

Радиоактивность вокруг нас

Дзюба Алексей

Темы занятия

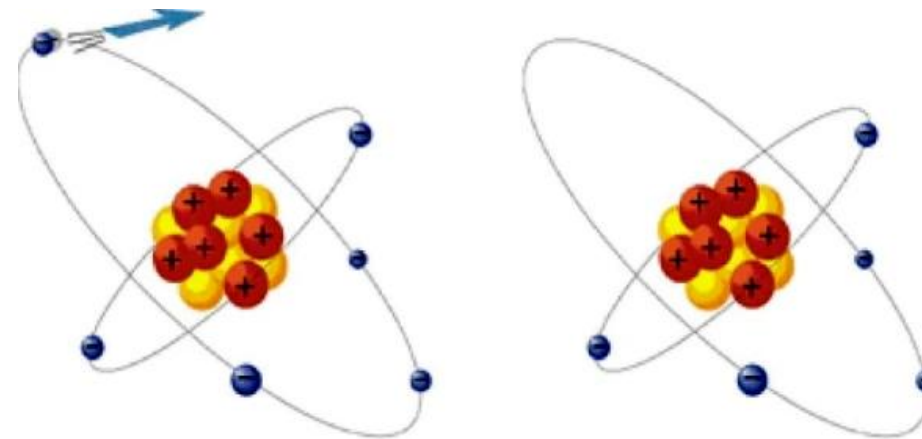
- Ионизирующее излучение (ИИ)
 - Виды ИИ / Источники ИИ / Единицы измерения
- Некоторые примеры радиоактивности
 - Калий-40 / Альфа-ряды / Америций-241
- Некоторые методы измерения ИИ
 - Счетчики Гейгера / Сцинтилляционные детекторы / Полупроводниковые детекторы
- Схема проведения измерений
 - Фоновые условия / Время измерения
- Основы статистики для счетных измерений
 - Флуктуации числа отсчетов / Обработка спектров
- Активационный анализ
 - Пример золото-198



Основные понятия



Что такое ионизирующее излучение?



ИИ: до и после

- **Ионизация** — процесс образования ионов из нейтральных атомов или молекул.
 - Положительно заряженный ион образуется, если электрон в молекуле **получает достаточную энергию** для преодоления потенциального барьера, равную ионизационному потенциалу.
- **Ионизирующее излучение** — потоки элементарных частиц или атомных ядер, способные ионизировать вещество.
 - **Непосредственно ионизирующее излучение** — ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении.
 - **Косвенно ионизирующее излучение** — ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызывать ядерные превращения.
 - Косвенно ионизирующее излучение: фотоны (γ) и нейтроны (n)

Какие частицы можно **напрямую** детектировать?

- Электроны (e^-) и позитроны (e^+) - **РАДИОАКТИВНОСТЬ**
- Атомные ядра, например, альфа-частицы (α) – ядра ^4He
 - Состоят из протонов и нейтронов
 - Анти-ядра, состоят из антипротонов и антинейтронов
- Протоны (p) и антипротоны (\bar{p}) - **УСКОРИТЕЛИ**
 - Частица, состоящая из трёх кварков или из трёх антикварков
- Электрически заряженные π и K мезоны
 - Частицы, образованные парами кварк-антикварк
- Мюоны (μ^\pm) – **КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ**
 - Более тяжелый аналог электронов и позитронов
- **Все эти частицы имеют электрический заряд!**

Косвенно ионизирующее излучение: на примере фотонов (γ)

