A detailed illustration of a man in a red robe peering through a large, curved, star-patterned structure. The background is a vibrant, stylized landscape with a sun, a tree, and a town. The sun is a large, yellow, smiling face with radiating lines. A green tree stands in the middle ground. In the foreground, a man in a red robe is looking through a large, curved, star-patterned structure. The sky is filled with stars and a crescent moon. The overall style is reminiscent of a classic comic book or pulp magazine illustration.

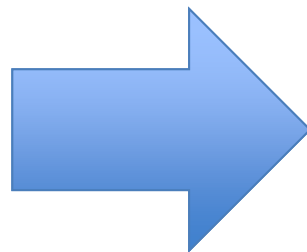
Ядерная физика и Человек

Радиация

Взаимодействие излучения с веществом

(классификация)

- 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. Все разнообразные виды излучения с точки зрения взаимодействия с веществом подразделяются на четыре основных класса.

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.

Два основных вопроса:

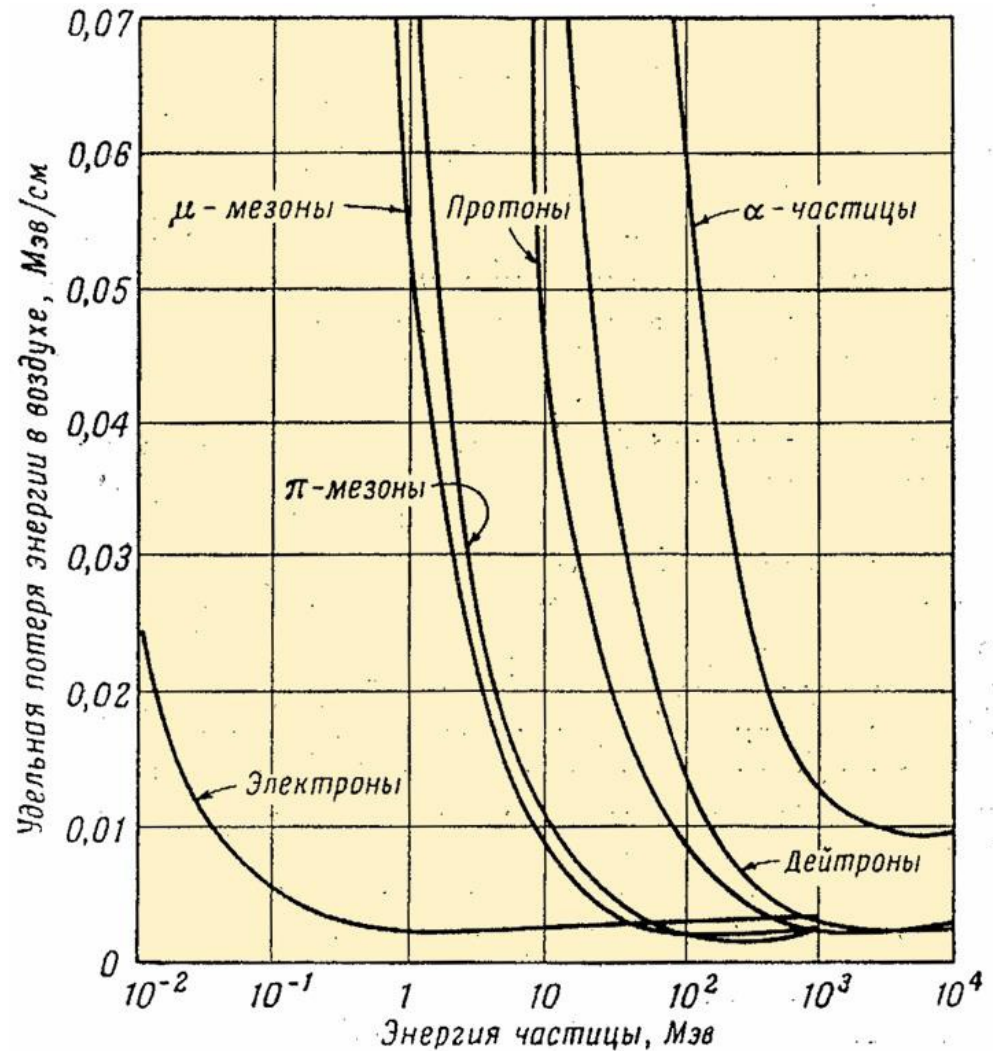
Что происходит с излучением?

Что происходит с веществом?

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

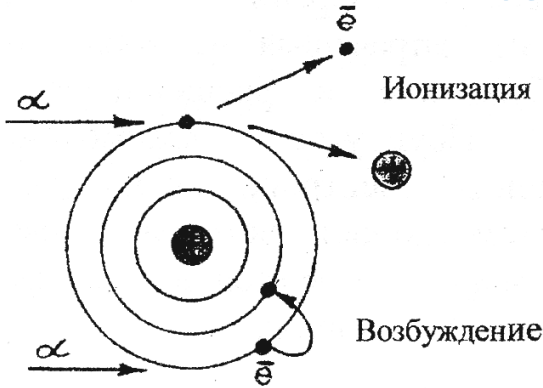
Удельные ионизационные потери энергии представляют собой отношение энергии E заряженной частицы, теряемой на ионизацию среды при прохождении отрезка x , к длине этого отрезка.

Удельные ионизационные потери энергии увеличиваются с уменьшением энергии частицы.



Тяжелые частицы

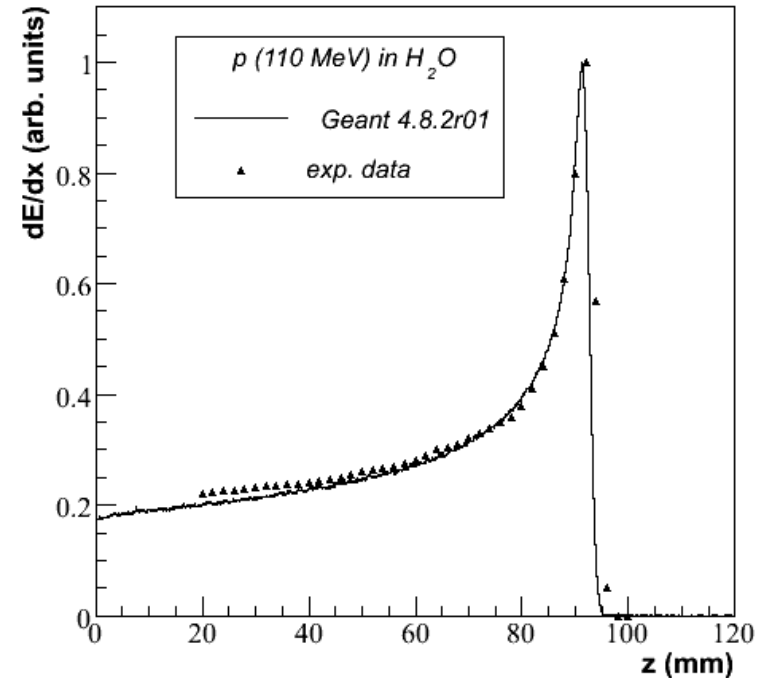
- Альфа-частицы
- Осколки деления
- Протоны, ионы



Величина пробега α -частицы в веществе 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

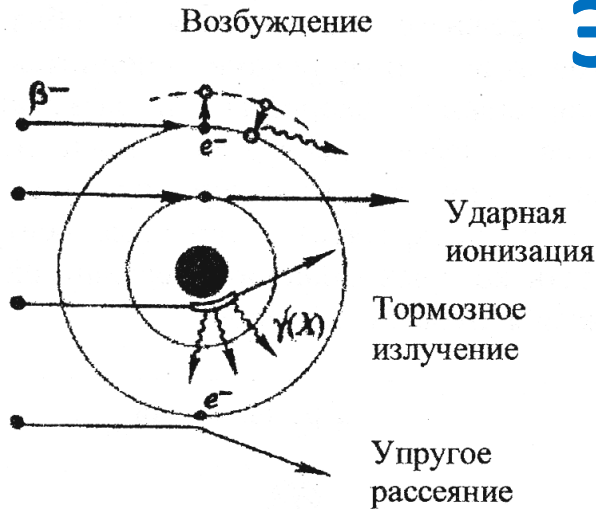
Пик Брэгга



Для тяжелых заряженных частиц кривая имеет характерный пик (пик Брэгга) с максимальными потерями энергии при уменьшении скорости частицы вплоть до ее остановки.

При α -распаде энергия α -частиц от 2 до 10 МэВ, пробег в веществе порядка 10^{-3} мм

Электроны



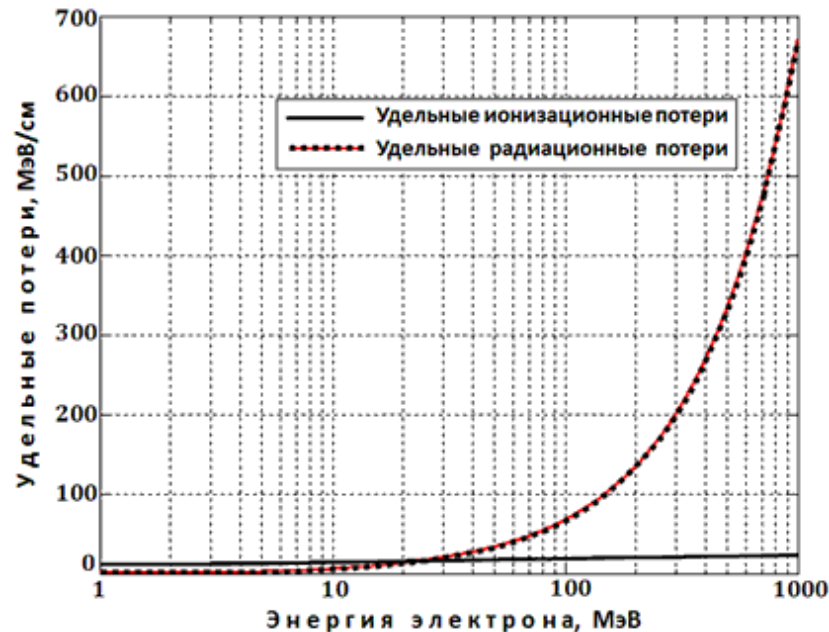
Прохождение электронов через вещество отличается от прохождения тяжёлых заряженных частиц. Помимо таких же эффектов ионизации, для взаимодействия электронов с веществом характерно излучение γ -квантов (радиация). Малая масса электрона приводит к относительно большому изменению импульса электрона при 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.

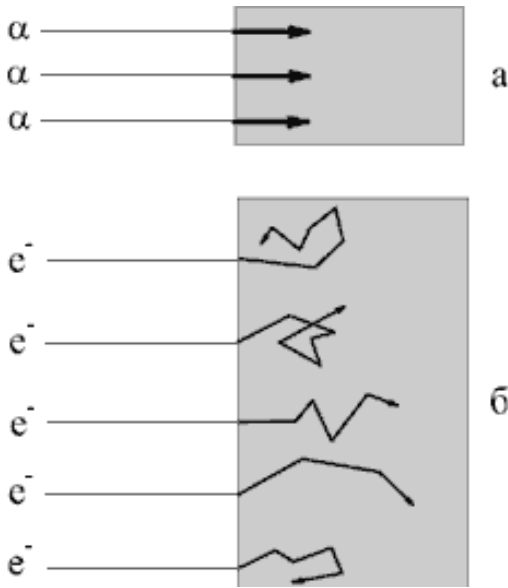
Отношение удельных радиационных и ионизационных потерь энергии

$$K \sim 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot Z \cdot E,$$

где Z — средний заряд ядер атомов вещества, энергия налетающего электрона E в МэВ



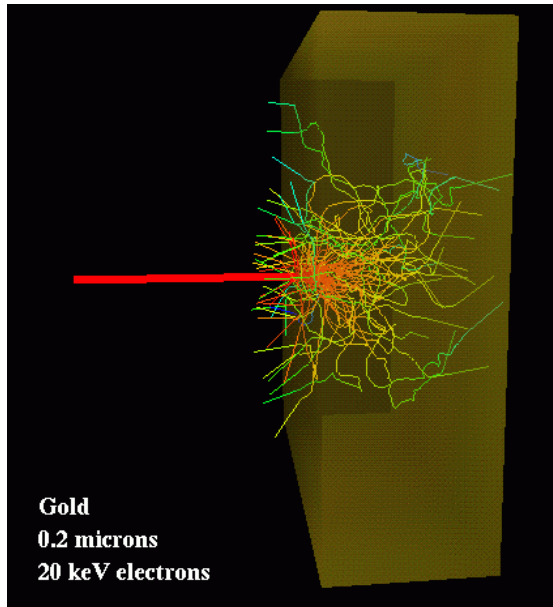
Электроны



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

Величина эффективного пробега электронов в зависимости от энергии

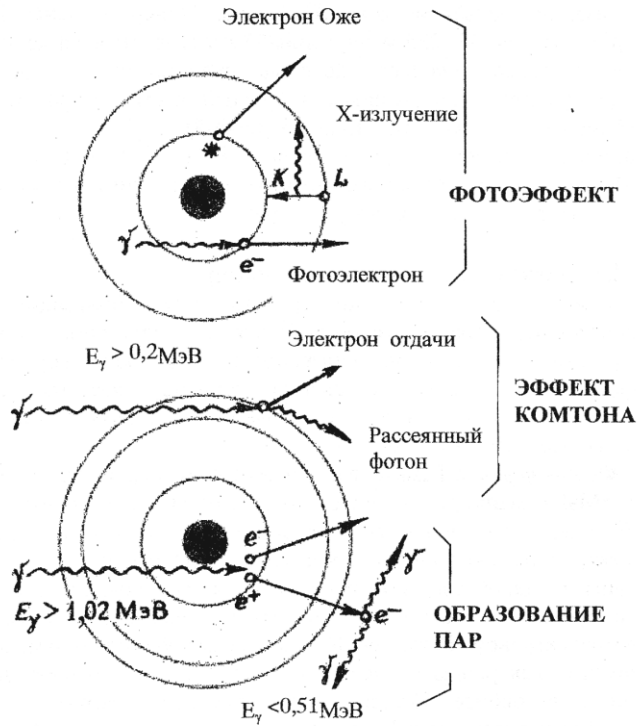
Е, МэВ	0,05	0,5	5	50	500
Воздух, см	4,1	160	$2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$
Вода, см	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,19	2,6	19	78
Алюминий, см	$2 \cdot 10^{-3}$	0,056	0,95	4,3	8,6
Свинец, см	$5 \cdot 10^{-4}$	0,026	0,30	1,25	2,5



Моделирование рассеяния электронов в золотой фольге

При энергиях, соответствующих β -распаду, величина эффективного пробега электрона в твердом веществе составляет миллиметры, в воде - сантиметры

