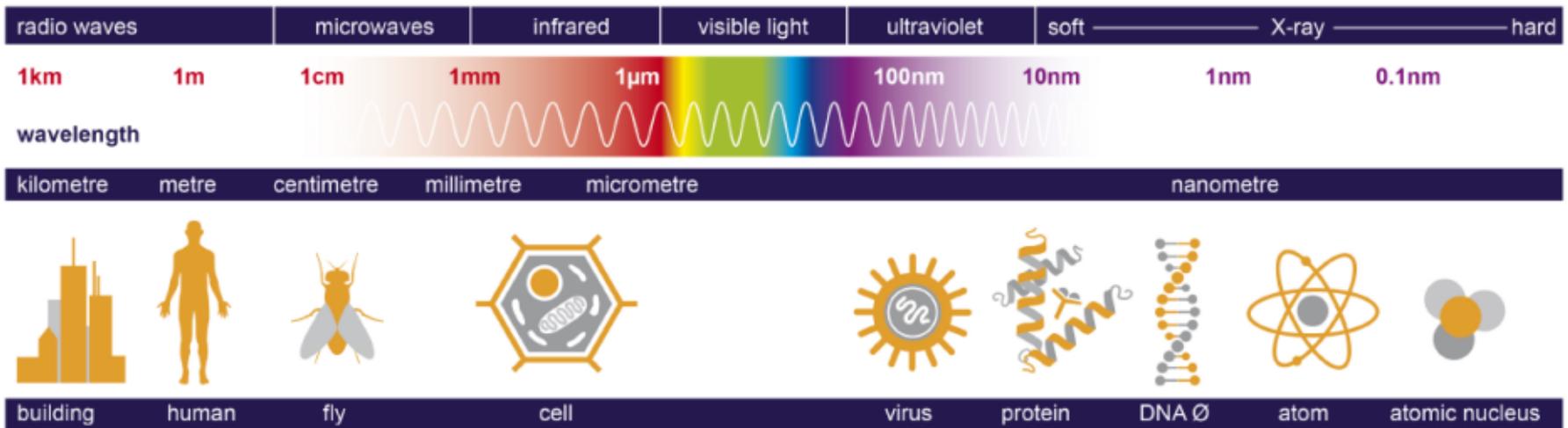
Электромагнитное излучение

Энергия, эВ

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

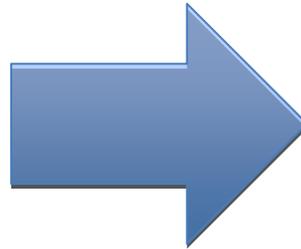
Частота, Гц

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

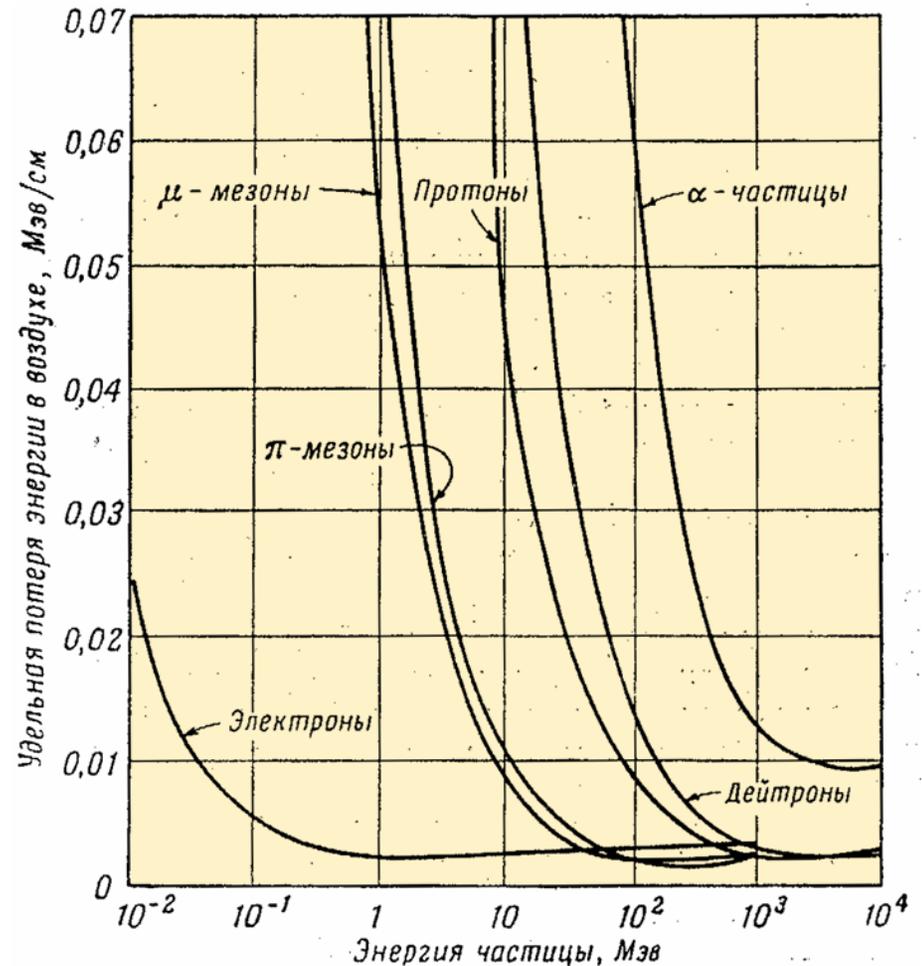
Взаимодействие частиц с веществом зависит от их типа, заряда, массы и энергии. **Заряженные частицы** ионизуют атомы вещества, взаимодействуя с атомными электронами. **Нейтроны и гамма-кванты**, сталкиваясь с частицами в веществе, передают им свою энергию, вызывая ионизацию за счет вторичных заряженных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

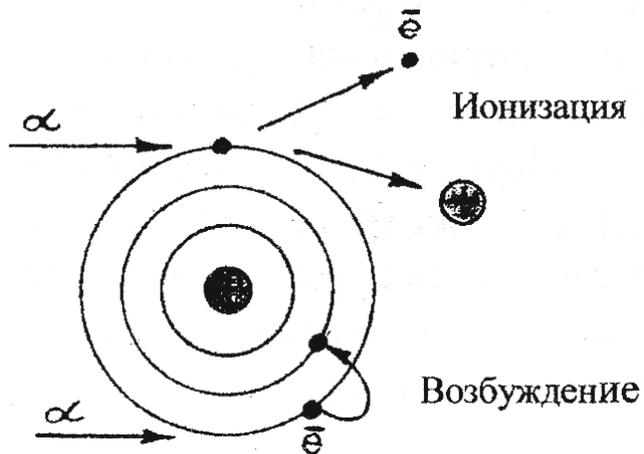
Удельные ионизационные потери энергии представляют собой отношение энергии E заряженной частицы, теряемой на ионизацию среды при прохождении отрезка x , к длине этого отрезка.

Удельные ионизационные потери энергии увеличиваются с уменьшением энергии частицы.