Электроны и позитроны ионизируют вещество

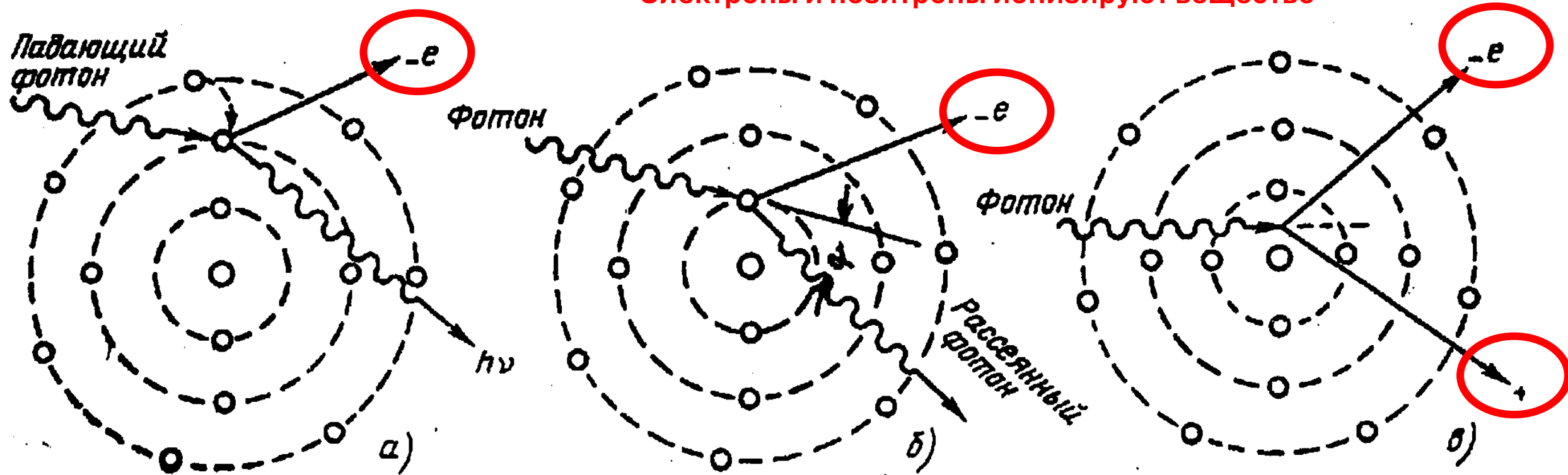