Электромагнитное излучение

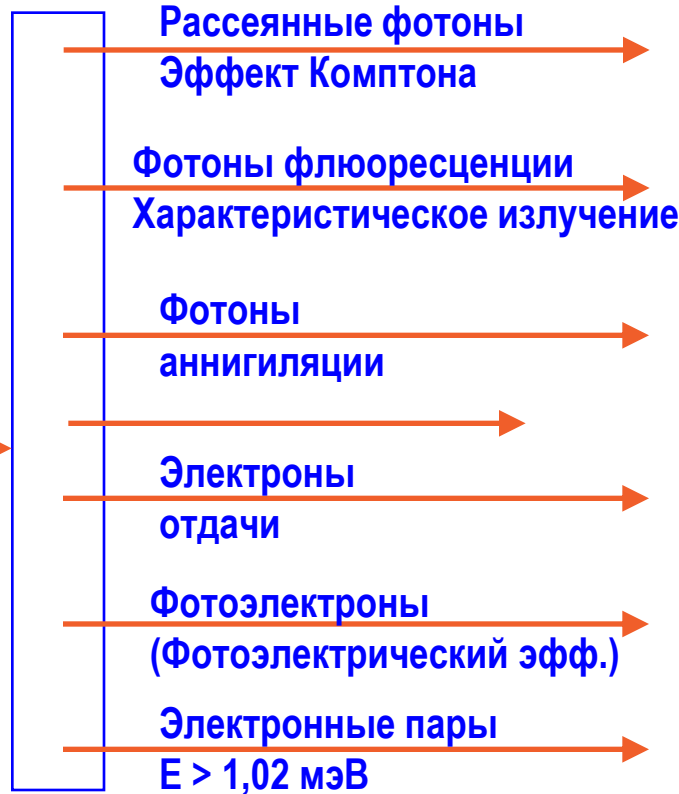


Гамма-кванты -- электромагнитные волны у которых длина волны значительно меньше межатомных расстояний:

$$\lambda \ll a \quad (a \sim 10^{-8} \text{ см})$$

Энергия γ -кванта $E_\gamma > 10 \text{ кэВ}$

Падающие
фотоны

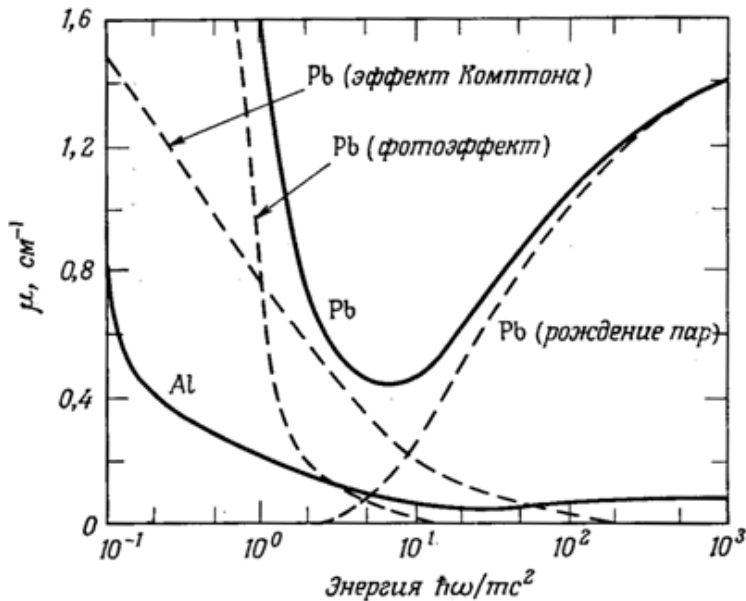


Вторичные
фотоны

Вторичные
электроны

(упрощённое
представление)

Электромагнитное излучение



Фотоны при прохождении через вещество могут взаимодействовать как с ядрами, так и с атомными электронами.

Основные механизмы взаимодействия γ -квантов с электронами вещества:

- когерентное (упругое) рассеяние;
- фотоэффект;
- комптоновское рассеяние;
- рождение электрон-позитронных пар

Вероятность взаимодействия с ядрами примерно на два порядка ниже, чем с электронами.

Фотоэффект – выбивание электронов под действием фотонов

Эффект Комптона – неупругое рассеяние фотона на свободном электроне

Рождение электрон-позитронных пар происходит при $E_\gamma > 1.2 \text{ МэВ}$

Электромагнитное излучение

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}]

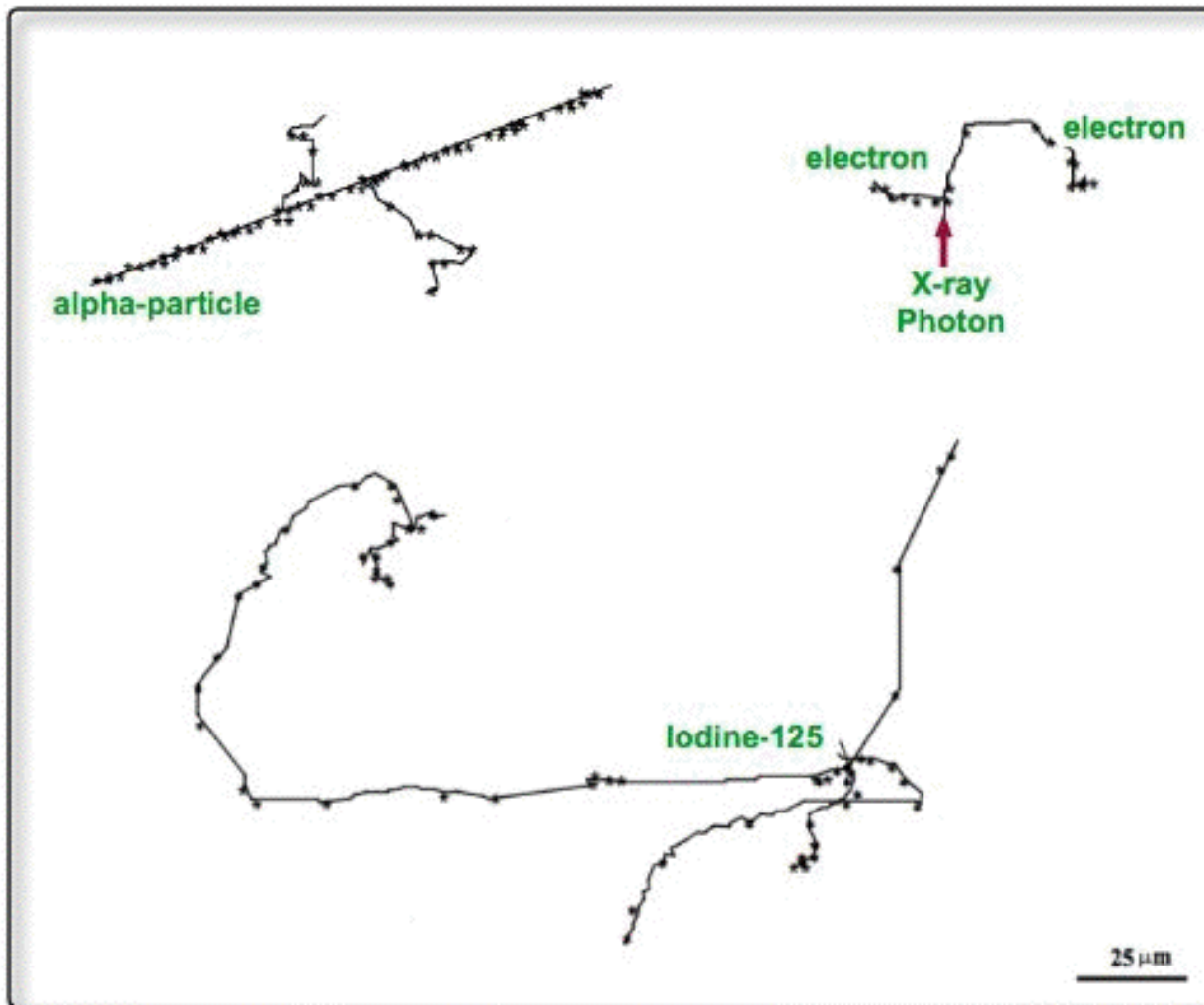
$$\mu = \mu_{\text{Комп}} + \mu_{\text{фото}} + \mu_{\text{пар}}$$

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

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

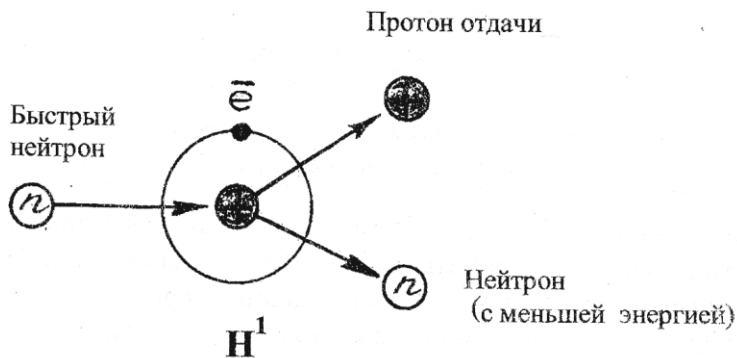
1. значение $1/\mu$ - средняя глубина проникновения фотонов в данный материал;
2. значение $d_{1/2}$ - слой половинного ослабления потока γ -квантов.

	$E_\beta = 1,7 \text{ МэВ}$		$E_\gamma = 1,7 \text{ МэВ}$	
	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 атомах среды

Нейтроны



E_n	Тип нейтронов	Реакция
$< 0,05$ эВ (~ 580 K)	тепловые	$(n, \gamma), (n, p)$
$0,05$ эВ – 1 кэВ	медленные	(n, n)
> 1 кэВ	быстрые	$(n, n), (n, n')$

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.

Нейтроны

Ослабление пучка нейтронов тонким слоем вещества:

$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma x}$$

$\Sigma = N\sigma$ (см⁻¹) - линейный коэффициент ослабления потока нейтронов

$\lambda = 1/\Sigma$ - длина свободного пробега нейтрона в веществе.

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.

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	(CH ₂) ₄	0.92	5.5	13.9
Графит	C	1.6	11.4	24.0
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.

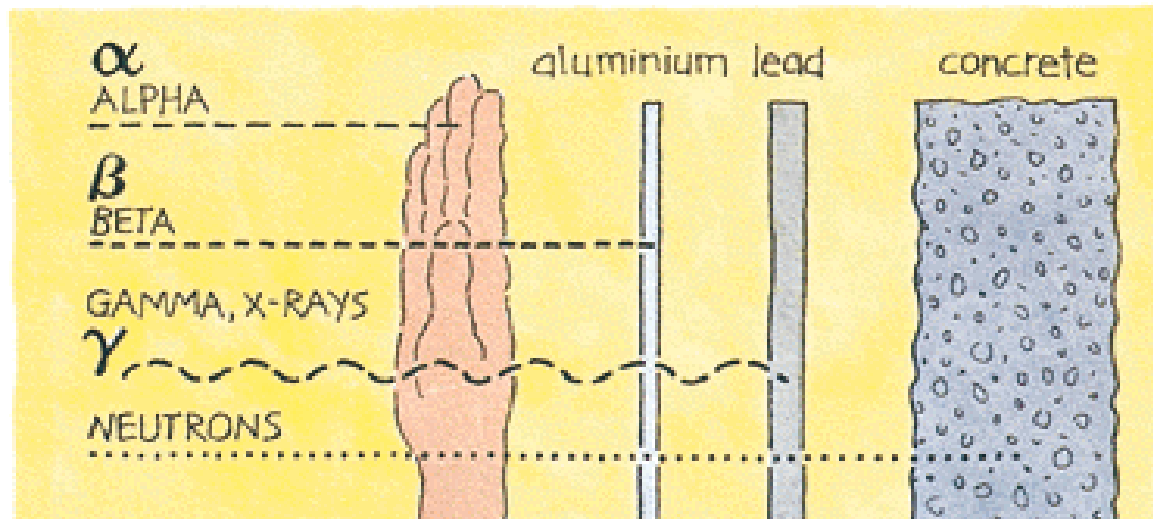
Бета-излучение обладает большей проникающей способностью. Пробег электронов с энергией 4 Мэв в воздухе составляет 17.8 м, а в биологической ткани 2.6 см.

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.

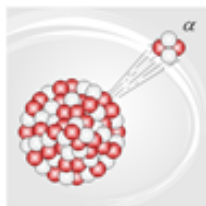
Медленные нейтроны: большая часть энергии расходуется на возбуждение и расщепление молекул ткани.

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.



Дозы излучения и единицы измерения

Активность

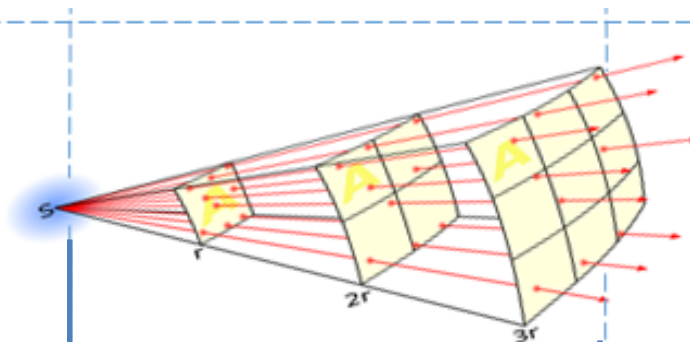


Радиоактивный распад

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

АКТИВНОСТЬ

(число распадов в единицу времени)

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

Единица измерения активности – число распадов в секунду

- **1 Беккерель = 1 распад/сек**
- **1 Кюри = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк** (\sim активность 1г ^{226}Ra)
- Активность может измеряться в числе распадов на единицу объема или массы

Картофель = 170 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

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

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

Экспозиционная доза (X) 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) — 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) дополнительно учитывает разницу в разрушительной способности разных типов радиации. Измеряется 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:

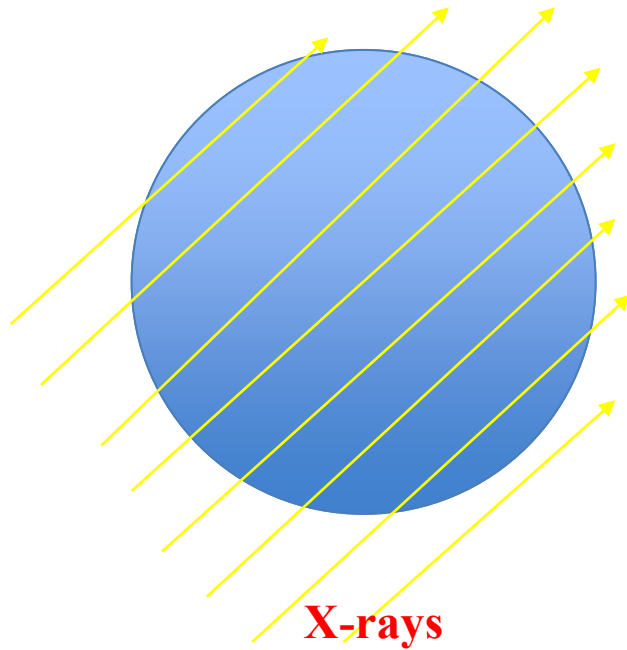
	γ	β	Нейтроны					p	α
E (МэВ)			< 0,01	0,01 ÷ 0,1	0,1 ÷ 2	2 ÷ 20	> 20		
W_r	1	1	5	10	20	10	5	5	20