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

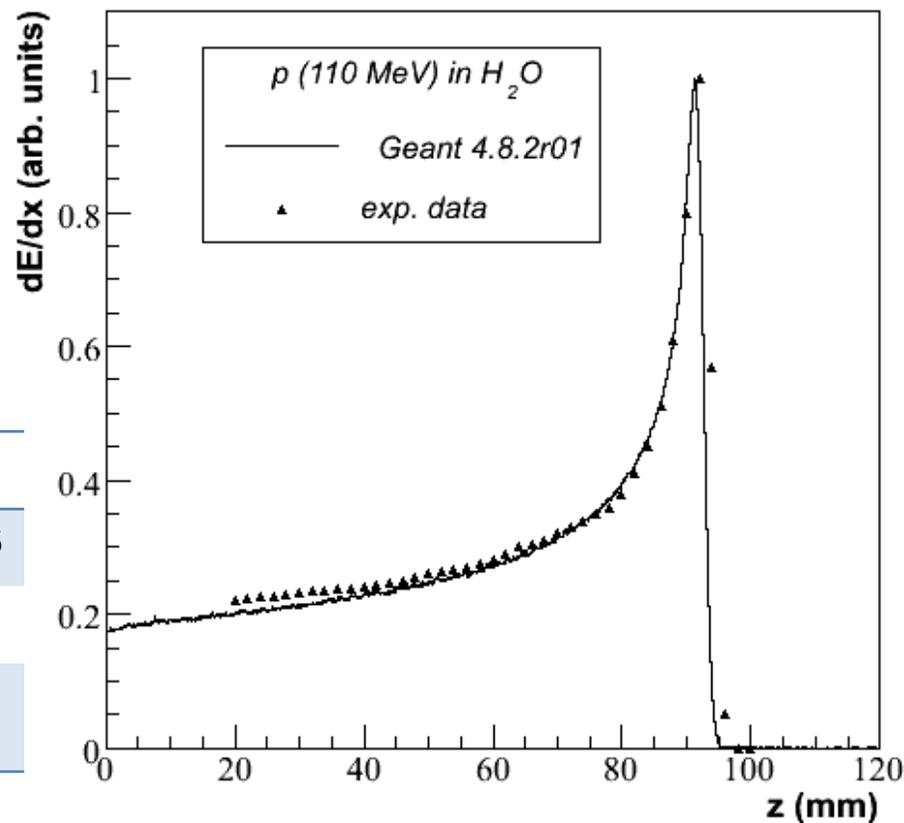
Тяжелые частицы



- Альфа
- Осколки деления
- Протоны, ионы

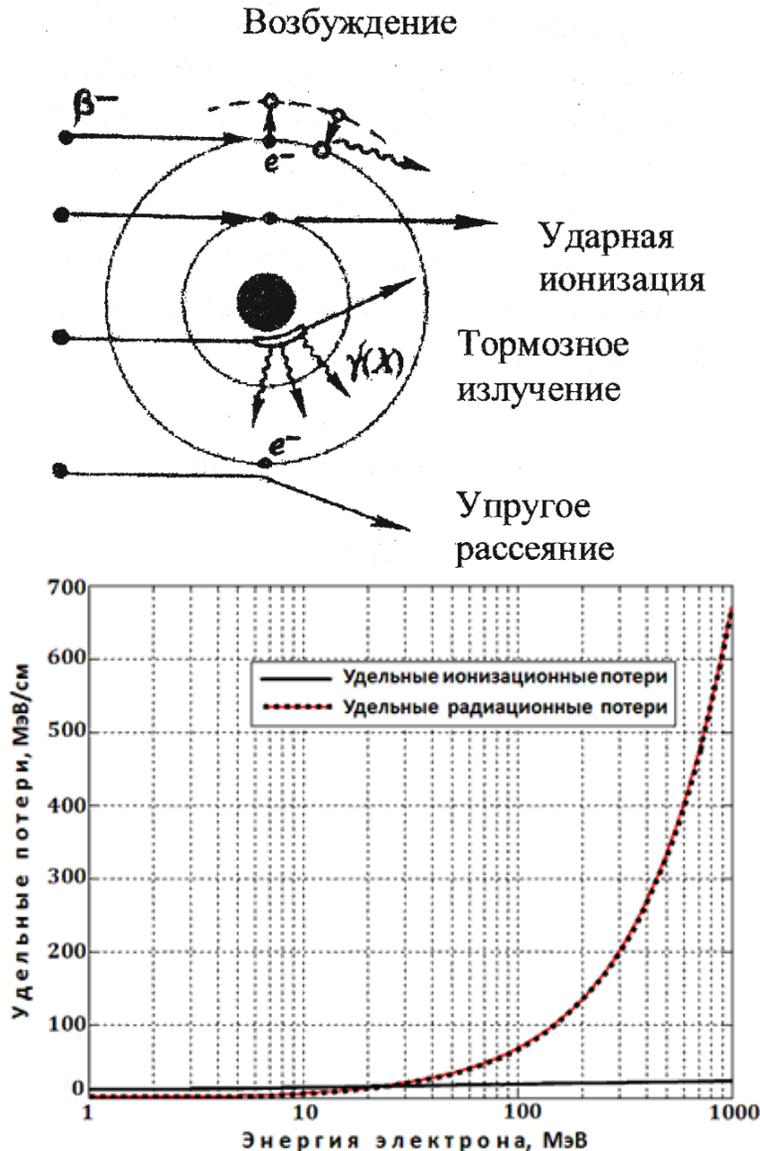
Величина пробега α -частицы в зависимости от энергии T_α

T_α , 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.

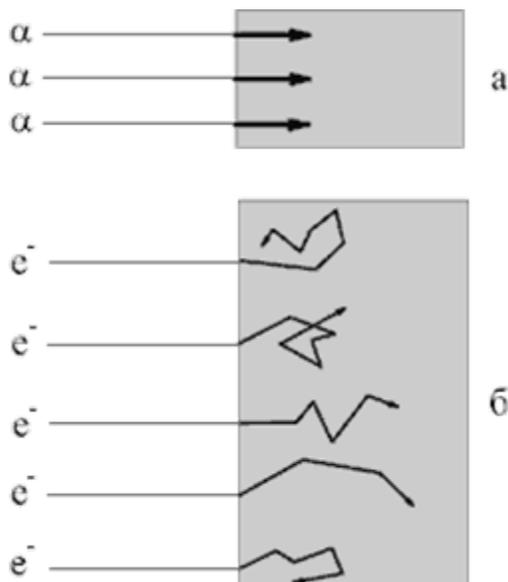
Отношение удельных радиационных и ионизационных потерь энергии K определяется зависимостью:

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

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

Электронны

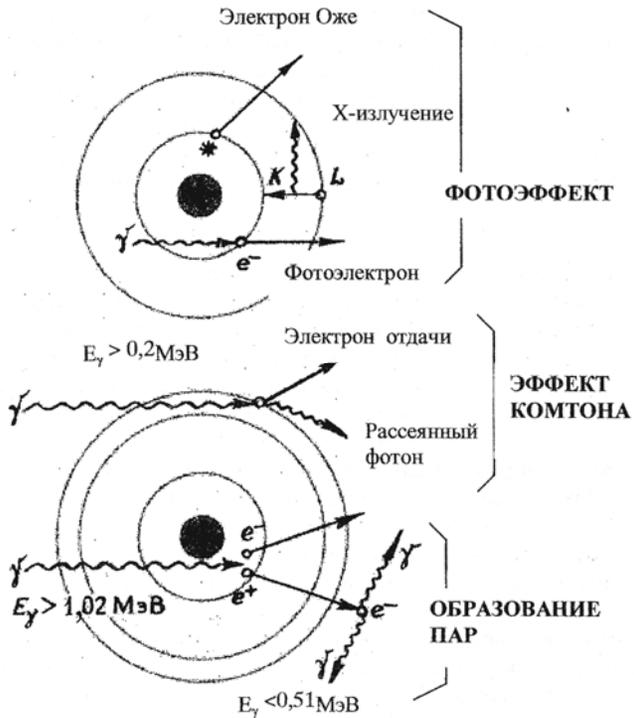
Эффективный пробег – минимальная толщина поглотителя, который задерживает (поглощает) все β -частицы с начальной энергией E_β .



Величина эффективного пробега электронов в зависимости от энергии

E, МэВ	0,05	0,5	5	50	500
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 γ -квантов через вещество энергия γ -квантов не изменяется, но в результате взаимодействий ослабляется интенсивность пучка γ -квантов.

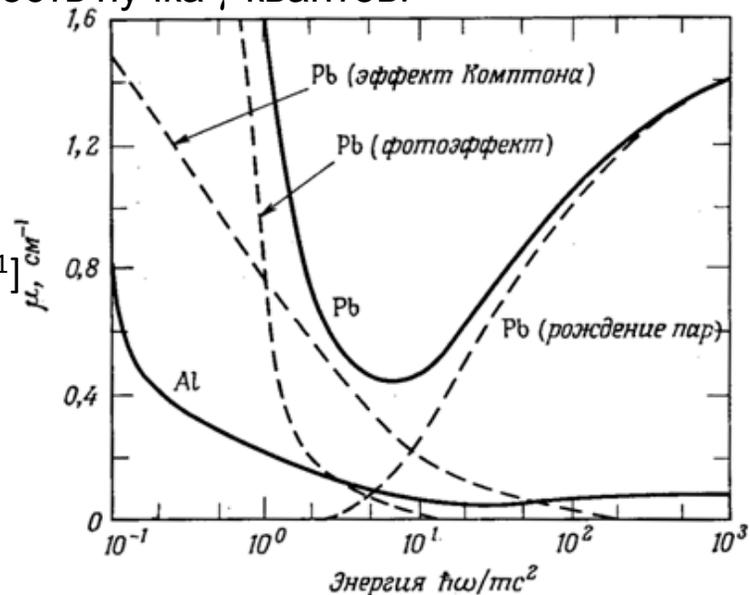
- $dI/I = -\mu dx$

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

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

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

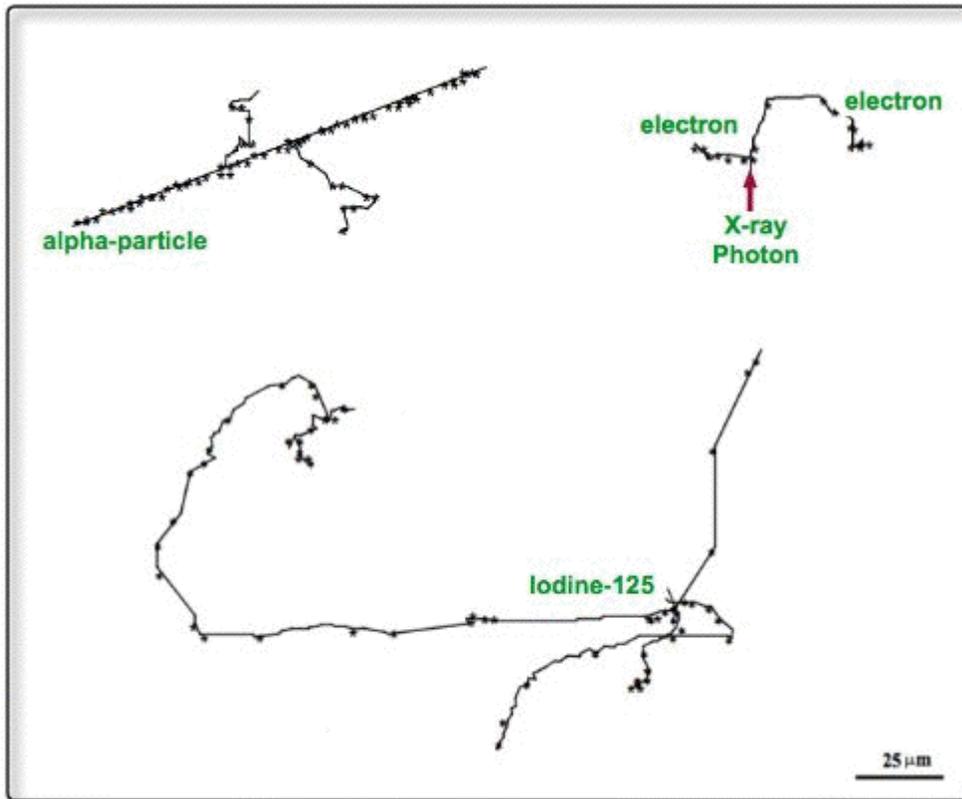
μ коэффициент линейного ослабления [м^{-1}]