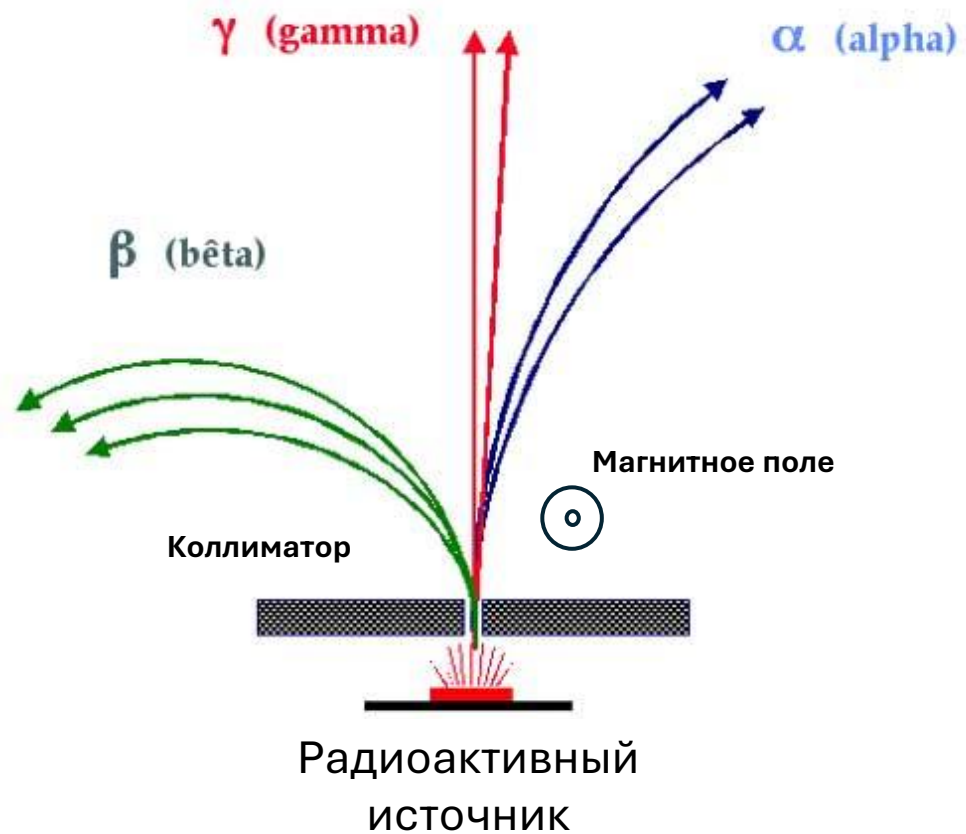
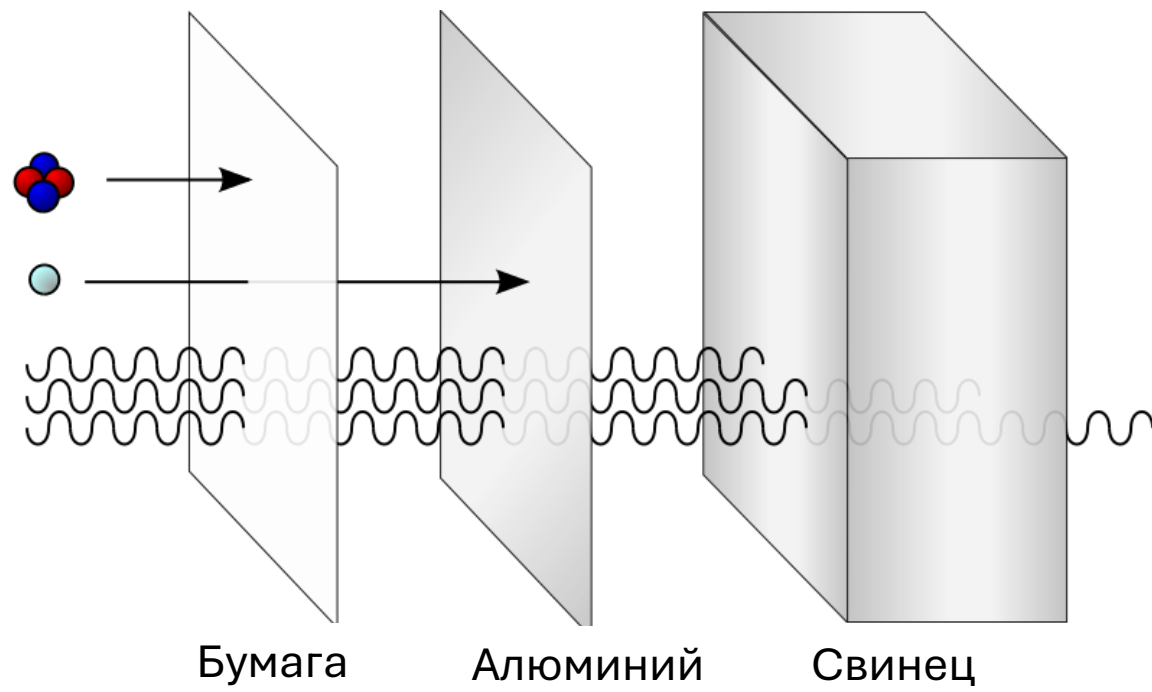