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

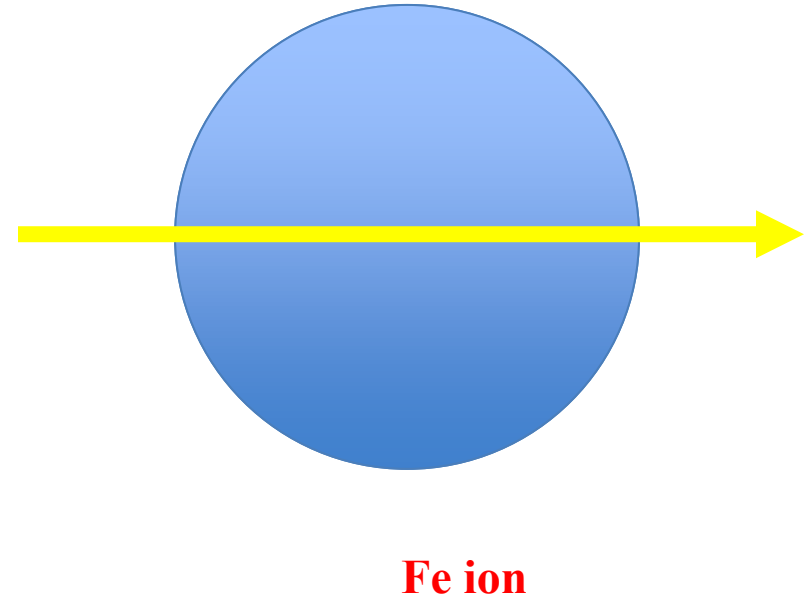
$$E_{эфф} = \sum W_t H_t$$

Повреждение и восстановление структуры ДНК при действии ускоренных тяжёлых ионов

1 unit of the dose



1 unit of the dose

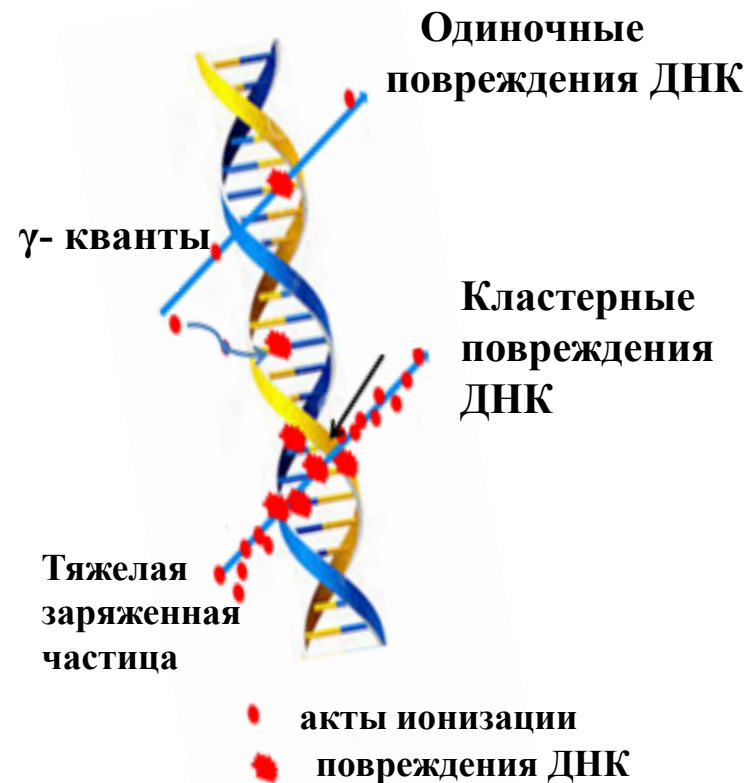


Повреждения биологических структур зависят не только от полученной дозы, но и от вида излучения

Повреждение и восстановление структуры ДНК при действии ускоренных тяжёлых ионов

Ионизирующее излучение электромагнитной природы вызывает формирование одиночных повреждений ДНК, в том числе с образованием прямых или косых двухнитевых разрывов (ДР) ДНК.

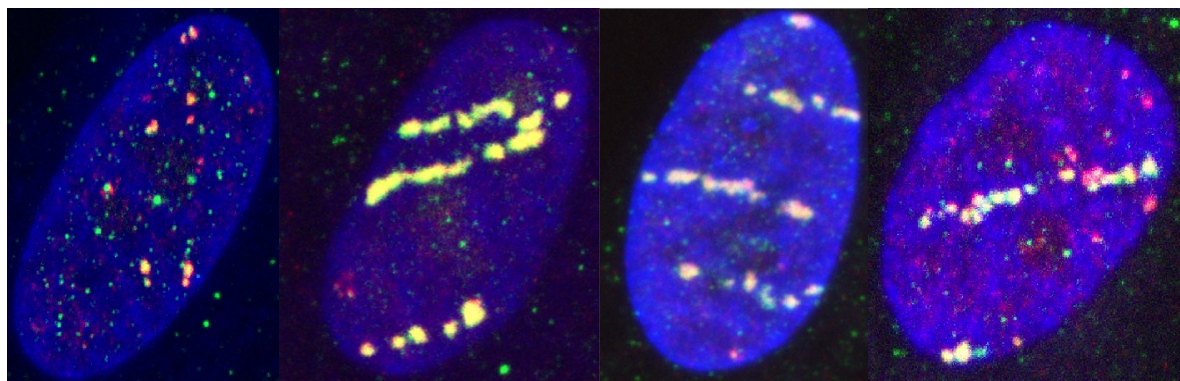
Прохождение тяжёлой заряженной частицы через нить ДНК вызывает множественные повреждения, формируя кластерный ДР ДНК. Трек тяжёлого иона имеет сложную структуру и состоит из сердцевины трека (принимаемой обычно около 20 ангстрем) и области дельта-электронов, формирующих своеобразный ёршик. Сердцевина трека разрывает нити ДНК, а область дельта-электронов накрывает большую область от этого разрыва, вызывая разрушение ковалентных связей и модифицируя основания и дезоксирибозу.



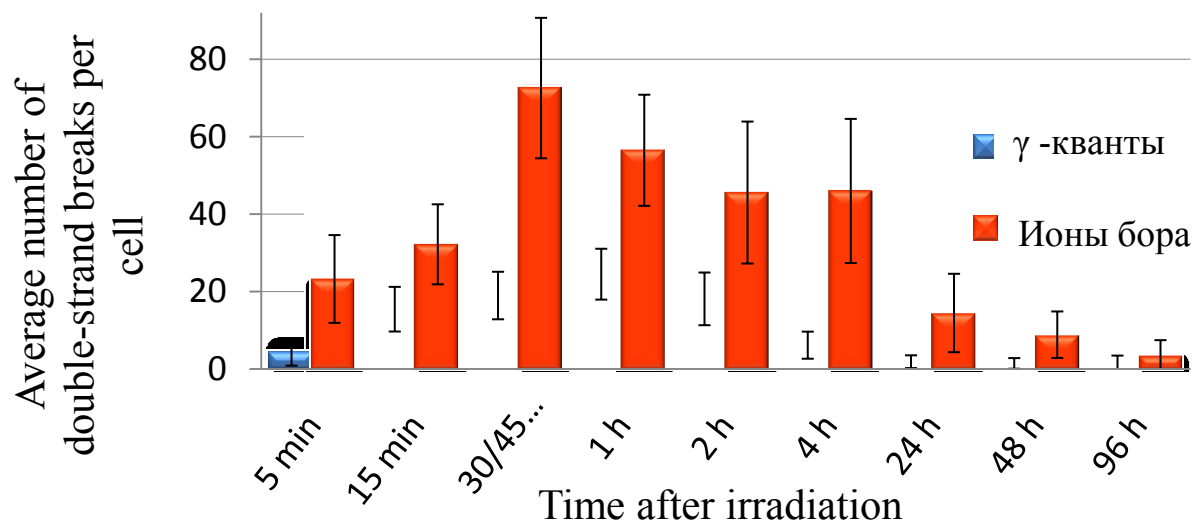
Повреждение и восстановление структуры ДНК при действии ускоренных тяжёлых ионов

γ -rays

^{11}B ions, 50 MeV/amu



Для анализа индукции и репарации ДР ДНК используются методы, основанные на иммуноцитохимическом окрашивании, позволяющем выявить структуры, возникающие на месте повреждений, в виде ярко флуоресцирующих микрообластей (точек), называемых ДНК-фокусами.



В отличие от случайно распределённых по площади ядра клеток ДНК-фокусов в случае фронтального облучения, при горизонтальном облучении ионами бора под углом 10 градусов видны отдельные треков вдоль траектории тяжёлой заряженной частицы.

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

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

Предельные 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 индивидуальные дозы, мЗв
Естественный фон	3,1	1,0 – 5,0
Медицинская диагностика	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

РАДИОНУКЛИДЫ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Природные

Космогенные

^3H , ^{14}C , ^7Be , ^{10}Be
 ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{26}Al ...

Искусственные

^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{137}Cs
 ^{60}Co , ^{99}Tc , ^{239}Pu , ^{241}Am ..

^{40}K , ^{87}Rb , ^{147}Sm , ^{150}Nd
 ^{176}Lu , ^{115}In , ^{138}La , ^{144}Nd ...

Естественные ряды

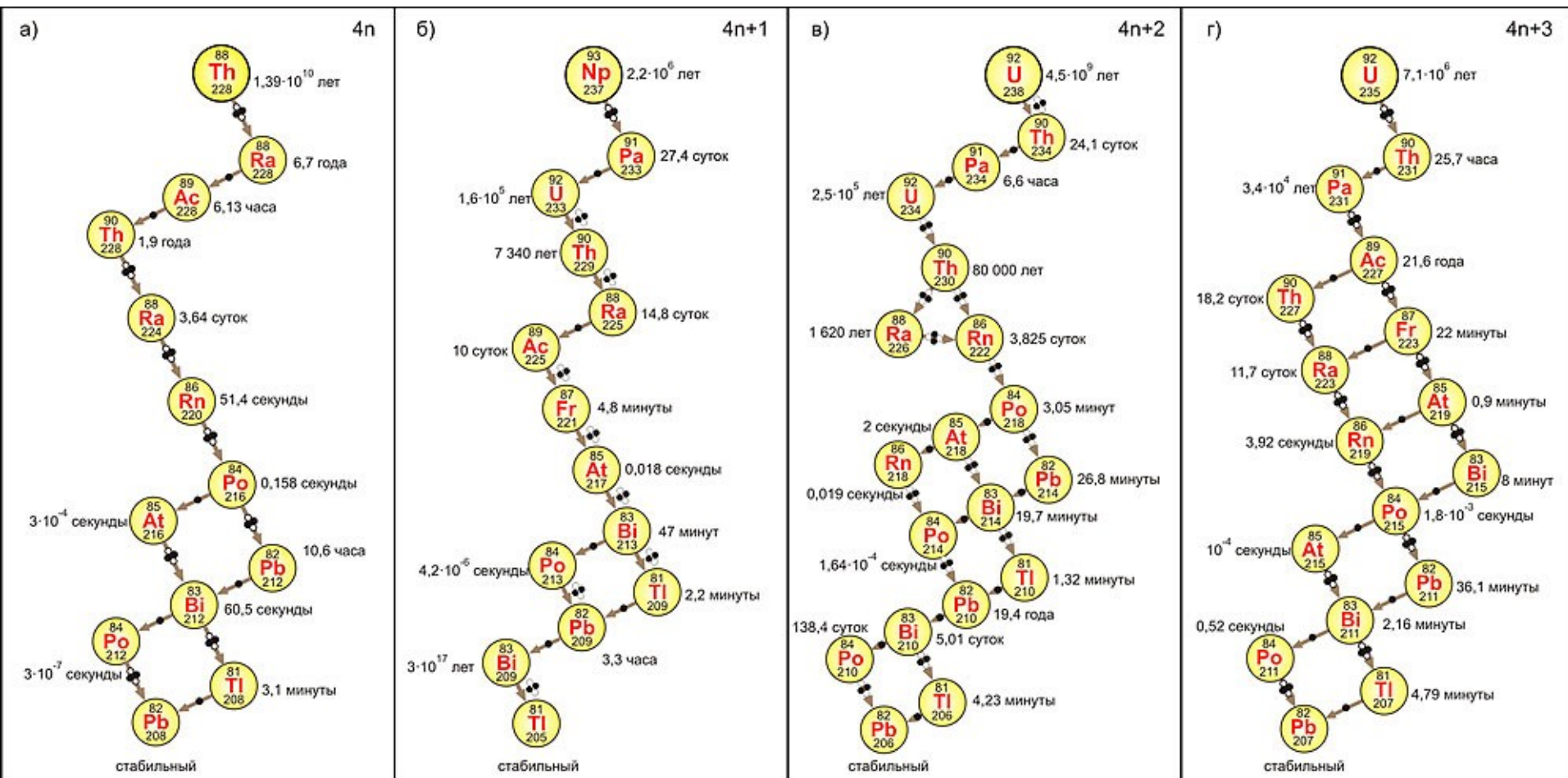
^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Po ...
 ^{235}U , ^{231}Pa , ^{227}Ac ...
 ^{232}Th , ^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{220}Rn ...

Природные радиоактивные нуклиды образуются в результате процессов, происходящих на Земле с момента ее образования

Космогенные нуклиды образуются на Земле в результате постоянного воздействия космического излучения

Искусственные нуклиды производятся человеком в тех или иных ядерных реакциях

Естественные радиоактивные ряды



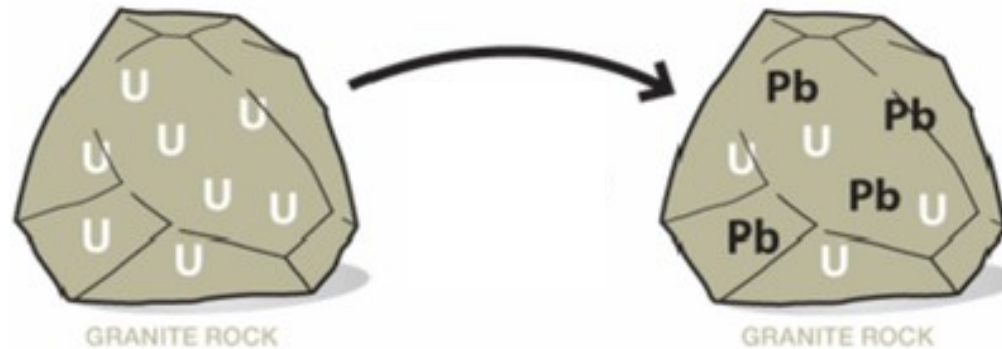
Ряд тория

Ряд нептуния
(распался за время
существования Земли)

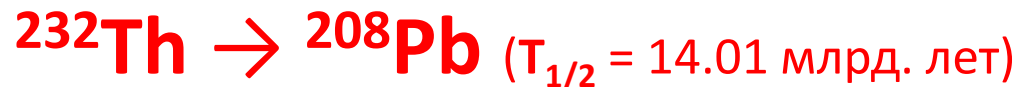
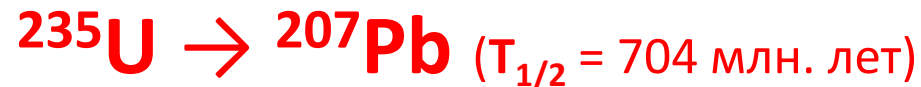
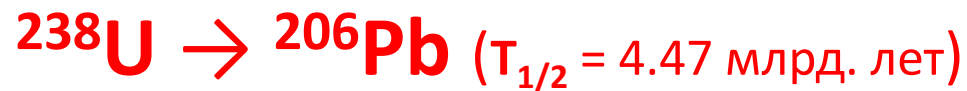
Ряд урана

Ряд актиния

Как определить возраст Земли?



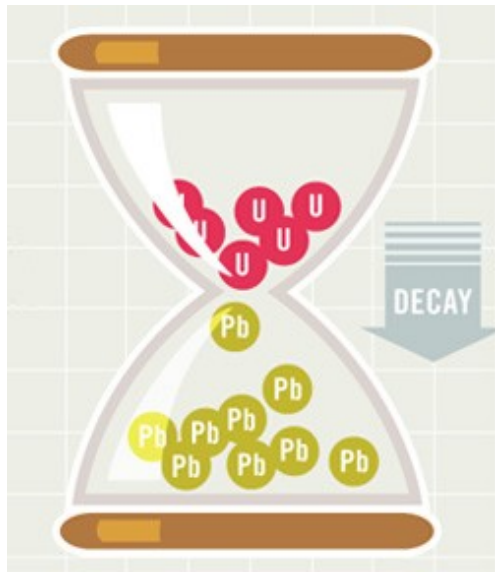
Изотоп	^{204}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb
Содержание в природе (в %)	1,4	24,1	22,1	52,4



Радиогенные изотопы свинца образовались в основном в результате распадов естественных рядов

^{204}Pb образовался вместе с планетой Земля

Как определить возраст Земли?



ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

$$dN = -\lambda N dt$$

Число ядер урана

$$N_U(t) = N_U(0)e^{-\lambda_U t}$$

Число ядер свинца за счет распада урана

$$N_{Pb}(t) = N_U(0)(1 - e^{-\lambda_U t}) = N_U(t)(e^{\lambda_U t} - 1)$$

Соотношение между изотопами свинца

$$\frac{N_{206Pb}(t)}{N_{204Pb}(t)} = \frac{N_{206Pb}(0)}{N_{204Pb}(0)} + \frac{N_{238U}(t)}{N_{204Pb}(t)} (e^{\lambda_{238U} t} - 1)$$

Как определить возраст Земли?

$$\Delta \left(\frac{N_{206}}{N_{204}} \right) = \frac{N_{206Pb}(t) - N_{206Pb}(0)}{N_{204Pb}(t) - N_{204Pb}(0)} = \frac{N_{238U}(t)}{N_{204Pb}(t)} (e^{\lambda_{238U}t} - 1)$$

$$\Delta \left(\frac{N_{207}}{N_{204}} \right) = \frac{N_{207Pb}(t) - N_{207Pb}(0)}{N_{204Pb}(t) - N_{204Pb}(0)} = \frac{N_{235U}(t)}{N_{204Pb}(t)} (e^{\lambda_{235U}t} - 1)$$

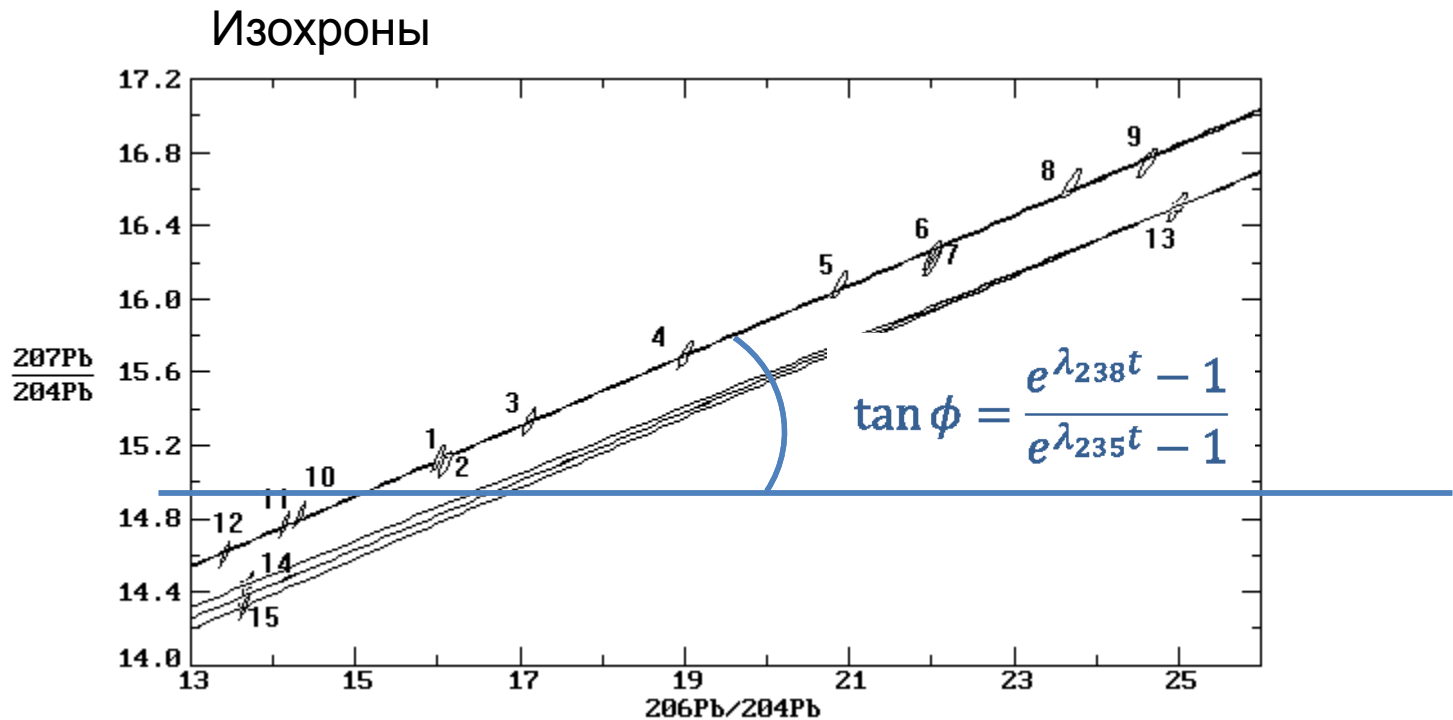
Изменение соотношения между изотопами свинца

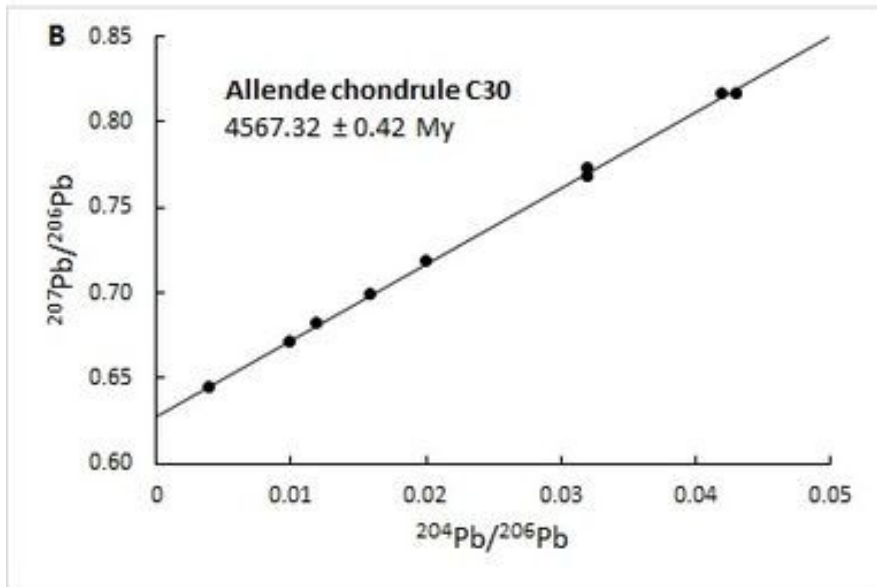
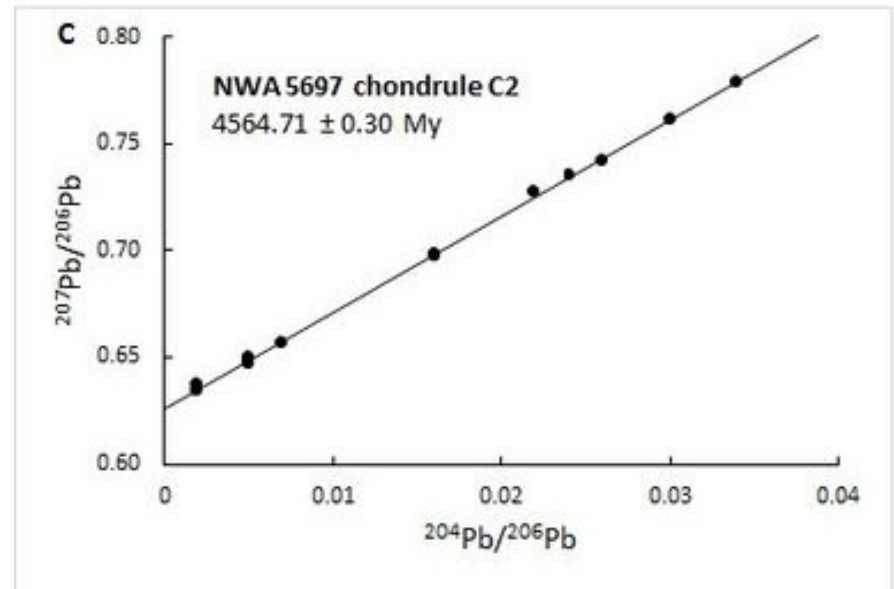
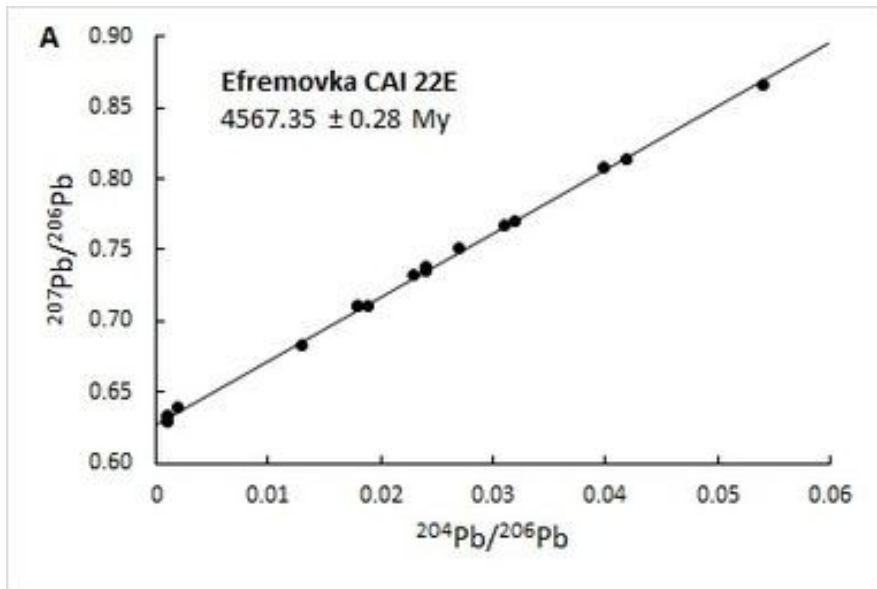
$$\frac{\Delta \left(\frac{N_{206}}{N_{204}} \right)}{\Delta \left(\frac{N_{207}}{N_{204}} \right)} = \frac{N_{238U}(t) (e^{\lambda_{238U}t} - 1)}{N_{235U}(t) (e^{\lambda_{235U}t} - 1)}$$

Как определить возраст Земли?

$$\frac{N_{238U}(t)}{N_{235U}(t)} = Const = 137,798 \pm 0,013$$

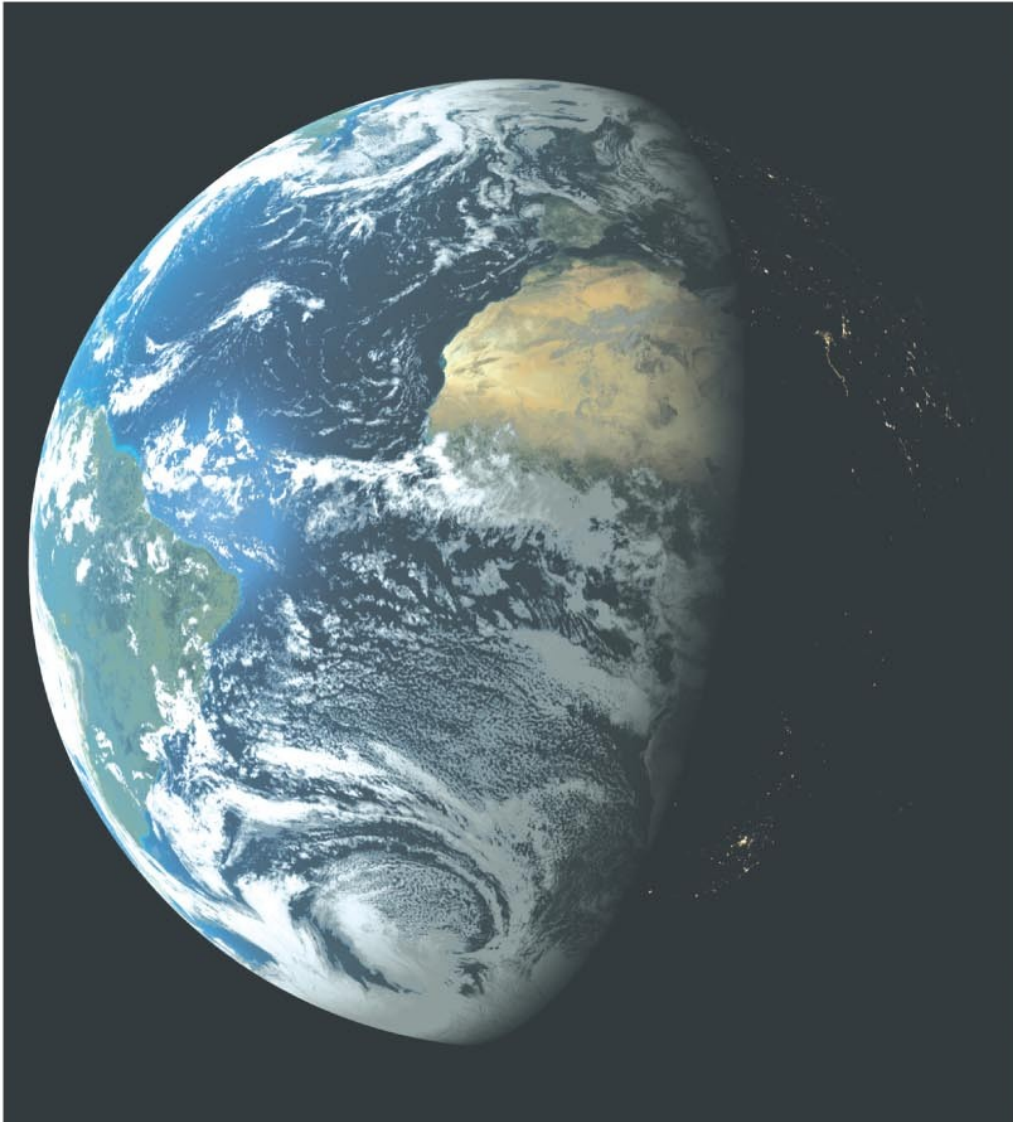
Постоянная распада $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$





Возраст Солнечной системы
 $T \sim 4567.7 \cdot 10^6$ лет
 определен методом ядерной хронологии

Connelly, J.N., Bizzarro, M., Krot, A.N., Nordlund, A., Wielandt, D., and M.A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, 338: 651 – 655.