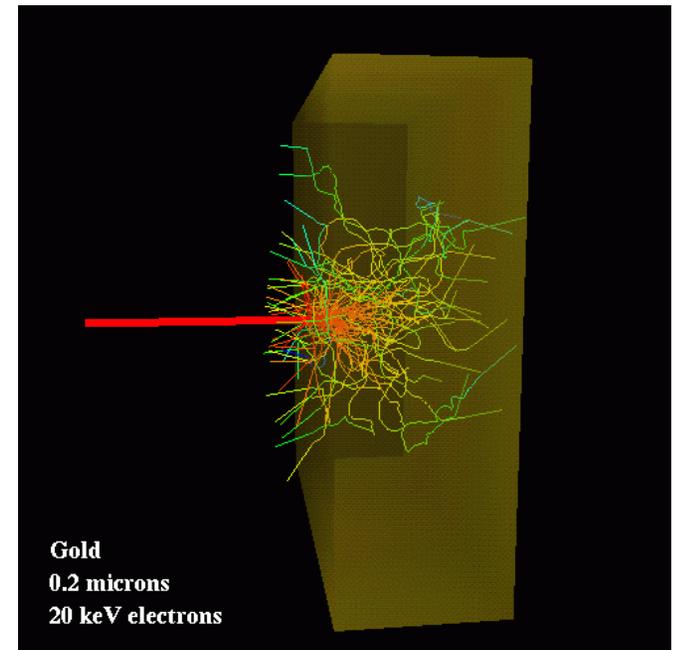
Для характеристики **проникающей способности** γ -квантов используют

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

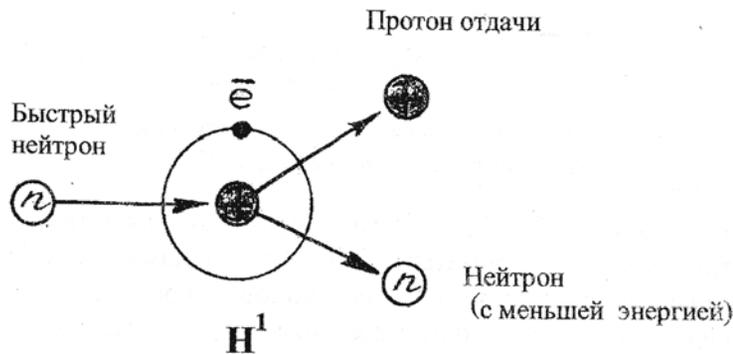


Ионизация вдоль трека частицы в воде, для α -частицы 5.4 МэВ (слева вверху), для электронов, образованных в результате поглощения фотона рентгеновского диапазона 1.5 кэВ (справа вверху) и электронов, образовавшихся в результате распада изотопа иода ^{125}I . Звездочками отмечены акты взаимодействия в 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 (~ 580 К)	тепловые	(n, γ) , (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, σ - полное сечение взаимодействия нейтронов с веществом.

Величина $\Sigma = N\sigma$ имеет размерность обратной длины (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 (λ) в различных				
Материал	Химическая формула	Плотность г/см^3	λ (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	B_4C	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.

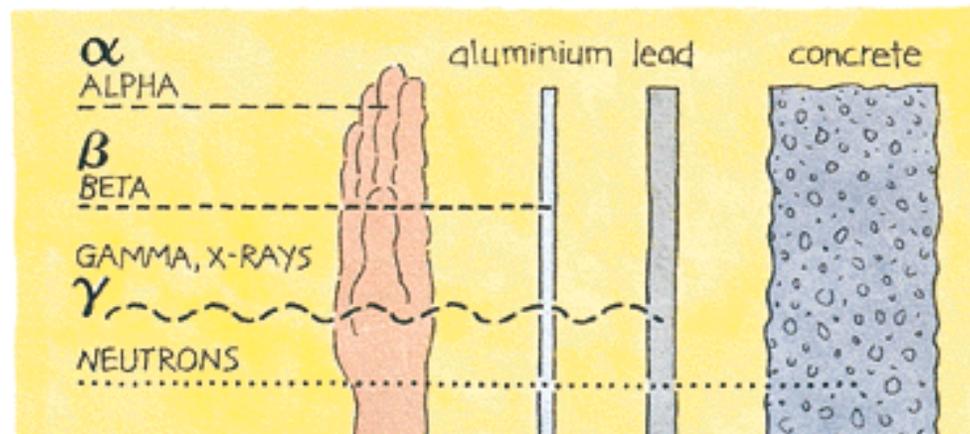
Бета-излучение обладает большей проникающей способностью. Пробег электронов с энергией 4 Мэв в воздухе составляет 17.8 м, а в биологической ткани 2.6 см.

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.

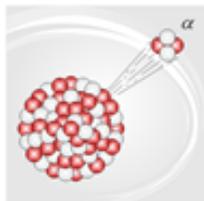


Биологическое воздействие

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

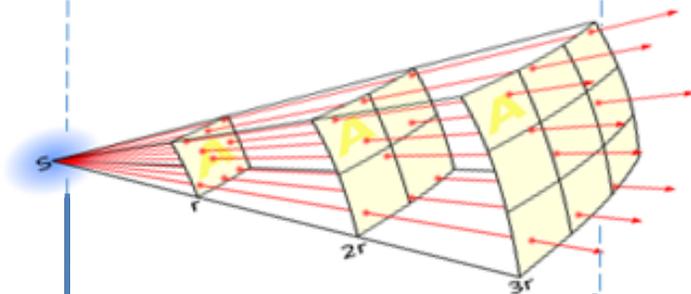
Радиоактивный распад



Единицы измерения

1 Беккерель (Бк) =
= 1 распад в секунду

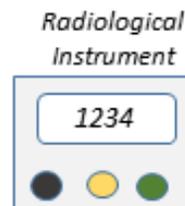
Ионизирующее излучение



Факторы, влияющие на прохождение излучения

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

Регистрация



Единицы измерения

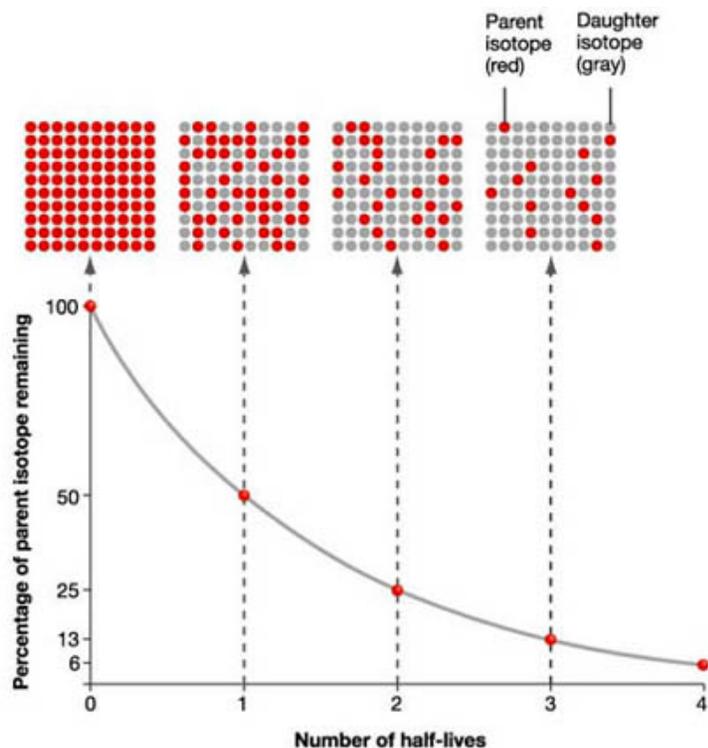
Доза:

- 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.

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

λ (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}K – 5500 Бк, по ^{14}C - 3000Бк

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

^{239}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 см³ 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.