Рис. 1 Схема взаимодействия гамма-излучения с веществом:

а — фотоэффект; б — комптон-эффект; в — эффект образования пар; $-e$ — электрон; $+e$ — позитрон; $h\nu$ — рентгеновское излучение

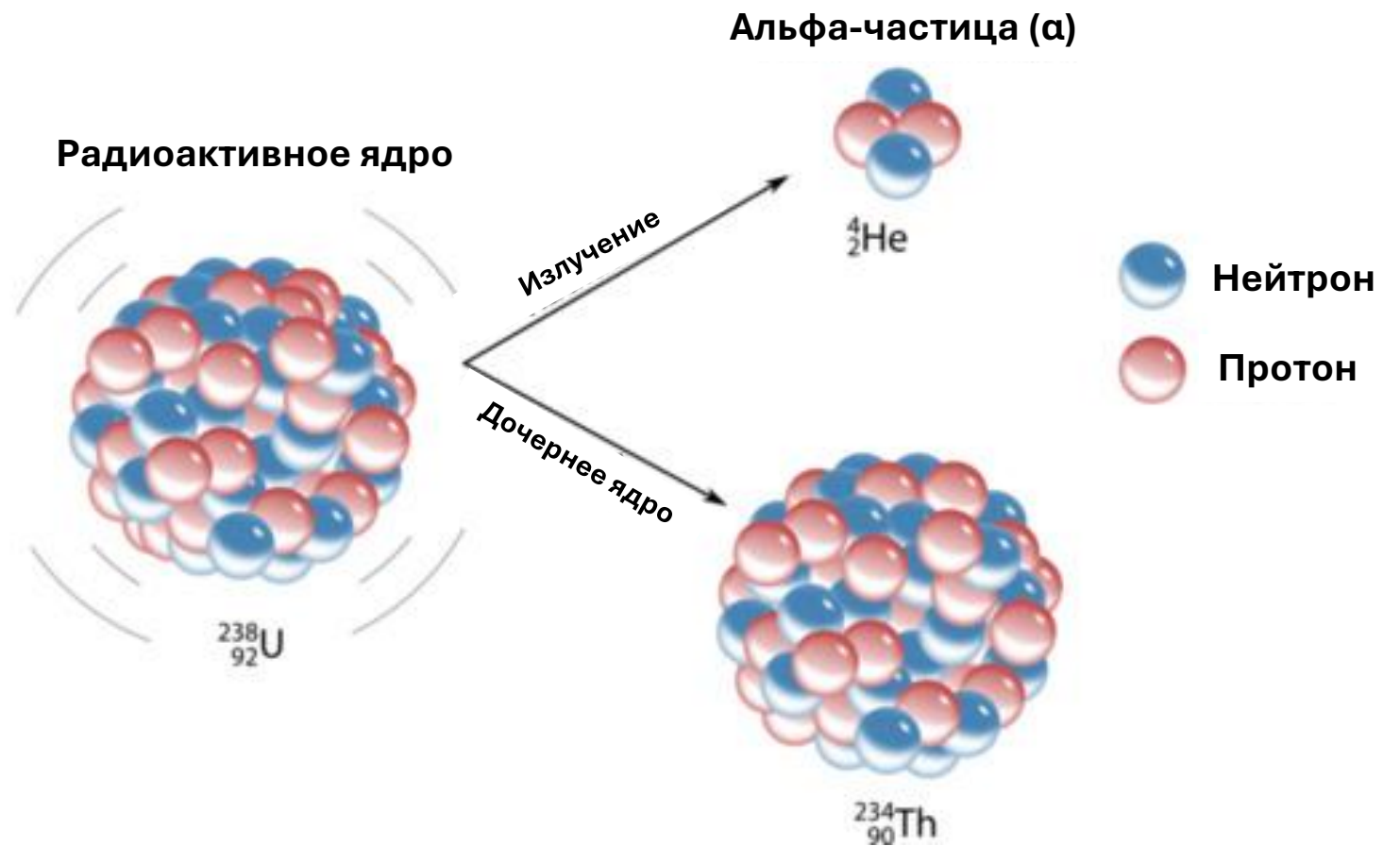


α
 β
 γ



Три вида ядерной радиоактивности

Альфа-распад



Дискретный спектр

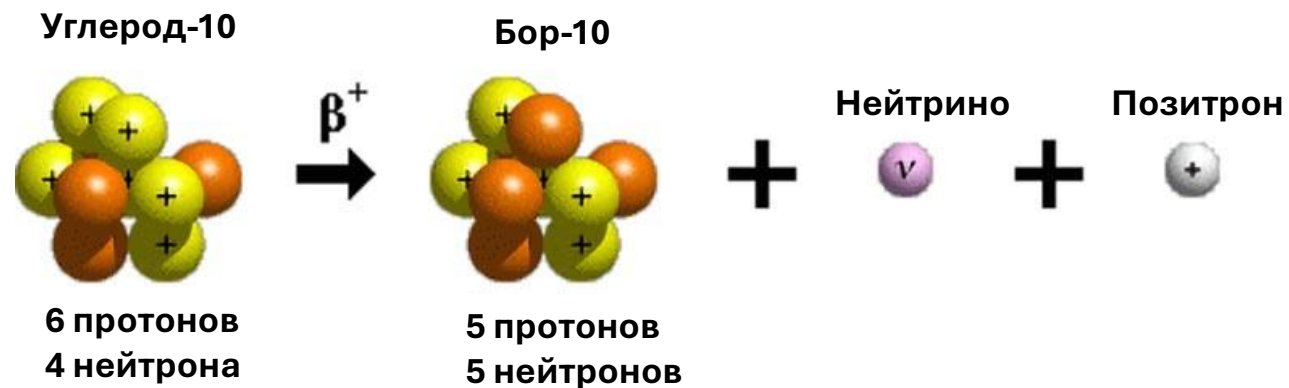
Бета-распад (три вида)