Возраст Земли

$(4.54 \pm 0.05) \cdot 10^9$ лет

Ядерная хронология

Изотопы, используемые в ядерной хронологии

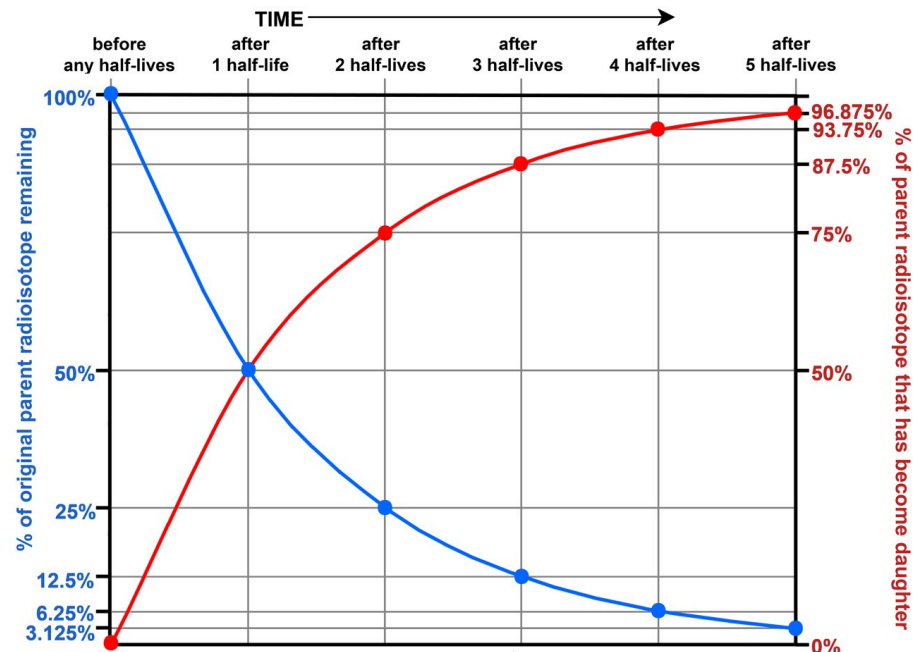
Исходный изотоп	Период полураспада, лет	Распространенность, %	Ядро-продукт
^{14}C	5700		^{14}N
^{40}K	$1.238 \cdot 10^9$	0.0117	^{40}Ar
^{87}Rb	$4.81 \cdot 10^{10}$	27.84	^{87}Sr
^{129}I	$1.57 \cdot 10^7$		^{129}Xe
^{187}Re	$4.12 \cdot 10^{10}$	62.6	^{187}Os
^{232}Th	$1.40 \cdot 10^{10}$	100	^{208}Pb
^{235}U	$7.04 \cdot 10^8$	0.7204	^{207}Pb
^{238}U	$4.468 \cdot 10^9$	99.2742	^{206}Pb

Ядерная хронология

- ❑ долгоживущие радиоактивные изотопы, образующиеся при взаимодействии космических лучей с ядрами атмосферы Земли
- ❑ долгоживущие радиоактивные изотопы, образовавшиеся во время формирования Солнечной системы
- ❑ долгоживущие изотопы радиоактивных семейств

Геохронология

- Уран -свинцовый метод
- Торий-свинцовый метод
- Свинец-свинцовый метод
- Рубидий-стронциевый метод
- Рений-осмиевый метод
- Калий-аргоновый метод



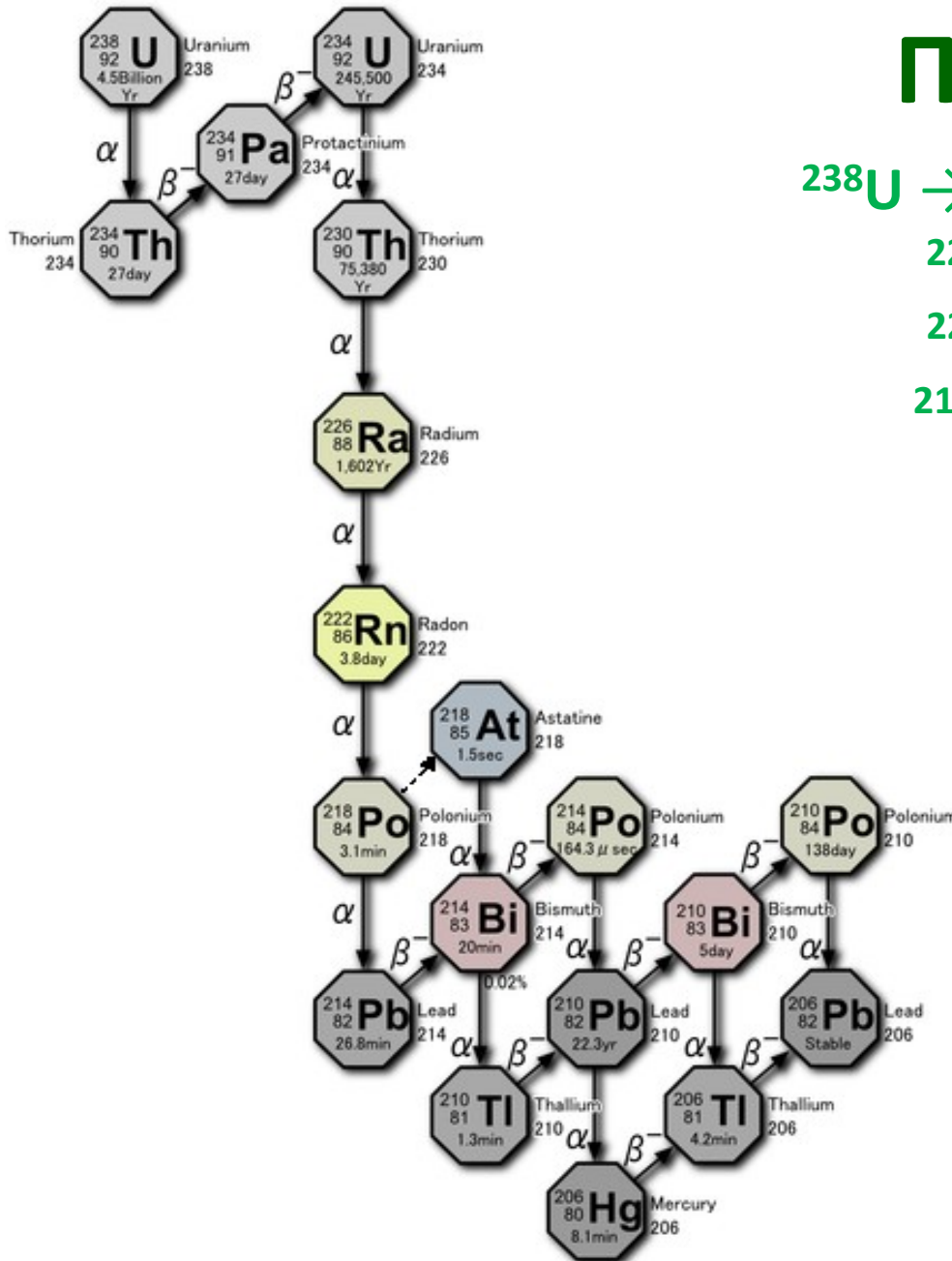
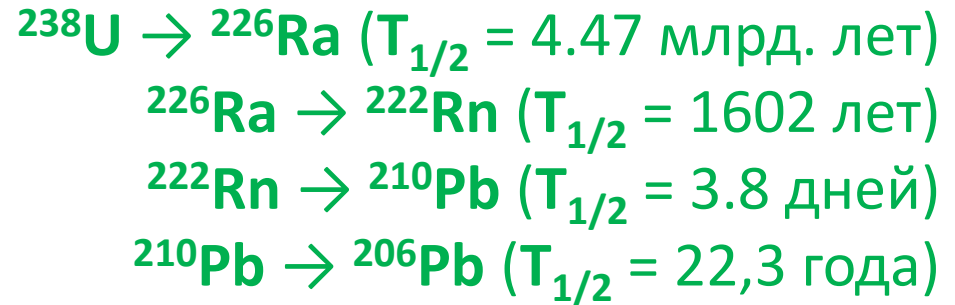
$$N_{Pb}(t)/N_U(t) = e^{\lambda_U t} - 1$$

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

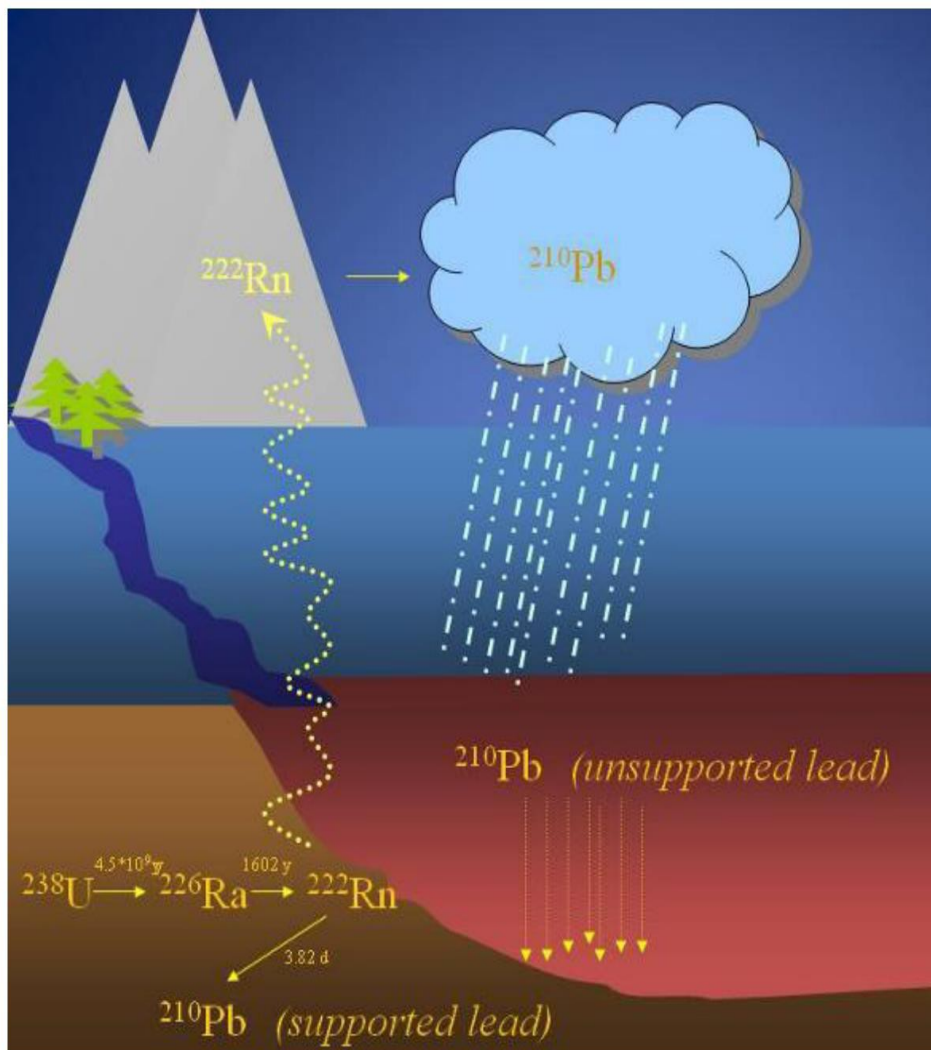
Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет около **0.35 мЗв**

Проблема радона



^{222}Ra образуется в ходе распада ряда урана и имеет свой период полураспада 3.8 дня. В результате дальнейших превращений образуются радиоактивные нуклиды тяжелых металлов.

Проблема радона

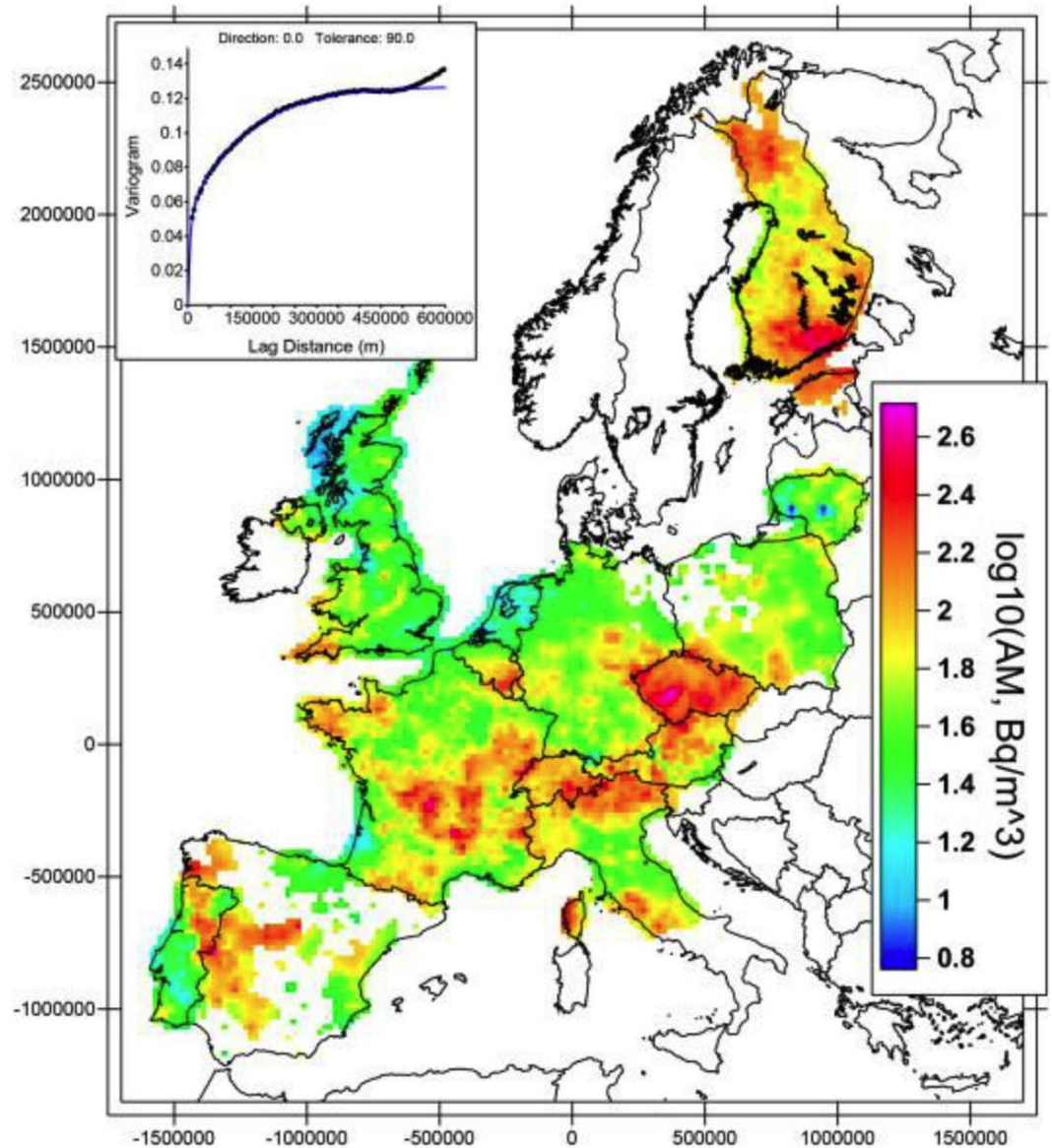


Проблема заключается в том, что радон, в отличие от остальных нуклидов ряда урана, – инертный газ и, благодаря этому переходит из скалистых пород в атмосферу. В результате как сам радон, так его радиоактивные продукты распада могут попадать в организм человека.