	γ	β	Нейтроны					p	α
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, A	Кюри (Ки, Ci)	Беккерель (Бк, Bq)	$1 \text{ Ки} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ $1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с}$ $1 \text{ Бк} = 2.7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$
Экспозиционная доза, X	Рентген (Р, R)	Кулон/кг (Кл/кг, C/kg)	$1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ $1 \text{ Кл/кг} = 3.88 \cdot 10^3 \text{ Р}$
Поглощенная доза, D	Рад (рад, rad)	Грей (Гр, Gy)	$1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$ $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$
Эквивалентная доза, H	Бэр (бэр, rem)	Зиверт (Зв, Sv)	$1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$ $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$
Интегральная доза излучения	Рад-грамм (рад·г, rad·g)	Грей·кг (Гр·кг, Gy·kg)	$1 \text{ рад} \cdot \text{г} = 10^{-5} \text{ Гр} \cdot \text{кг}$ $1 \text{ Гр} \cdot \text{кг} = 10^5 \text{ рад} \cdot \text{г}$

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 Локальные лучевые поражения Лейкозы Опухоли разных органов	Генные мутации 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

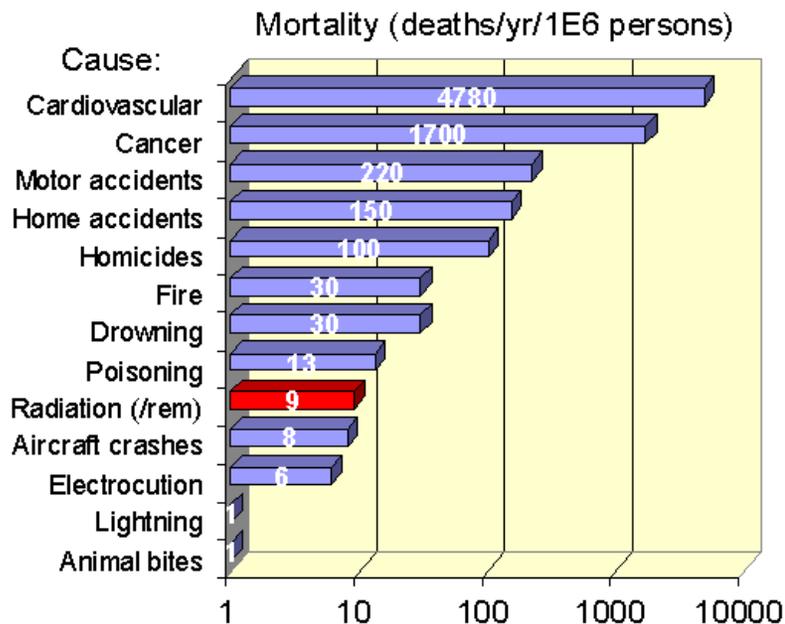
Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год		
в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв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

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} .

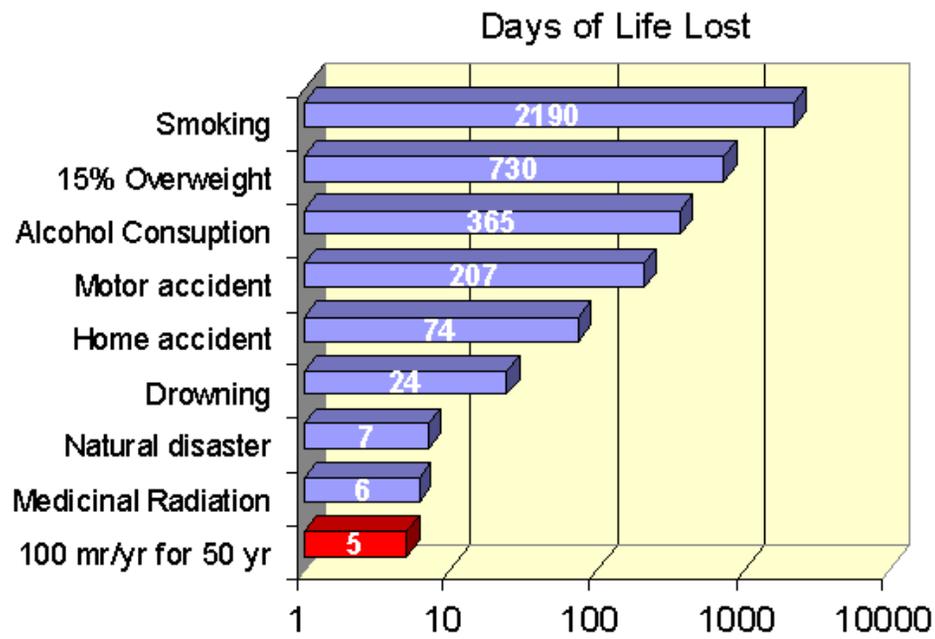
Эффективные эквивалентные годовые дозы (в среднем по всему земному шару)

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

Воздействие на человека. Риски



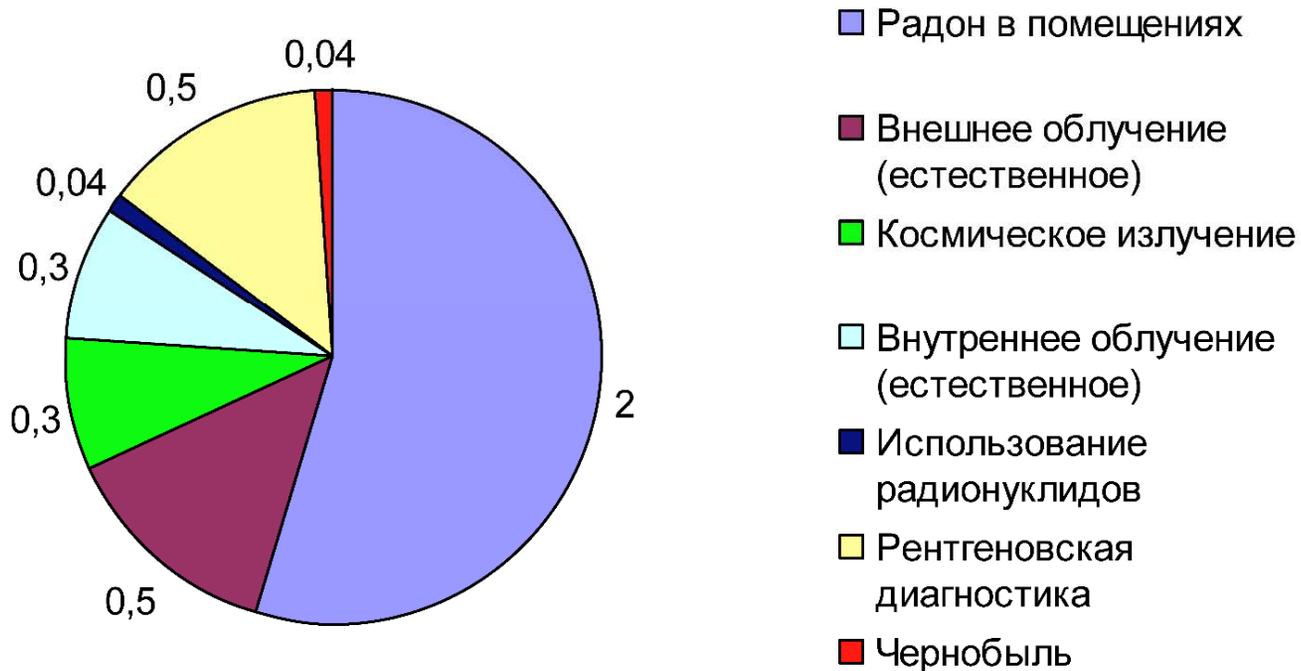
Количество смертей на 1 млн. чел. в год (США, 2002 г)