Непрерывный спектр

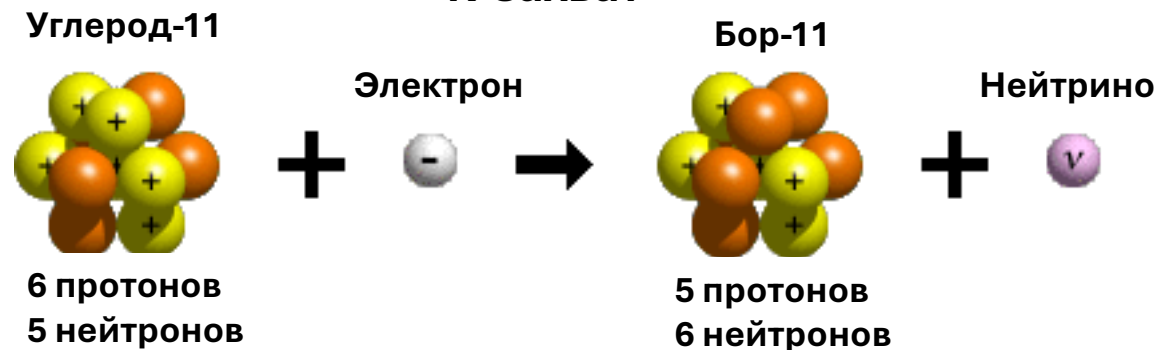
Бета-минус распад



Бета-плюс распад



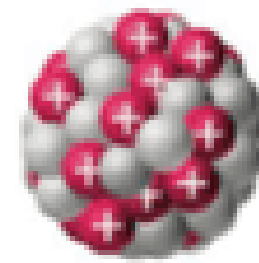
К-захват



Гамма-распад



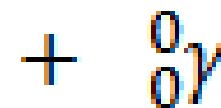
Радиоактивное
(возбужденное) ядро



Дочернее ядро

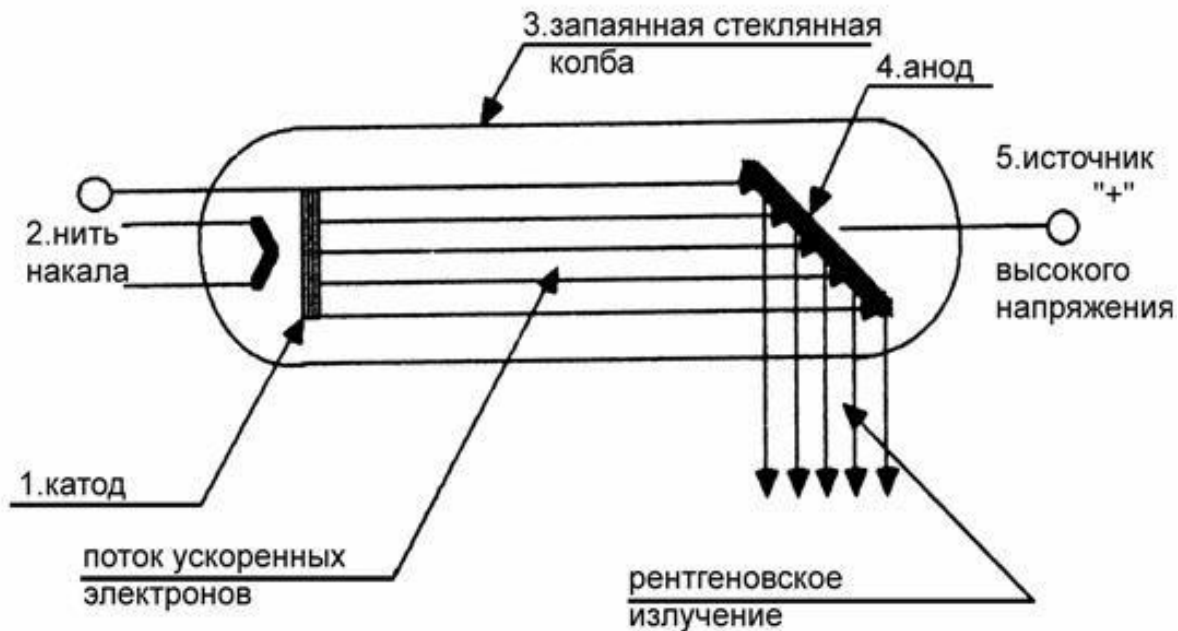


Фотон
(гамма-квант)