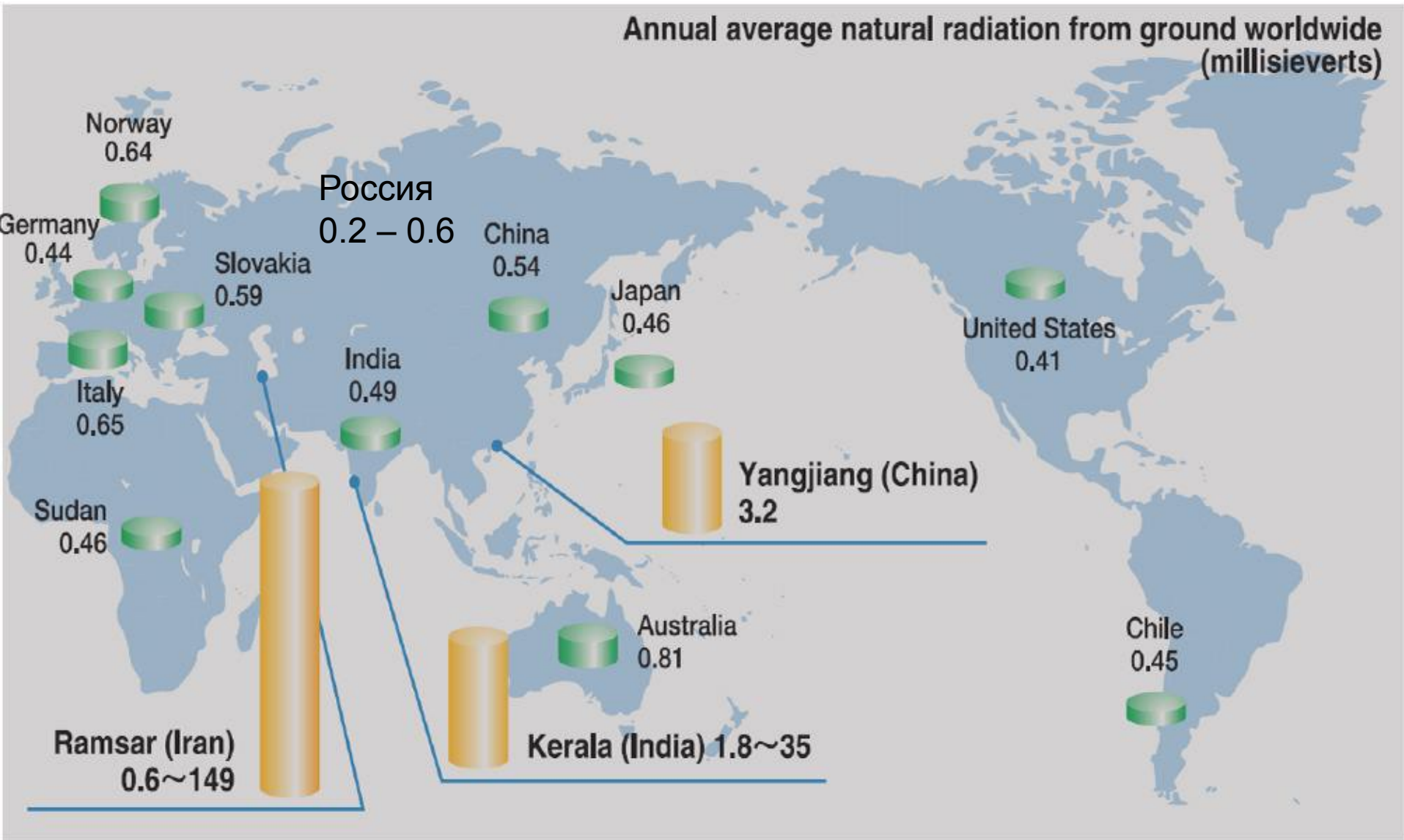
Вклад радона в среднюю эффективную эквивалентную дозу внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет свыше **1 мЗв**

Радон

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



Земные радионуклиды



Космическое излучение



Первичное космическое излучение – это потоки атомных ядер высоких энергий, заполняющих пространство Вселенной и постоянно бомбардирующих Землю

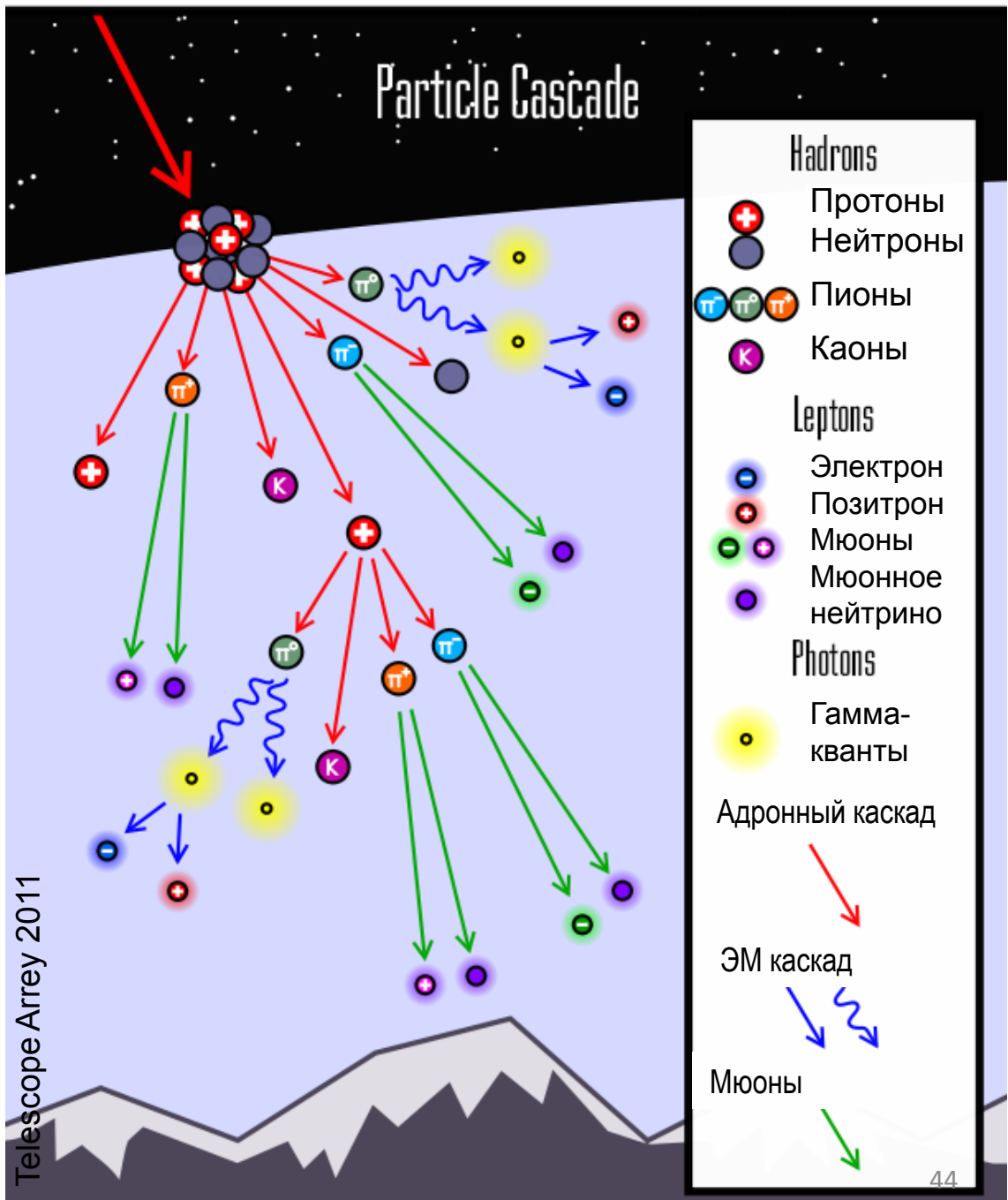
Вторичное космическое излучение возникает в результате взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы Земли.

Первичные космические лучи

	<i>Галактические космические лучи</i>	<i>Солнечные космические лучи</i>
Поток	$\approx 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\approx 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ядерная компонента ($\approx 90\%$ протонов, $\approx 10\%$ ядер гелия, $\approx 1\%$ более тяжелых ядер), 2. Электроны ($\approx 1\%$ от числа ядер), 3. Позитроны ($\approx 10\%$ от числа электронов), 4. Антиадроны ($< 0.01\%$) 	98–99% протоны, $\approx 1.5\%$ ядра гелия
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ

Каскад вторичных частиц в атмосфере Земли

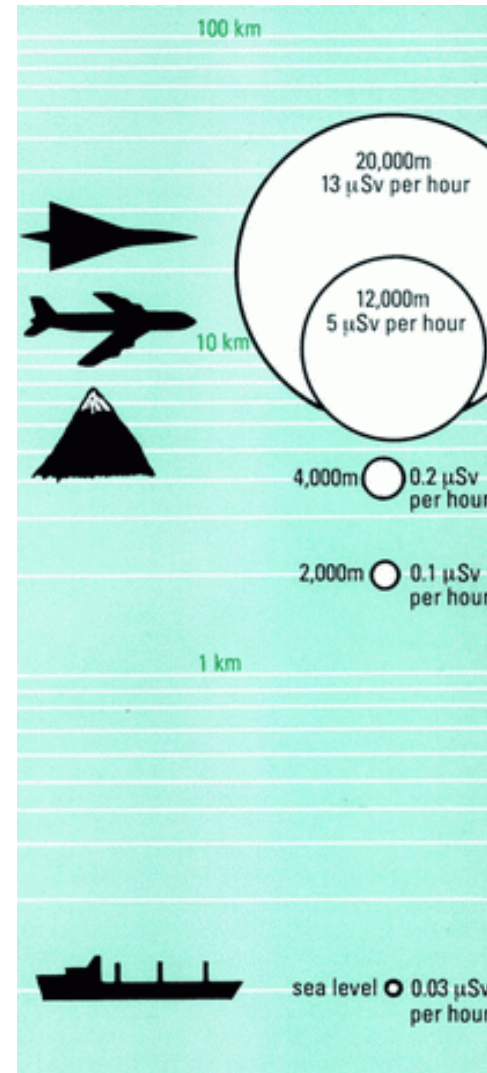
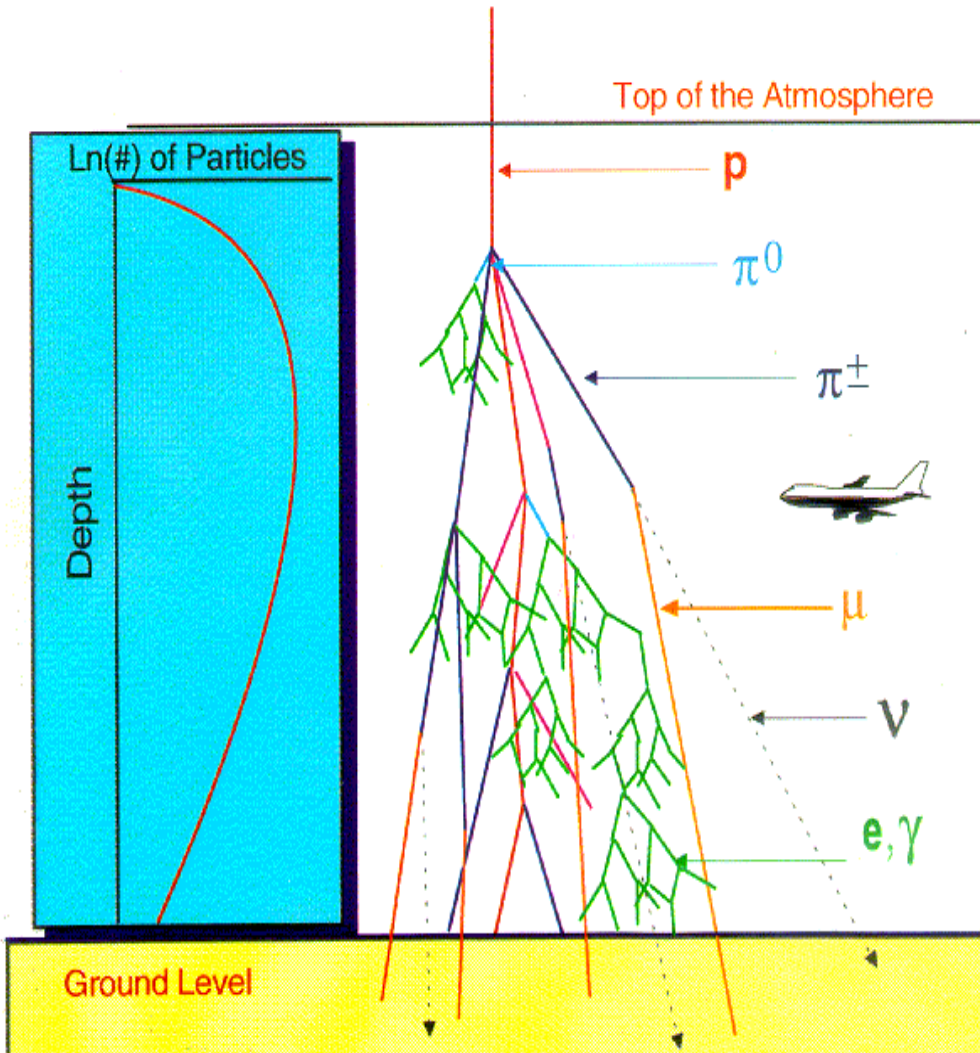
1938 г. Виктор Оже и
сотрудники. Открытие
широких атмосферных
ливней



Широкие атмосферные ливни

Первичный нуклон с энергией $E_N > 10^{12}$ эВ может испытать десятки столкновений с атомами атмосферы Земли, в результате чего развивается широкий атмосферный ливень. На малых расстояниях от оси ливня образуется диск вторичных частиц. По мере развития каскада образуются адронная, мюонная, электронно-фотонная, нейтринная компоненты ШАЛ. Прохождение космических лучей через атмосферу Земли сопровождается черенковским излучением, радиоизлучением и флюоресценцией частиц атмосферы. Частицы с энергией $\sim 10^{12}$ эВ на уровне моря образует $\sim 10^5 - 10^6$ электронов, 10^4 мюонов. Число адронов составляет 1% от общего числа частиц ШАЛ. Радиус ливня частицы с энергией $> 10^{15}$ эВ на поверхности Земли доходит до нескольких сотен метров, а число частиц — до 10^8 .