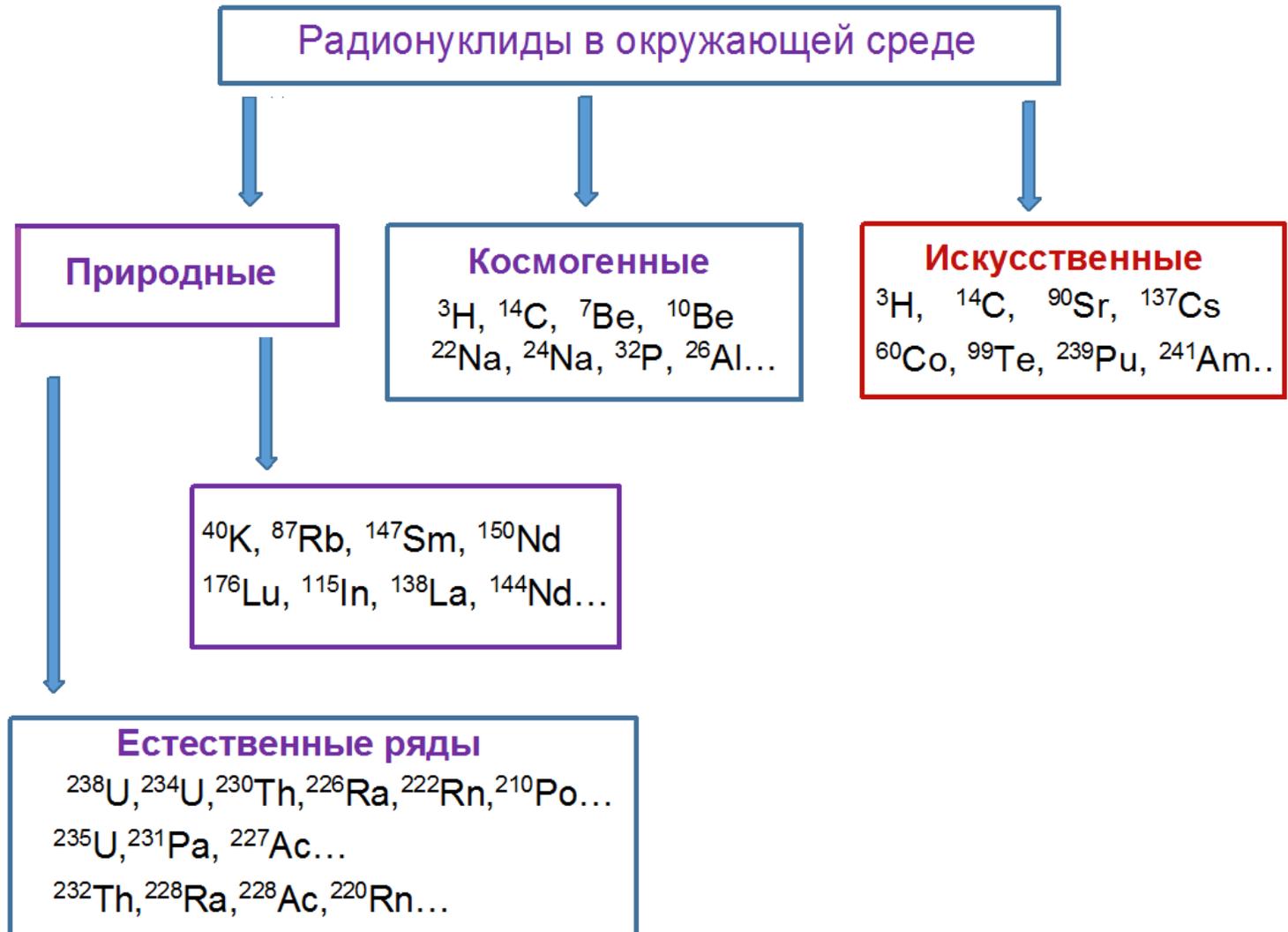


Уменьшение продолжительности жизни (США, 2002 г)

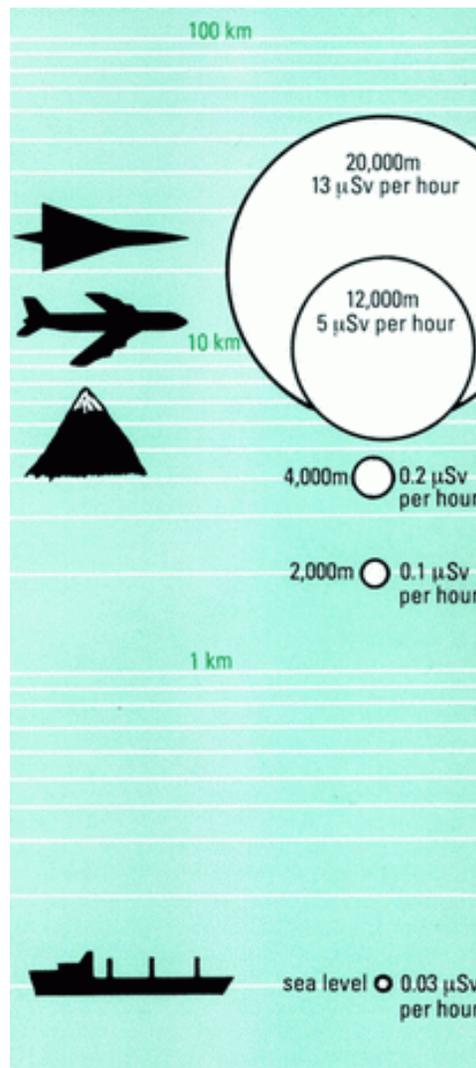
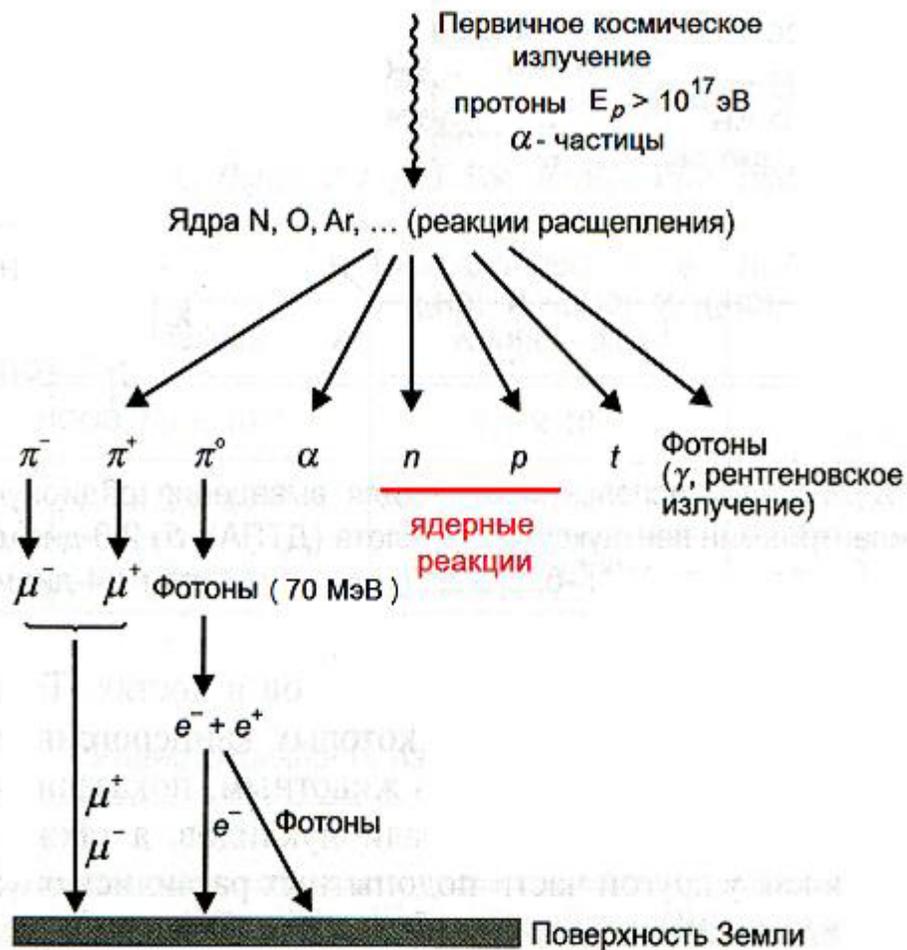
Естественный фон