Дискретный спектр

Рентгеновское излучение

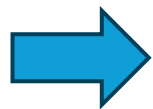


Устройство
рентгеновской трубки

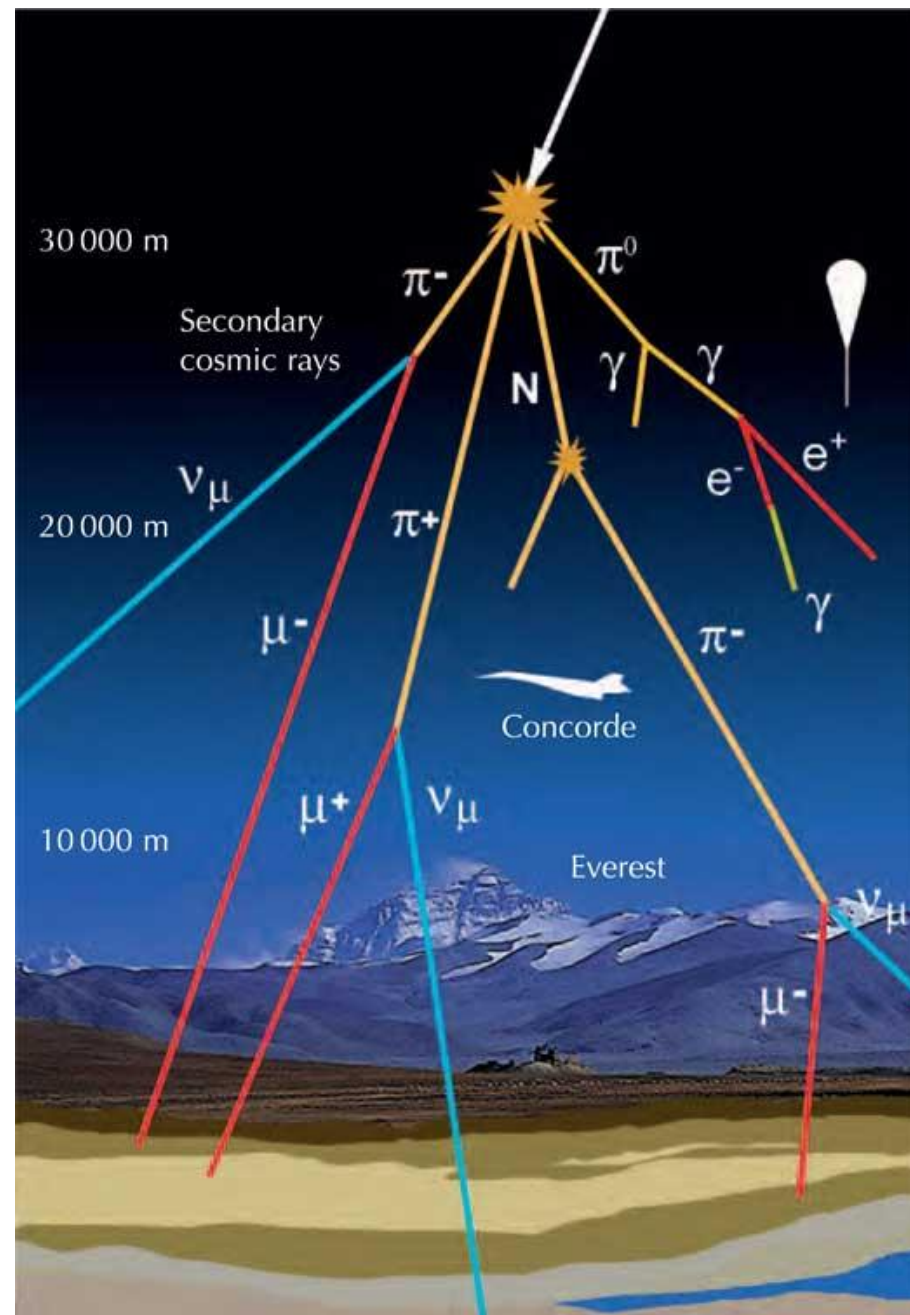


Рентгеновский снимок

- Протоны, прилетающие к нам из космоса, взаимодействуя в верхних слоях атмосферы Земли, рожают ливни частиц
- Эти частицы распадаются и до поверхности долетают космические мюоны (и нейтрино)



Космические мюоны



Единицы измерения радиации



Физическая доза

- **Доза поглощенная (D)** – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу – **отношение средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме к массе вещества в этом объеме.**
- Энергия может быть усреднена по любому определенному объему, и в этом случае средняя доза будет равна полной энергии, переданной объему, деленной на массу этого объема.
- В единицах СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм ($\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$), и имеет специальное название - **грей** (Гр).
- Используемая ранее внесистемная единица **рад** равна 0,01 Гр.
- Дозу излучения D , поглощенную веществом за время t действия потока корпускулярного ионизирующего излучения, называют мощностью поглощённой дозы, D^*
 - Мощность поглощённой дозы D^* измеряют в ваттах на килограмм ($\text{Вт}/\text{кг}$)

$$D = \frac{dE}{dm} \quad D^* = \frac{dD}{dt}$$

Доза в органе или ткани

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int D^* dm,$$

$$H_{T,R} = W_R * D_{T,R},$$

- Поглощенная доза — основная физическая дозиметрическая величина - не полностью отвечает целям радиационной защиты, поскольку **степень повреждения тканей тела человека различна для различных видов ионизирующих излучений.**
- **Доза в органе или ткани (D_T) - средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани человеческого тела**
 - m_m - масса органа или ткани; D - поглощенная доза в элементе массы dm .
- **Доза эквивалентная ($H_{T,R}$) - поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, W_R .**
 - В системе СИ единицей измерения эквивалентной дозы является Джоуль на килограмм. Она имеет специальное наименование **зиверт (Зв).**