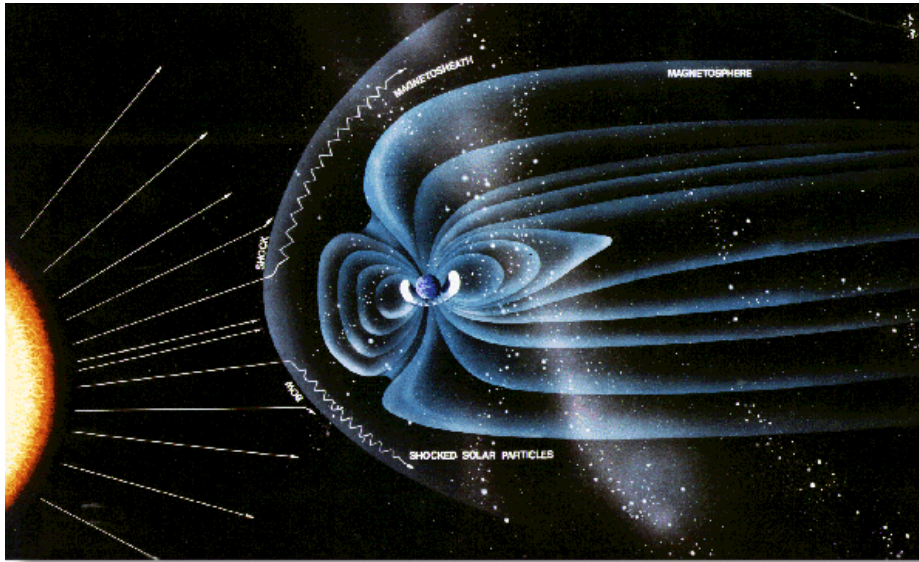
Радиация



5 мкЗв/час

0,03 мкЗв/час

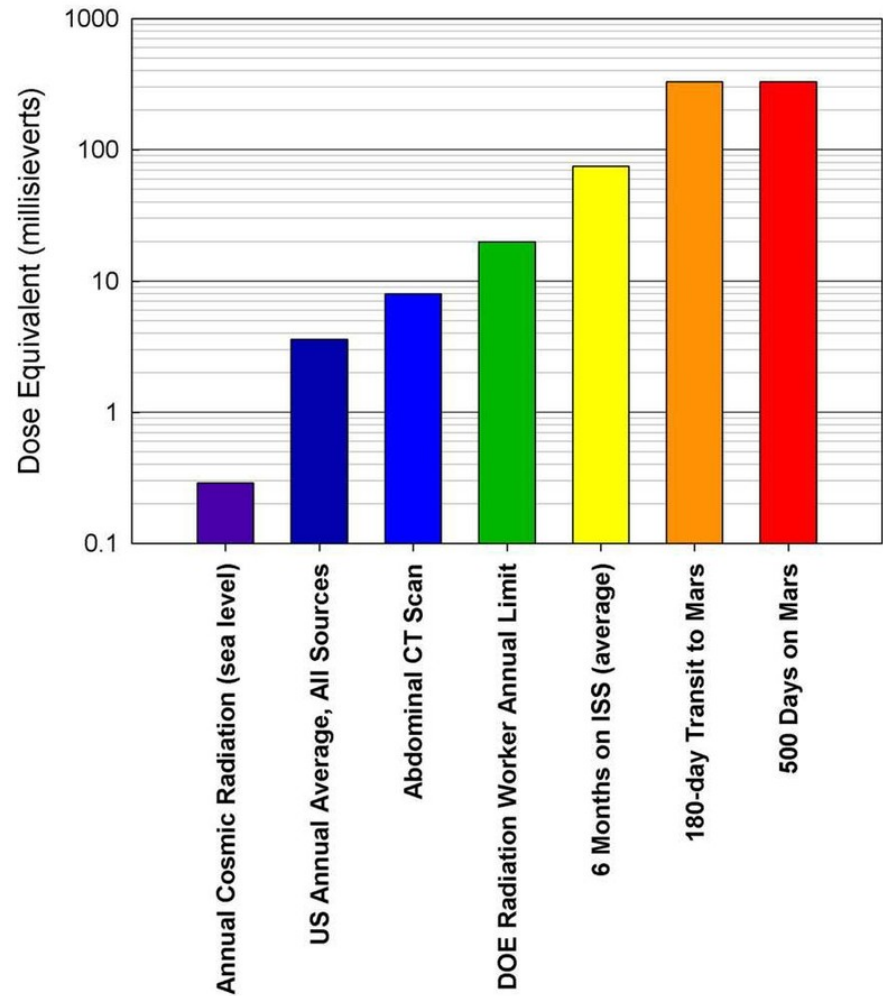
Космические лучи



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

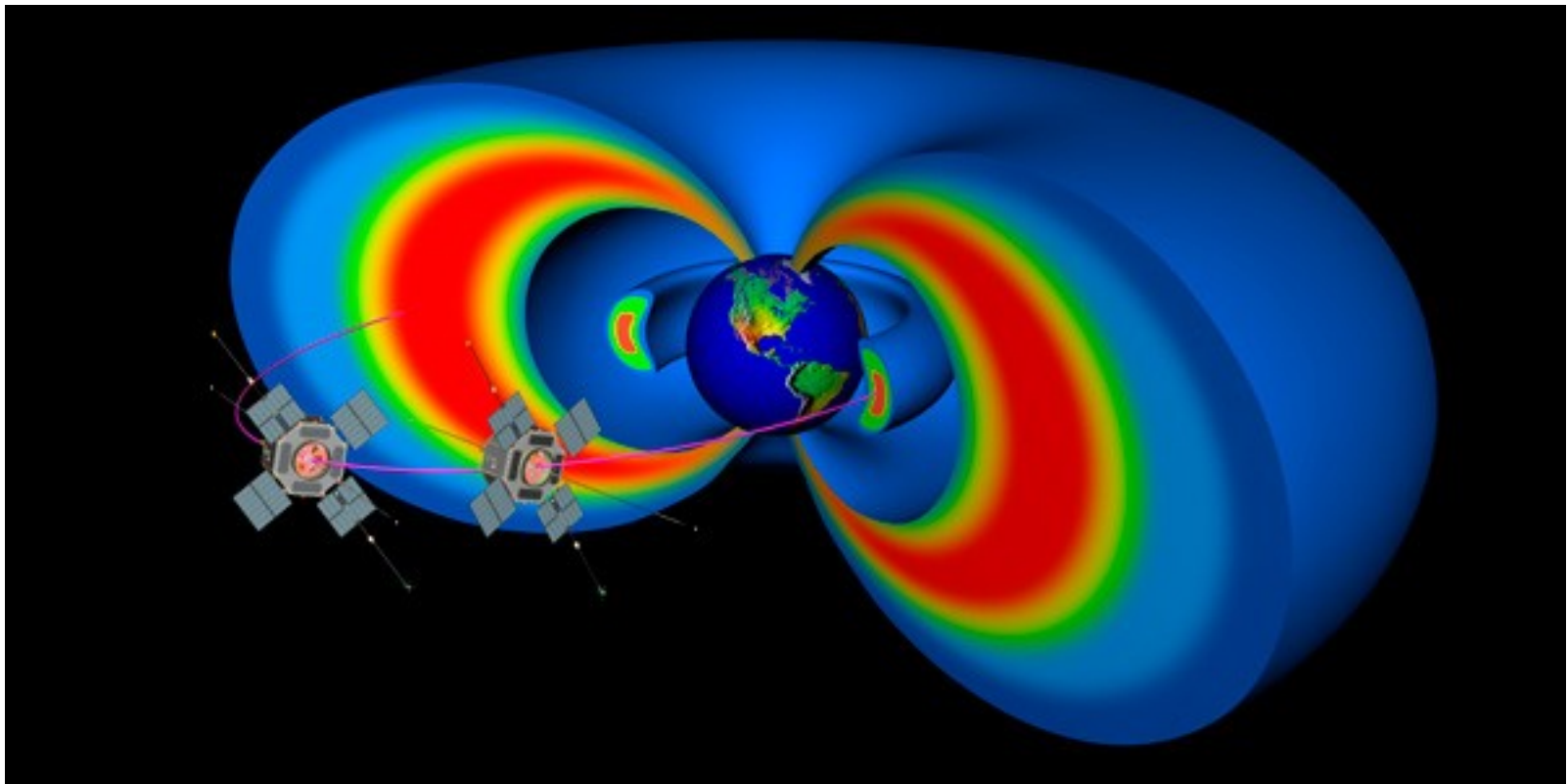
Эффективная доза от глобальных авиаперевозок составляет на душу населения в мире в среднем около **1 мкЗв/год**, а в Северной Америке около 10 мкЗв.

Выход за пределы радиационных поясов требует дополнительной защиты от космического излучения



МКС (400 км) – 1 мЗв/день

Радиационные пояса Земли



1958 г

Дж. Ван Аллен. Внутренний радиационный пояс на высоте ≈ 4000 км (протоны с энергией в десятки МэВ)

С.Н. Вернов, А.Е. Чудаков. Внешний пояс на высоте $\approx 17\,000$ км (электроны с энергией в десятки кэВ)

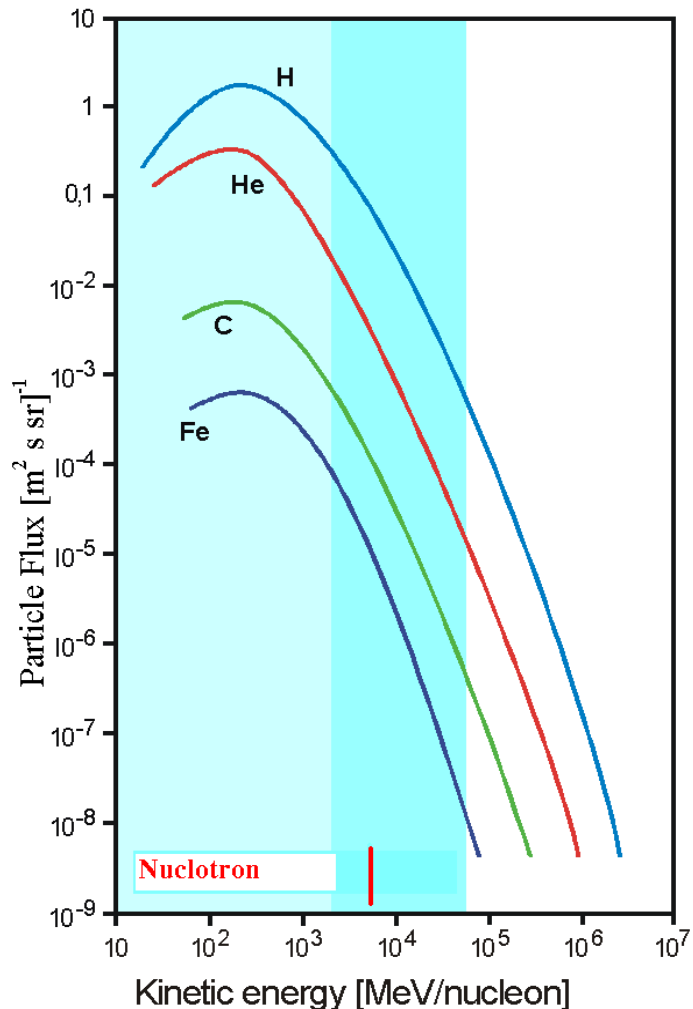
Радиационные пояса Земли

Для заряженной частицы с энергией, не превышающей несколько ГэВ, в магнитном поле Земли существуют магнитные ловушки — области пространства, в которые заряженные частицы не могут ни влететь извне, ни вылететь из них. Эти области имеют форму тороидов, охватывающих Землю в широтном направлении. Их удаленность от Земли зависит от энергии частицы. Чем выше энергия частицы, тем ближе они расположены к поверхности Земли. Вблизи Земли находятся зоны повышенной концентрации заряженных частиц — **радиационные пояса Земли**.

Внутренний радиационный пояс состоит в основном из протонов ($E_p > 35$ МэВ) и находится на расстоянии нескольких тысяч километров от поверхности Земли. Основным механизмом инжекции протонов во внутренний радиационный пояс Земли является распад нейтронов, которые образуются при взаимодействии космических лучей с ядрами атмосферы Земли. Максимум потока захваченных протонов внутреннего радиационного пояса Земли — на расстоянии $\sim 1,5$ радиуса Земли.

Внешний радиационный пояс начинается на высоте 60–75 тыс. км и состоит в основном из электронов с энергией от нескольких сотен кэВ до ~ 10 МэВ.

Потоки галактических тяжёлых ионов



В межпланетном пространстве плотность потока тяжелых частиц с зарядом $Z \geq 20$ составляет 160 в день на cm^2

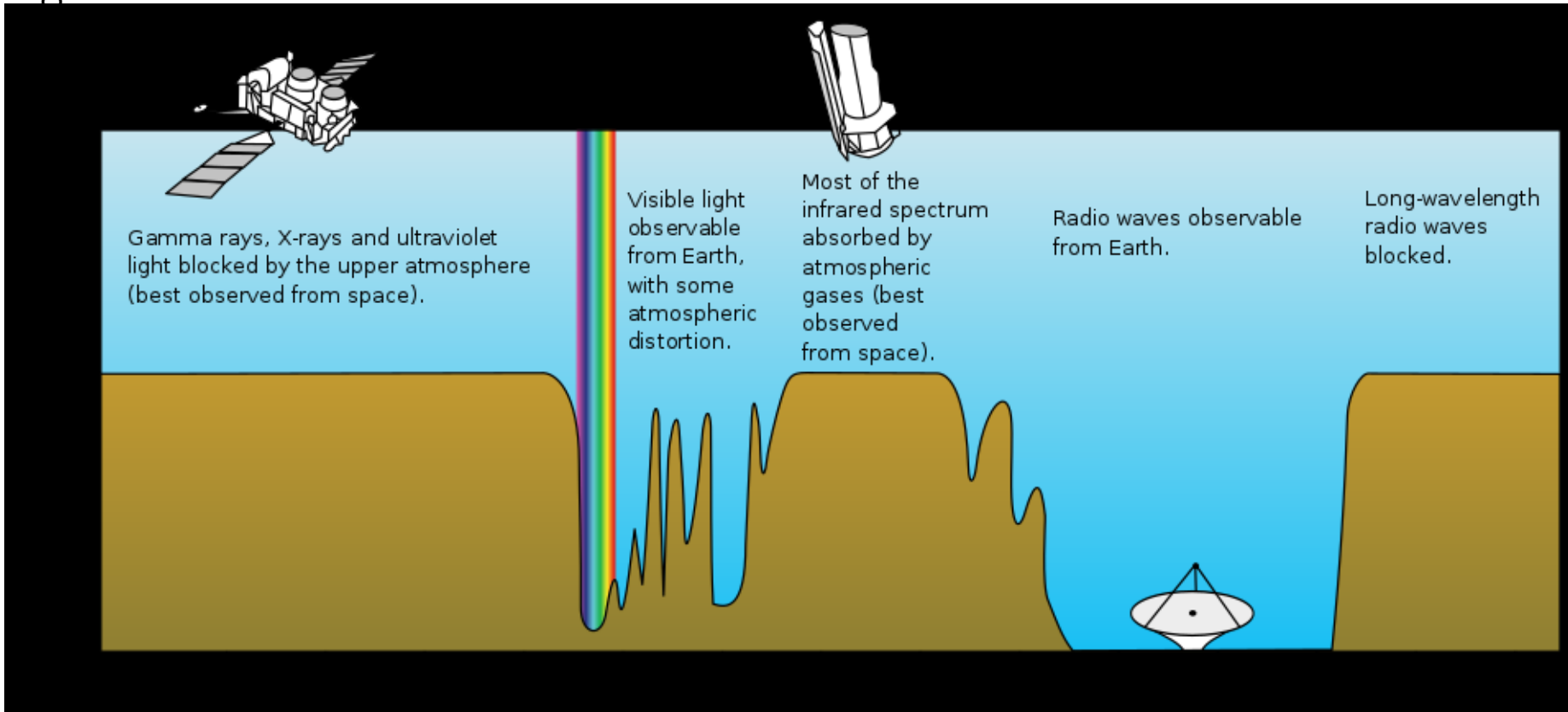
Последствия биологического действия тяжёлых ионов галактического космического излучения:

- Генетические нарушения:**
- генные и структурные мутации,
- раковые заболевания;
- Нарушение зрительных функций:**
- образование катаракты;
- повреждение сетчатки;
- Нарушение функций ЦНС**

Электромагнитное излучение

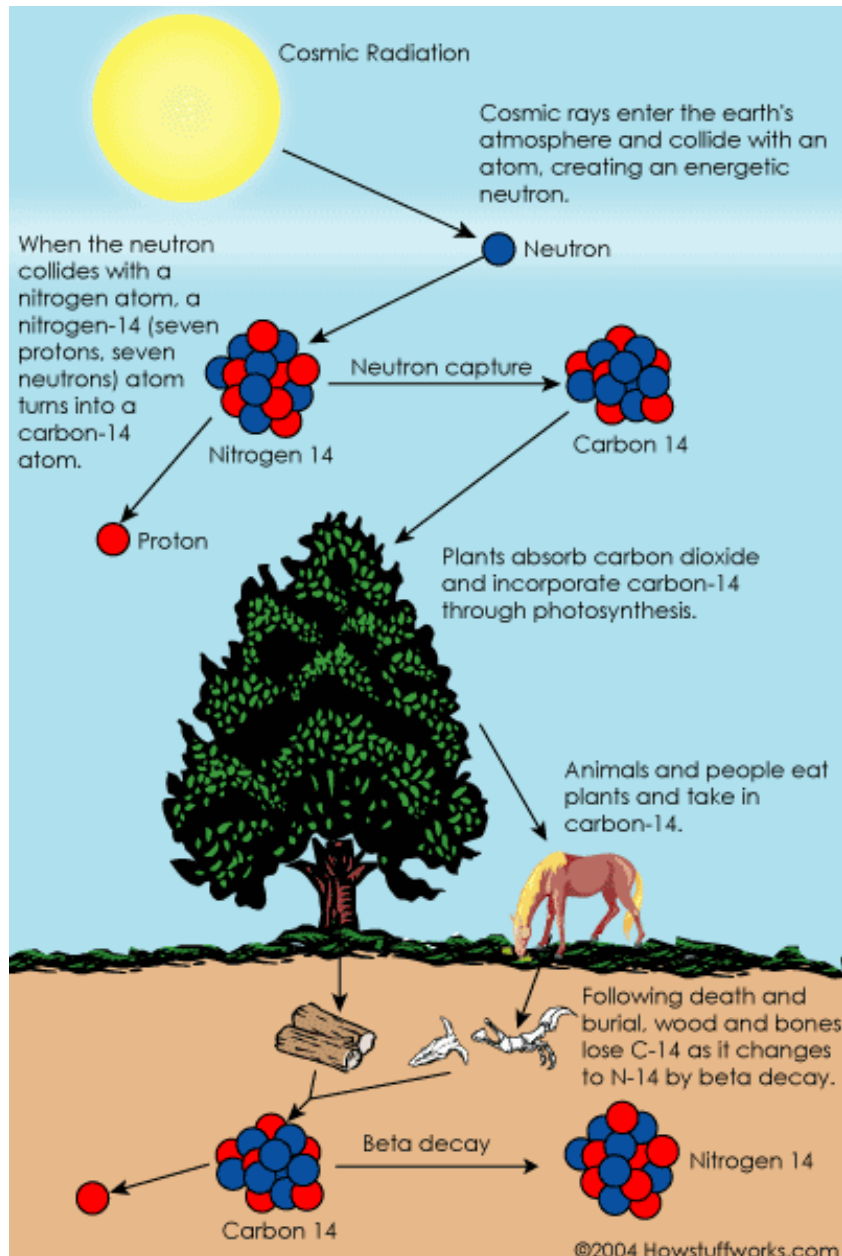
От высокоэнергетичного электромагнитного излучения нас защищает атмосфера