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





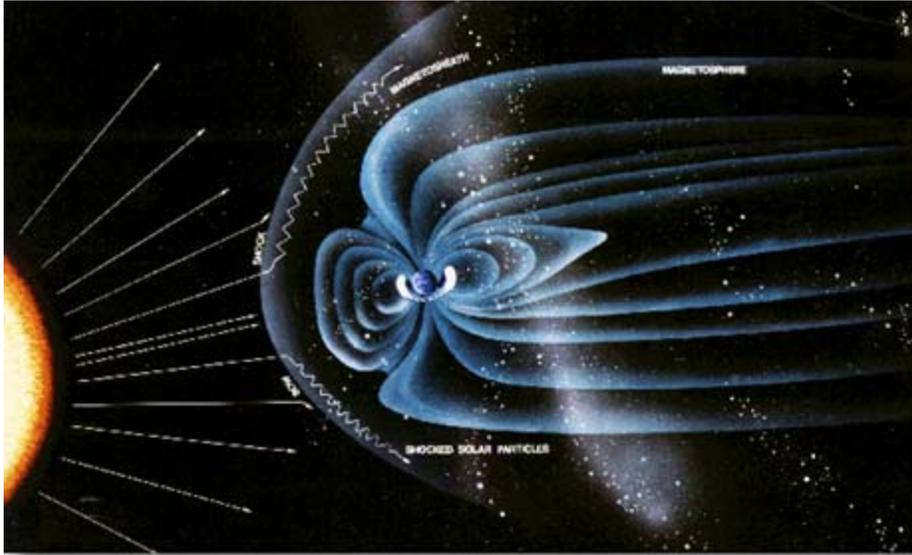
Космические лучи



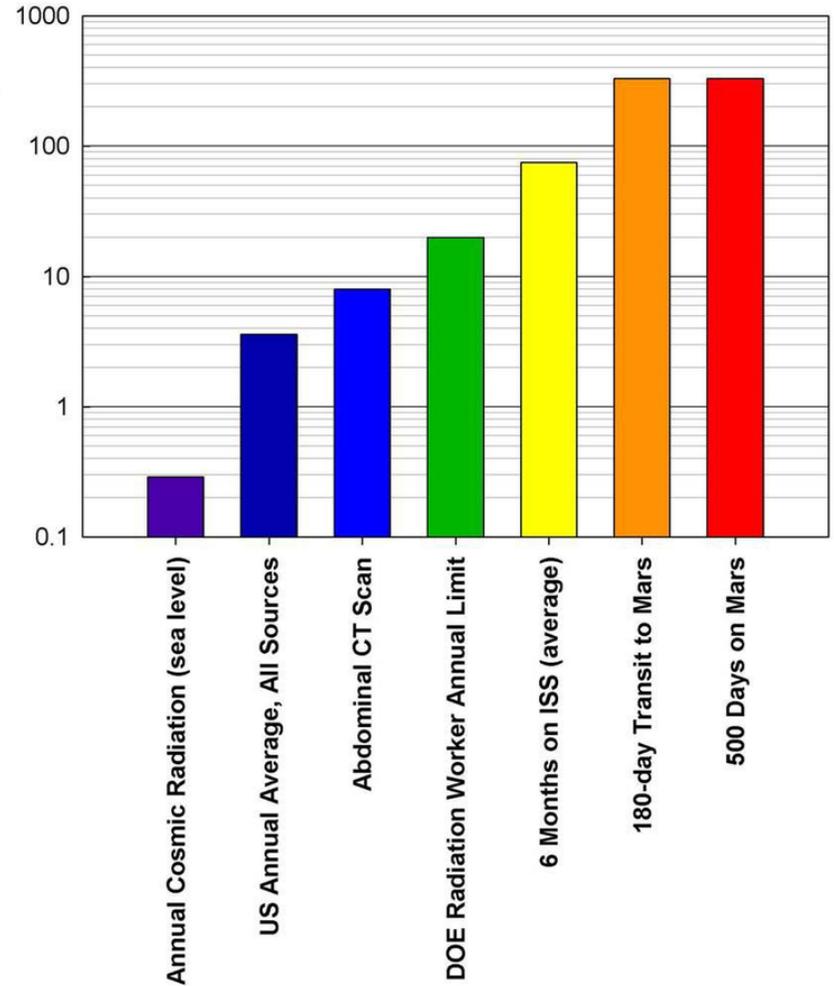
5 мкЗв/час

0,03 мкЗв/час

Космические лучи

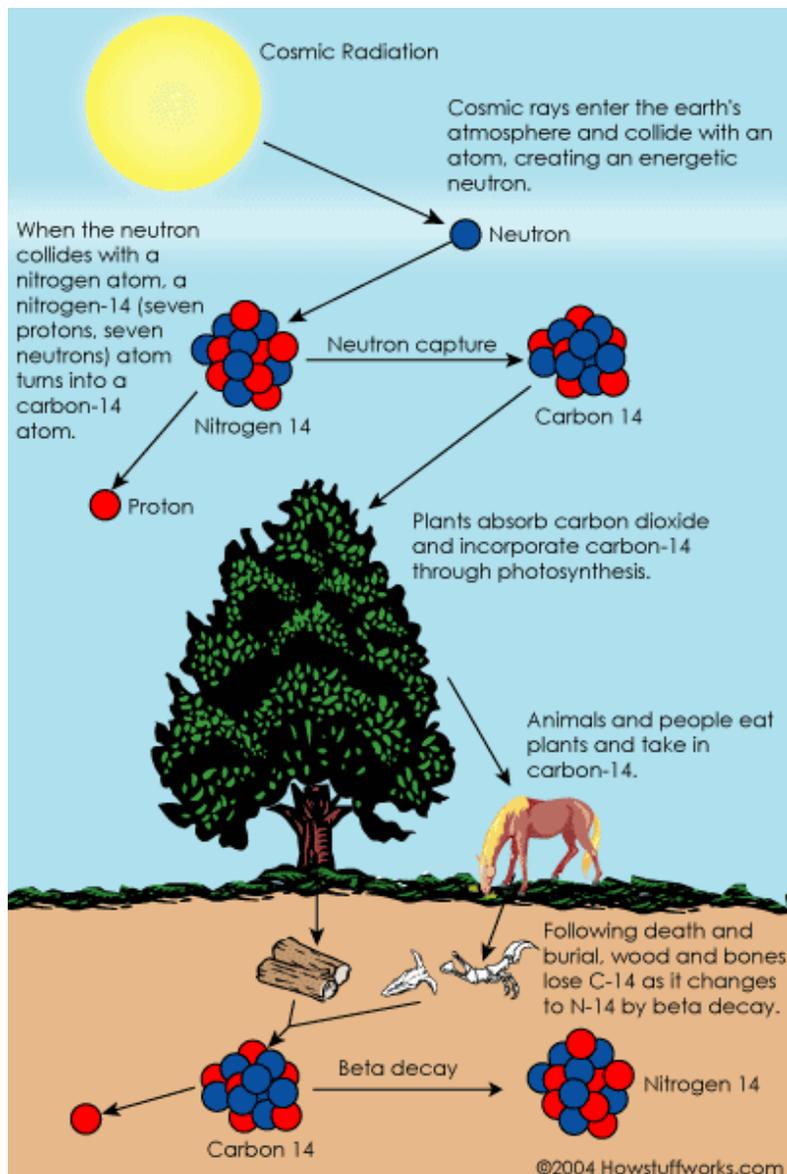


За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около **0.35 мЗв /год**. Эффективная доза от глобальных авиаперевозок составляет на душу населения в мире в среднем около **1 мкЗв/год**, а в Северной Америке около 10 мкЗв.



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	12
${}^{22}\text{Na}$	50	0.15

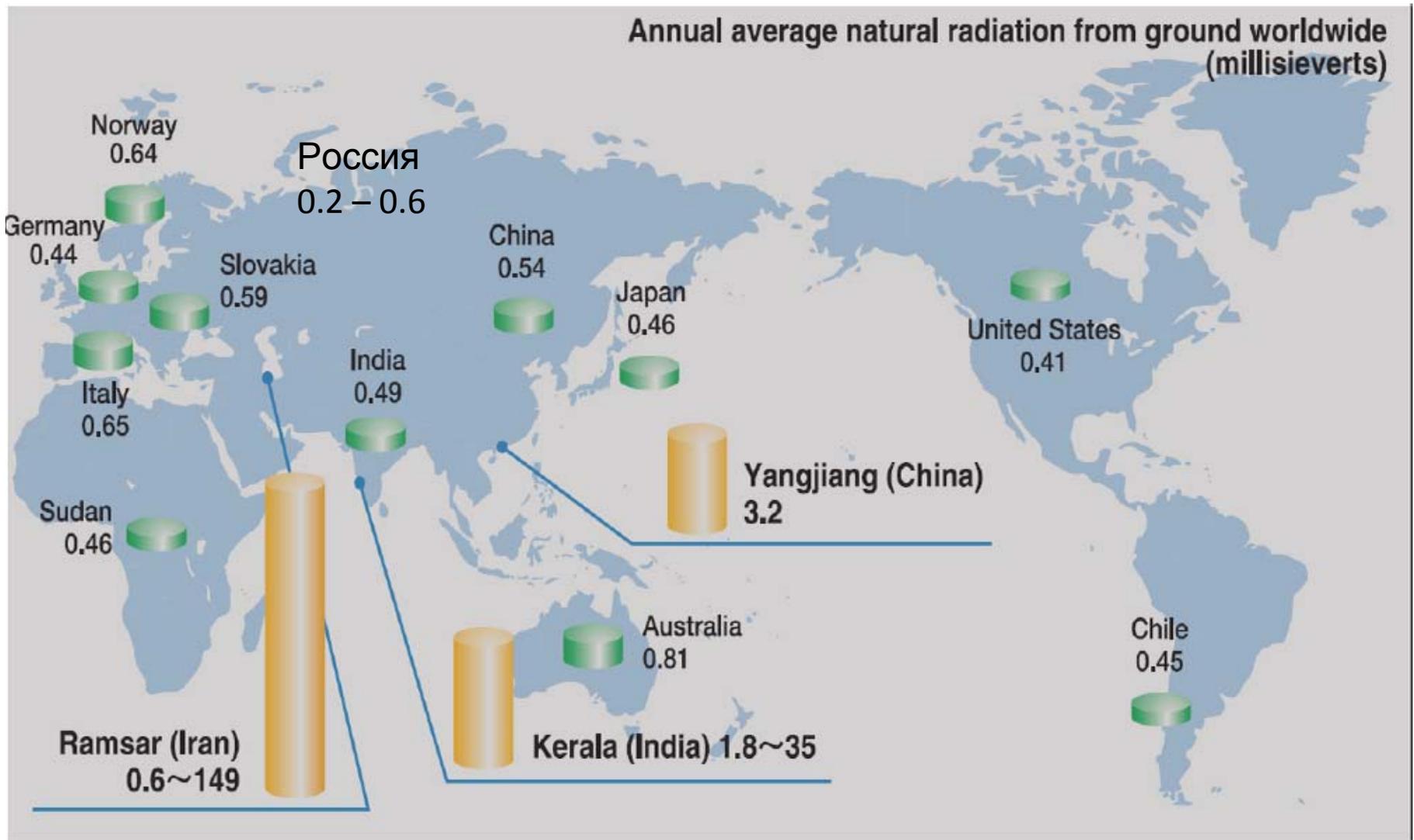
Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет около **15 мкЗв/год.**

Земные радионуклиды

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

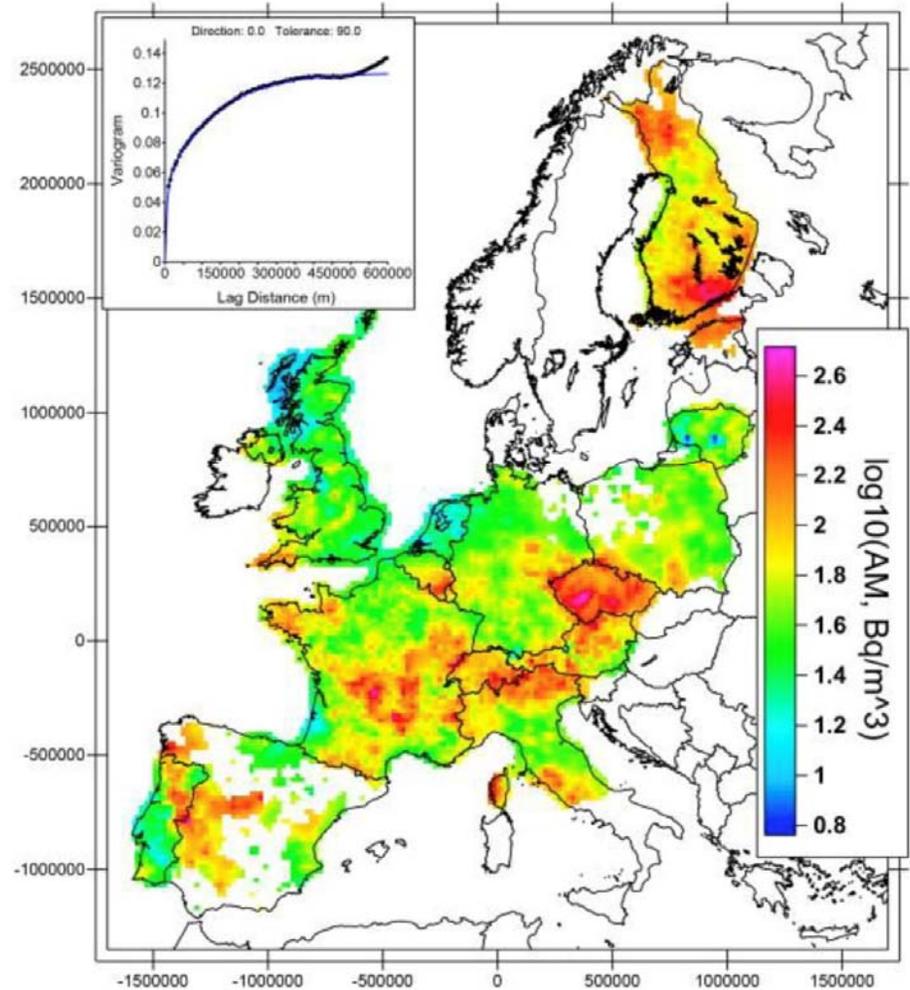
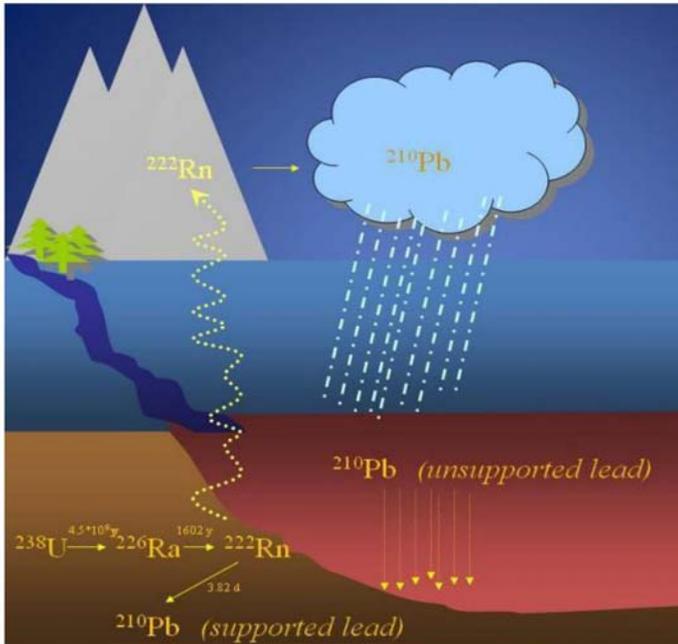
Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет около **0.35 мЗв**

Земные радионуклиды

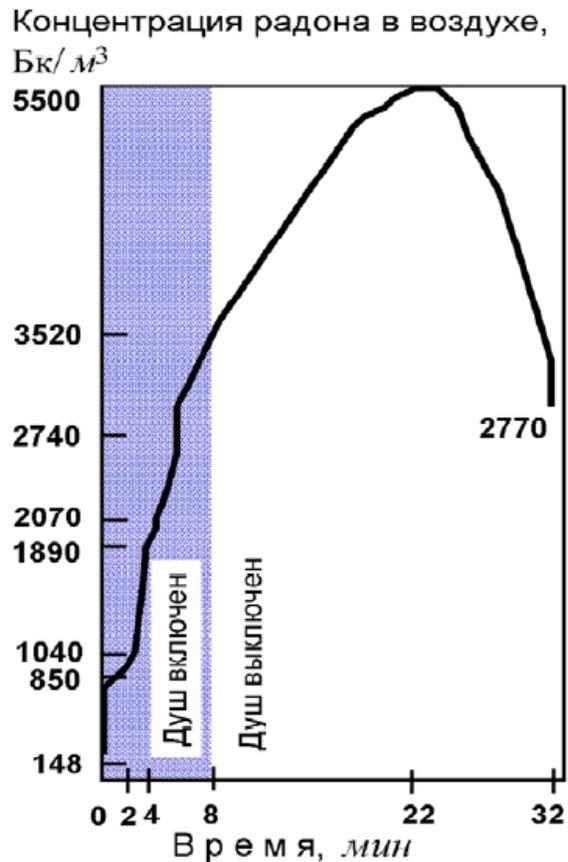


Радон

радон-222 в помещениях



Радон



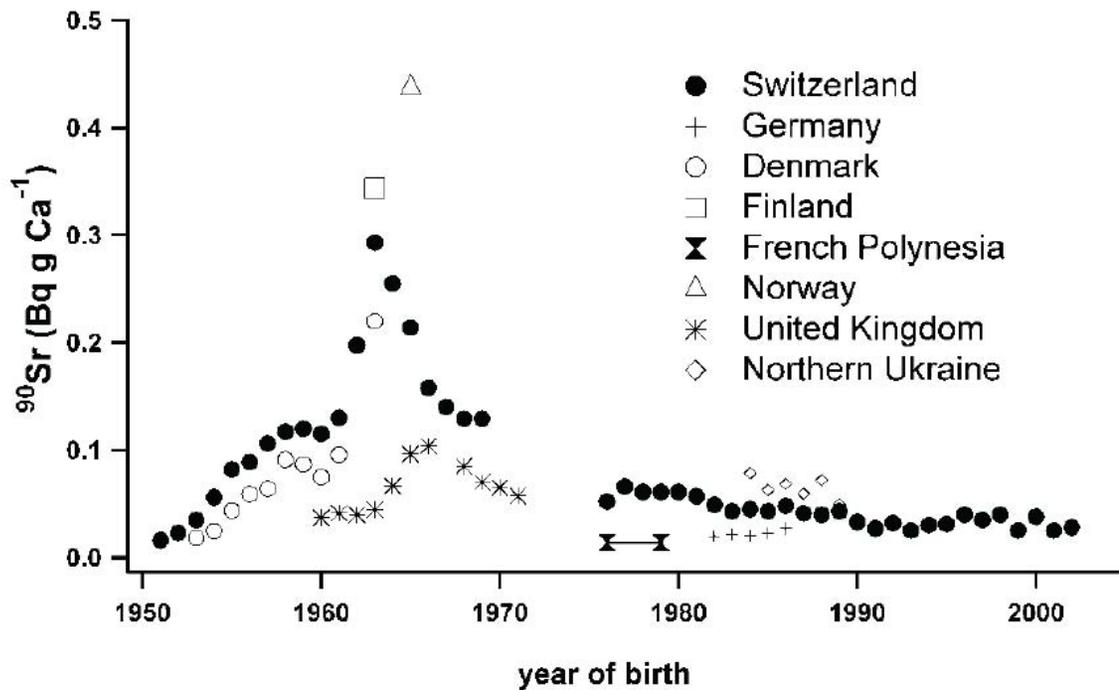
Мощность излучения различных источников радона	
Источник радона	Мощность излучения, кБк/сут
Природный газ	3
Вода	4
Наружный воздух	10
Стройматериалы, грунт под зданием	60

Земные радионуклиды

Внутреннее облучение

Тело человека (70 кг)			Доза,
Нуклид	$T_{1/2}$	A, Бк	мкЗв/год
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ лет	4 400	180
^{14}C	5700 лет	3 200	10
^{226}Ra	1600 лет	1,5	13
^{210}Po	160 сут	19,5	130
^{220}Ra	54 сек		170 - 220
^{222}Ra	3,8 сут		800 - 1000
^{90}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}Pu and ^{90}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}Sr activities (Bq/gCa) in milk teeth as a function of the year of birth of the children.

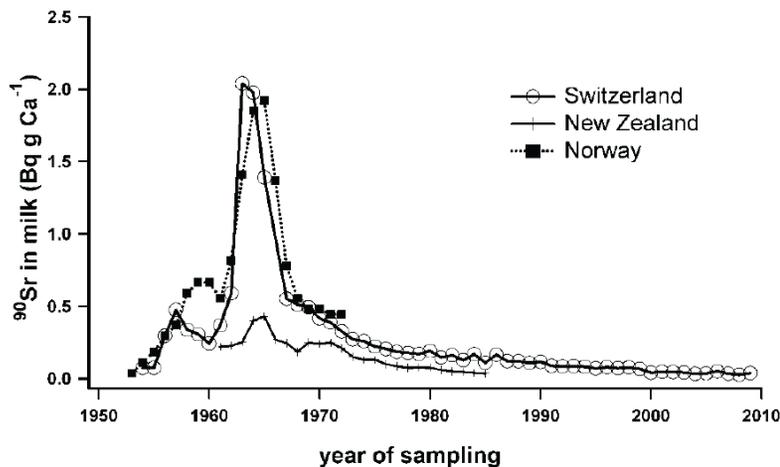


Fig. 2. ^{90}Sr activities (Bq/gCa) in milk sampled in Switzerland, Norway and New-Zealand.