осфере

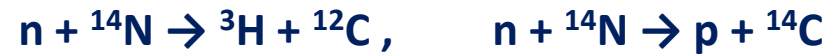


Длина волны

Космогенные радионуклиды



Частицы космических лучей приводят также к ядерным реакциям в атмосфере



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

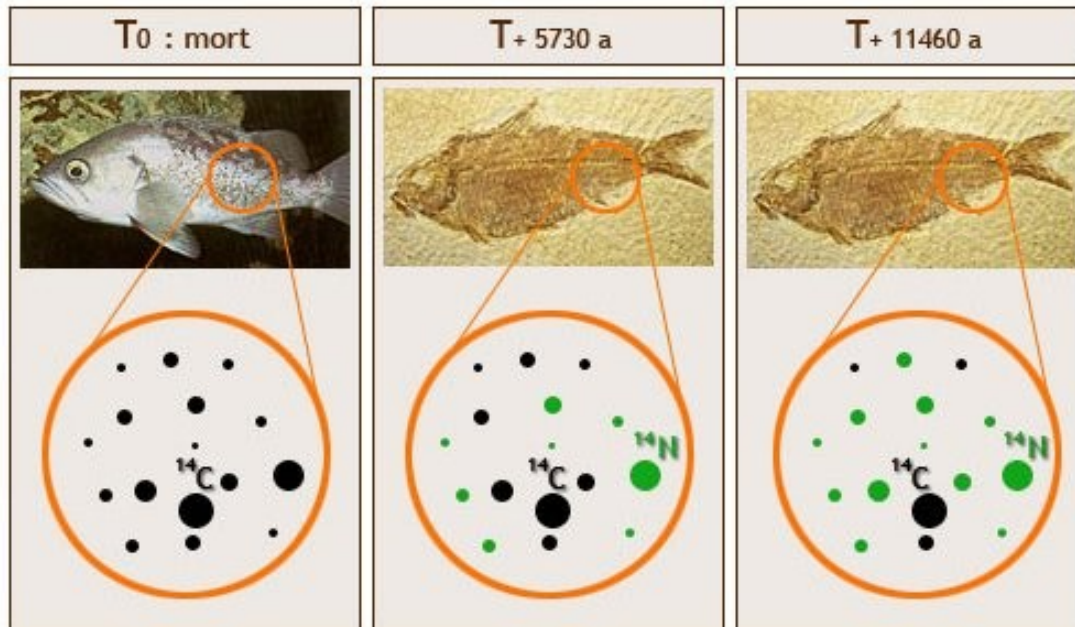
Радионуклид	Поступление, Бк/год	Годовая эффективная доза, мкЗв
${}^3\text{H}$	250	0.004
${}^7\text{Be}$	50	0.002
${}^{14}\text{C}$	20000	12
${}^{22}\text{Na}$	50	0.15

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

Радиоуглеродный метод



$$T_{1/2} ({}^{14}\text{C}) = 5700 \pm 30 \text{ лет}$$



Метод пригоден для оценки промежутков времени, соизмеримых с периодом полураспада ${}^{14}\text{C}$

Радиоактивный изотоп углерода ${}^{14}\text{C}$ образуется в атмосфере преимущественно под действием космических лучей.

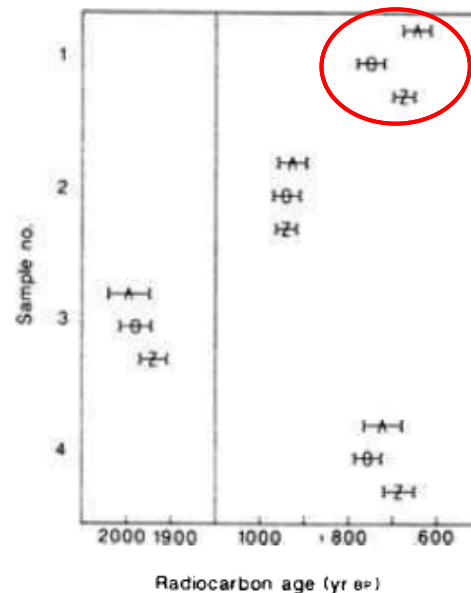
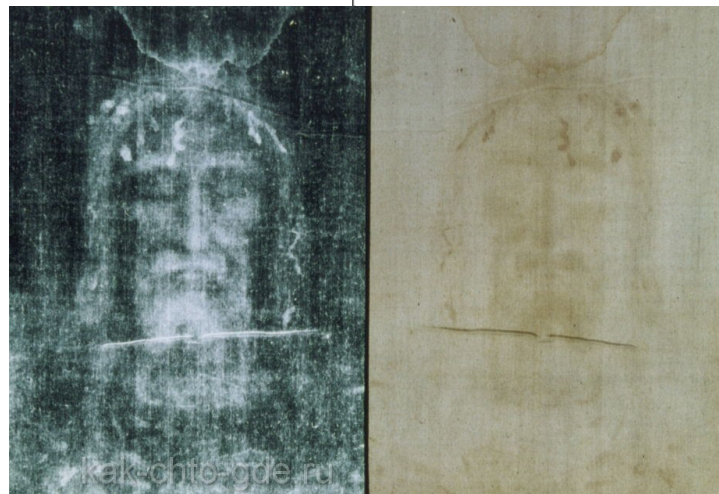
Пока организм жив, концентрация ${}^{14}\text{C}$ в нем находится в равновесии с окружающей средой. Данный изотоп в основном определяет радиоактивность живого организма. При прекращении поступления ${}^{14}\text{C}$ с остановкой обмена веществ радиоактивность органических останков начинает падать. Измеряя остаточную активность, можно оценить возраст предмета.

Radiocarbon dating of the Shroud of Turin

P. E. Damon¹, D. J. Donahue², B. H. Gore³, A. L. Hatheway⁴, A. J. T. Jull⁵,
 T. W. Linick⁶, P. J. Sercel⁷, L. J. Toolin⁸, C. R. Bronk⁹, E. T. Hall¹,
 P. E. M. Hedges¹⁰, P. Housley¹¹, I. A. Law¹², C. Perry¹³, G. Bonani¹⁴, S. Trumbore¹⁵,
 M. J. van der Meer¹⁶, S. G. E. Bowman¹⁷, M. N. Leese¹⁸ & M. S. Tite¹⁹

¹Department of Physics, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA
²Department of Chemistry and History of Art, University of Oxford, Oxford, OX1 3QJ, UK
³ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich, Switzerland
⁴Department of Earth and Environmental Science, Columbia University, Palisades, New York 10964, USA
⁵Department of Physics, University of Cambridge, Cambridge, CB2 3EG, UK

The Shroud of Turin has been dated by accelerator mass spectrometry in laboratories at Arizona, Oxford and Zürich. Three samples whose ages had been determined independently were also dated. The results show that the linen of the Shroud of Turin is medieval.



Mean radiocarbon dates, with $\pm 1\sigma$ errors, of the Shroud of Turin and control samples, as supplied by the three laboratories (A, Arizona; O, Oxford; Z, Zurich) (See also Table 2.) The shroud is sample 1, and the three controls are samples 2-4. Note the break in age scale. Ages are given in yr BP (years before 1950). The age of the shroud is obtained as AD 1260-1390, with at least 95% confidence.

В три различные лаборатории было направлено по 4 образца (образец плащаницы и три контрольных). Результаты довольно хорошо согласуются между собой. Для образца плащаницы получен результат

1260 – 1390 г

Радиоуглеродный метод

PYRAMIDS CARBON-DATING PROJECT



Ладья Солнца. Длина – 43,3, ширина – 5,6 м.
RC датировка пирамиды - около 2977 г. до н.э.
Историческая датировка – около 2566 г. до н. э.
RC датировка ладьи - около 3400 г. до н.э.
(PYRAMIDS CARBON-DATING PROJECT 1984)



ПРОБЛЕМЫ

- (1) Загрязнение образцов
- (2) Непостоянство процентного содержания ^{14}C в атмосфере
- (3) Не доказано однородное распределение ^{14}C в атмосфере
- (4) Содержание ^{14}C в предмете может быть неоднородным
- (5) Человеческий фактор

Радиоуглеродный метод

PYRAMIDS CARBON-DATING PROJECT

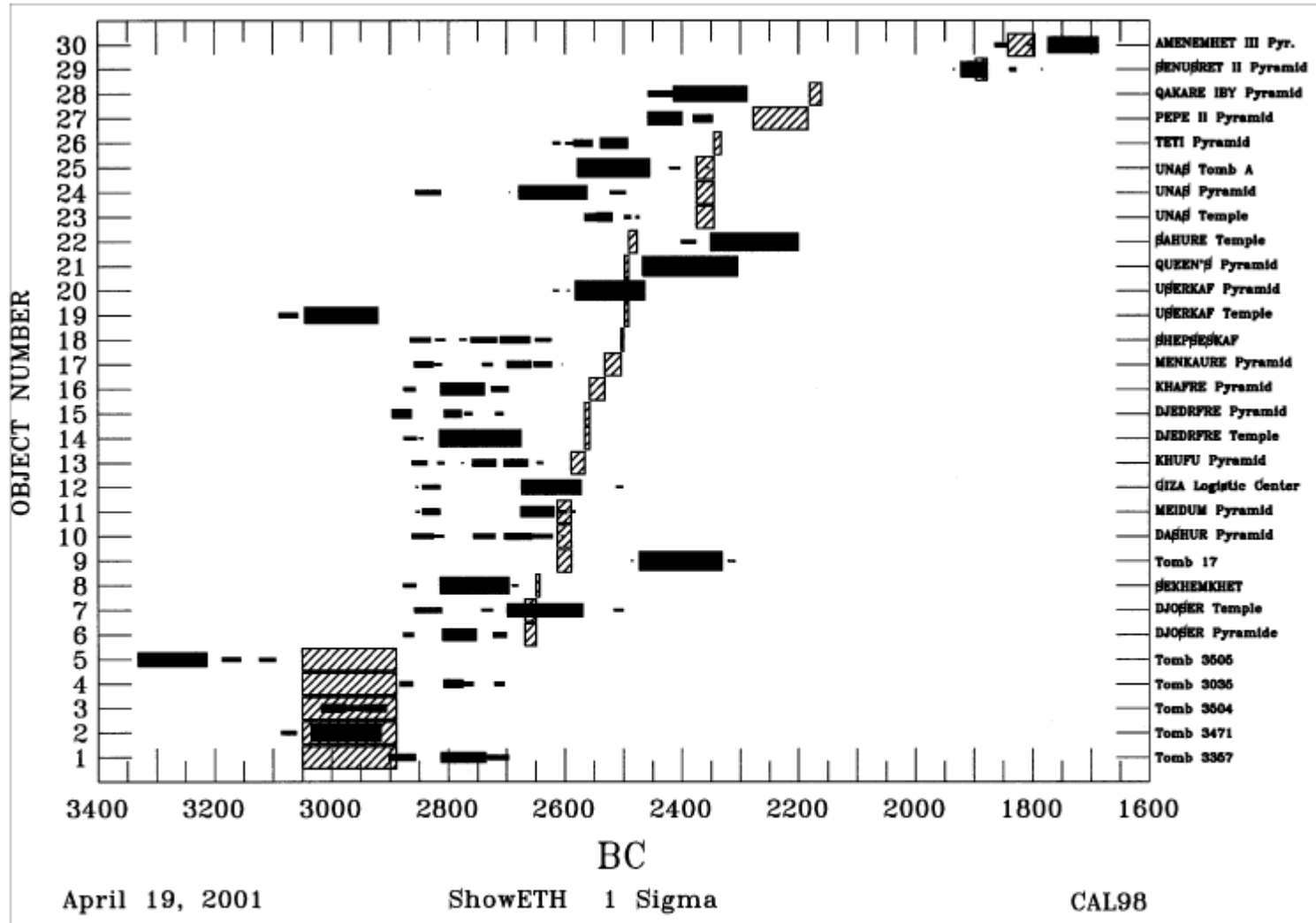
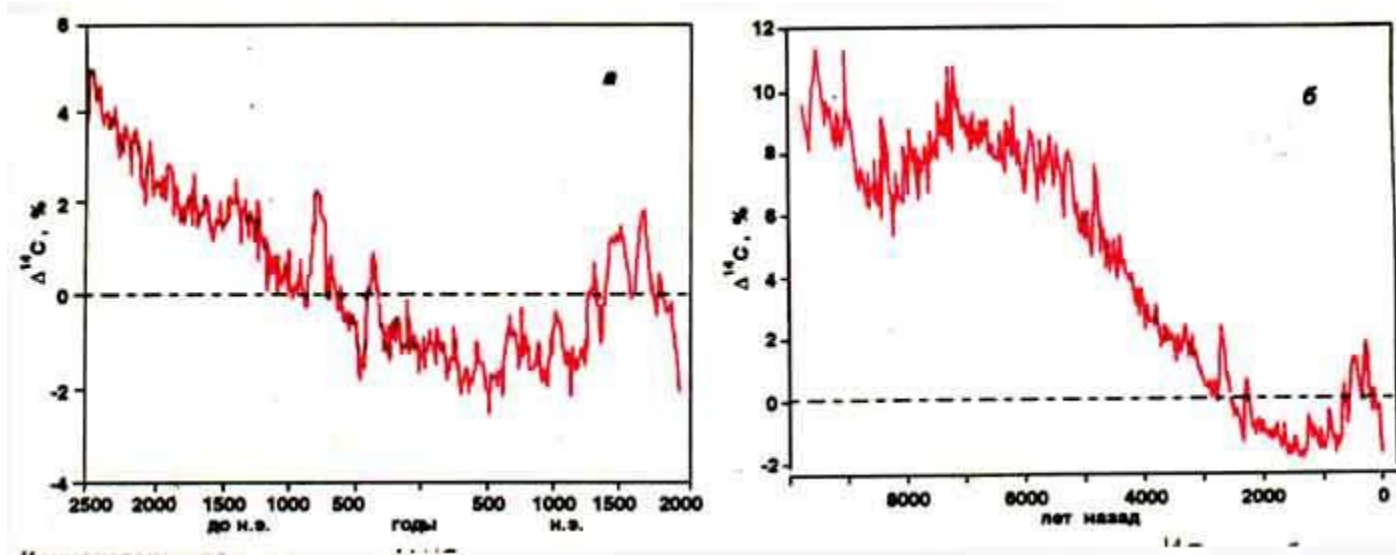


Figure 1 Comparison of the calibrated ^{14}C ranges (horizontal black bars) with the historical chronology of Clayton (1994; hatched areas). The width of the black bars is proportional to the probability of finding the true age within the corresponding one sigma range.

Georges Bonani et al. *RADIOCARBON*,
Vol 43, Nr 3, 2001, p 1297–1320

Радиоуглеродный метод



Концентрация радиоуглерода ($\Delta^{14}\text{C}$ - отклонение от уровня международного стандарта радиоуглерода) в образцах долгоживущих деревьев известного возраста: а - в блоках древесины по 10-летиям за 4500 лет; б - в блоках древесины по 20-летиям колец за последние 9600 лет.

В. А. Дергачев Природа, 1994, № 1, стр. 3-15

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

← Ядерные
испытания

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