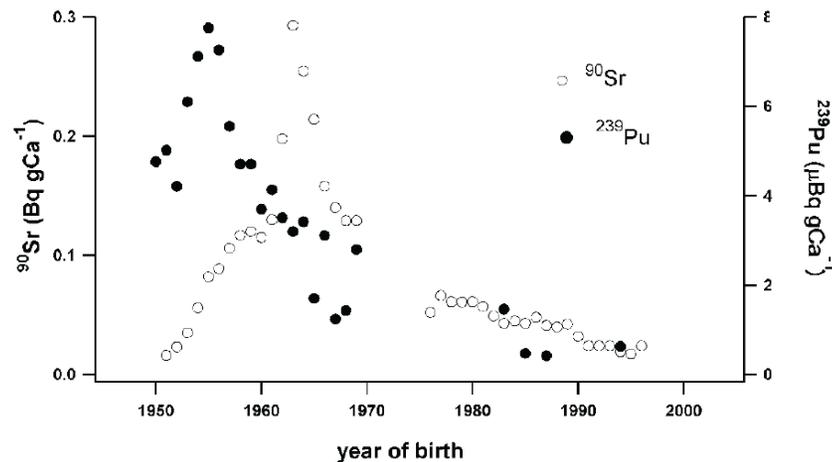
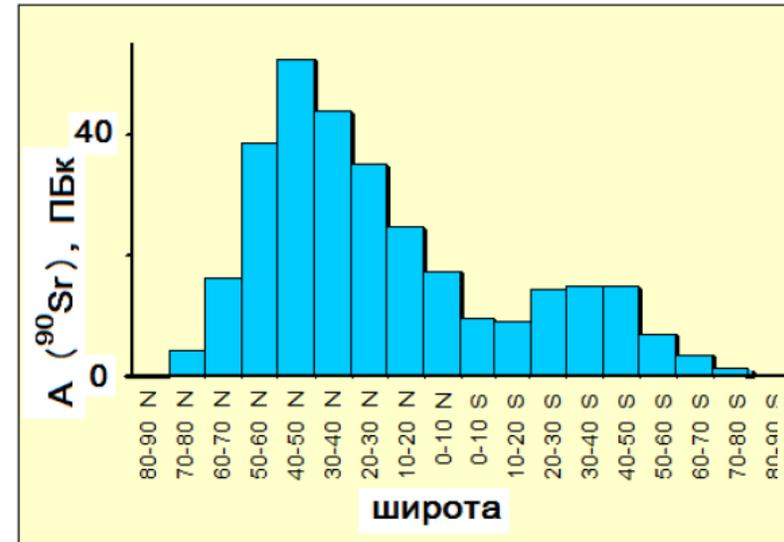
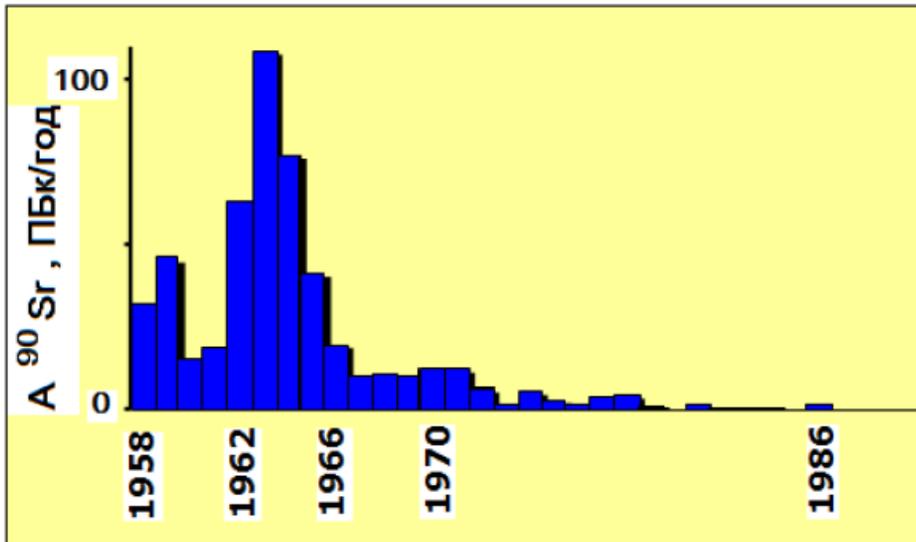
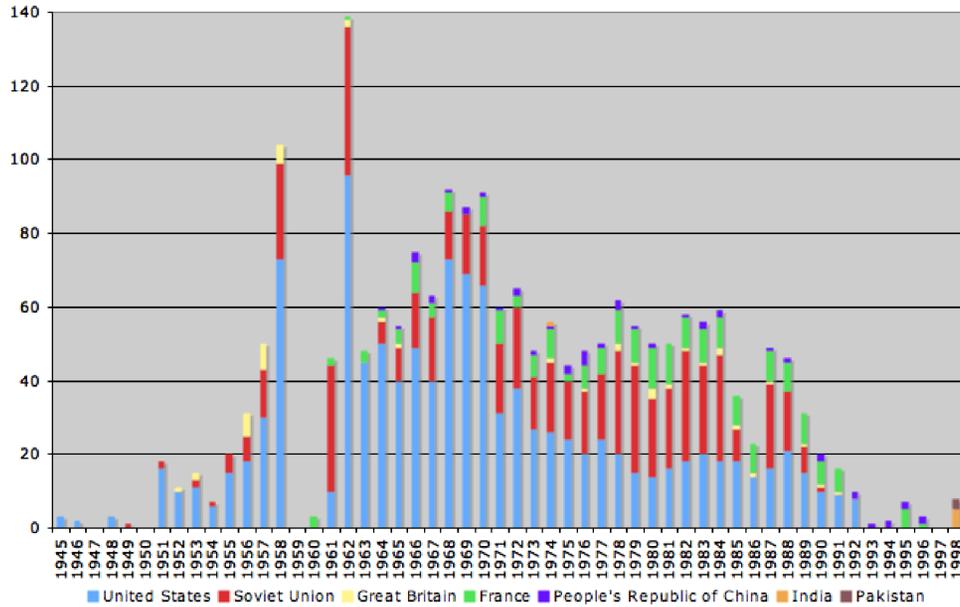


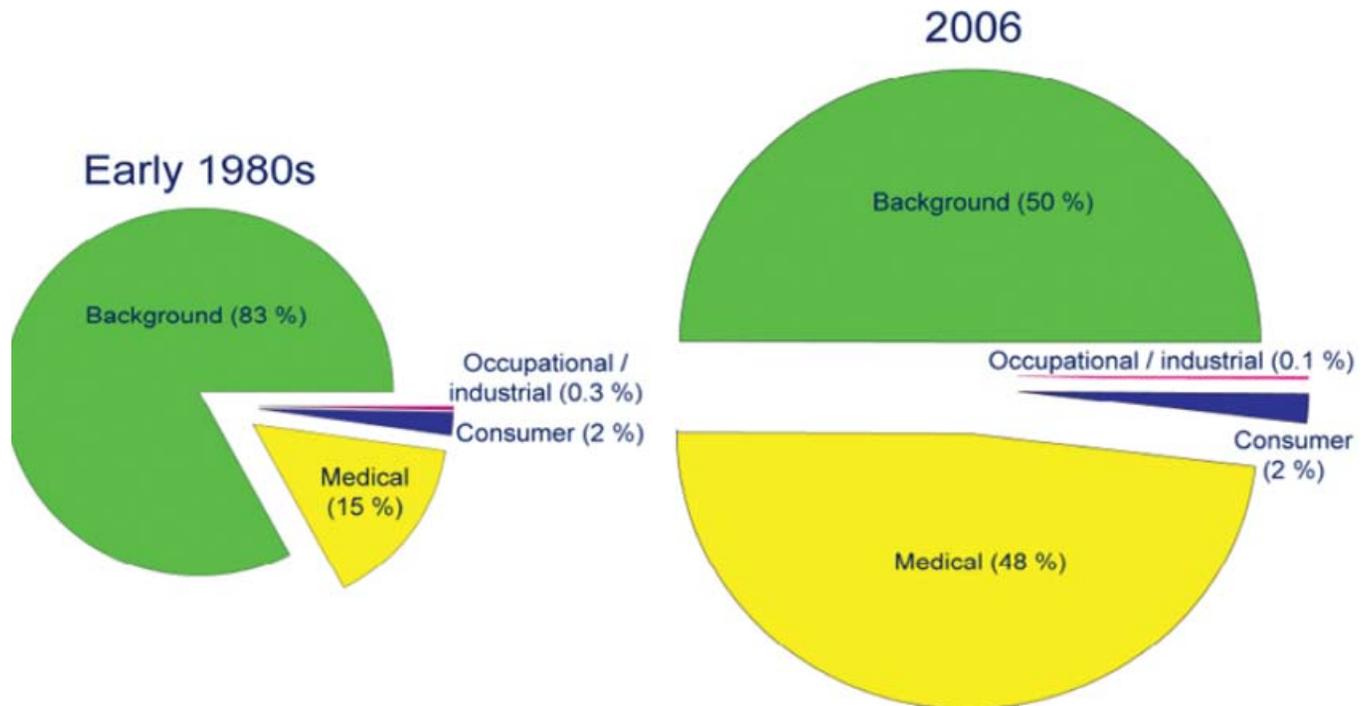
Fig. 4. ^{239}Pu (mBq/gCa) and ^{90}Sr (Bq/gCa) activities in milk teeth of children born in Switzerland 1950-1996.

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