W_R

Фотоны (кванты) любых энергий		1
Электроны, β^- , β^+ и мюоны любых энергий ^b		1
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ		5
	от 10 кэВ до 100 кэВ	10
	от 100 кэВ до 2 МэВ	20
	от 2 МэВ до 20 МэВ	10
	более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи		5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра		20

Несколько видов облучения

- При одновременном воздействии на человека нескольких различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения.

$$H_T = \sum_R H_{T,R}$$

- Эту величину иногда называют **интегральной эквивалентной дозой**

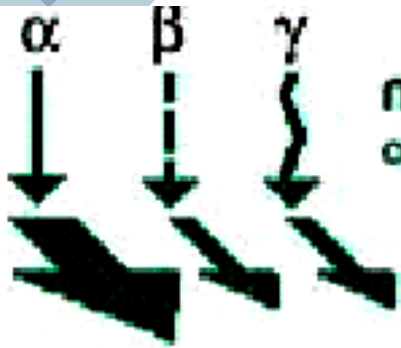
Доза эффективная

$$E = \sum_T W_T * H_T$$

- **Доза эффективная (E) - величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности.**
- **Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты.**
 - H_T - эквивалентная доза в органе или ткани T
 - W_T - взвешивающий коэффициент для органа или ткани T, т.е. множитель эквивалентной дозы в органах и тканях, используемый в радиационной защите для учёта различной чувствительности разных органов и тканей в возникновении стохастических эффектов радиации – «коэффициент радиационного риска».
- **Единица эффективной дозы - зиверт (Зв).**

W_T

Ткань или орган	W_T	Ткань или орган	W_T
Гонады (яичники, семенники)	0.20	Печень	0.05
Красный костный мозг	0.12	Пищевод	0.05
Толстый кишечник	0.12	Щитовидная железа	0.05
Легкие	0.12	Кожа	0.01
Желудок	0.12	Клетки костных поверхностей	0.01
Мочевой пузырь	0.05	Остальные органы	0.05
Молочные железы	0.05		



Поглощенная доза – энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым телом (тканями организма), в пересчете на единицу массы

Эквивалентная доза – поглощенная доза, умноженная на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма



Эффективная эквивалентная доза – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент, учитывающий разную чувствительность различных тканей к облучению



Коллективная эффективная эквивалентная доза – эффективная эквивалентная доза, полученная группой людей от какого-либо источника радиации



Полная коллективная эффективная эквивалентная доза – коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получат поколения людей от какого-либо источника за все время его дальнейшего существования

Единицы

Беккерель
(Бк, Bq) Единица активности нуклида в радиоактивном источнике (в системе СИ).
Один беккерель соответствует одному распаду в секунду для любого радионуклида

Грей
(Гр, Gy) Единица поглощенной дозы в системе СИ.
Представляет собой количество энергии ионизирующего излучения, поглощенной единицей массы какого-либо физического тела, например тканями организма
 $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$

Зиверт
(Зв, Sv) Единица эквивалентной дозы в системе СИ.
Представляет собой единицу поглощенной дозы, умноженную на коэффициент, учитывающий неодинаковую радиационную опасность для организма разных видов ионизирующего излучения.

Один зиверт соответствует поглощенной дозе в 1 Дж/кг (для рентгеновского, β - и β -излучений)

Внесистемные

Кюри
(Ки, Ci) Единица активности изотопа
 $1 \text{ Ки} = 3,700 * 10^{10} \text{ Бк}$

рад
(рад, rad) единица поглощенной дозы излучения
 $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$

бэр
(бэр, rem) единица эквивалентной дозы
 $1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$

Основные радиологические величины и единицы

Величина	Наименование и обозначение единицы измерения		Соотношения между единицами
	Внесистемные	СИ	
Активность нуклида, А	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, Н	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)	$1 \text{ рад*г} = 10^{-5} \text{ Гр*кг}$ $1 \text{ Гр*кг} = 10^5 \text{ рад*г}$

Экспозиционной дозе 1 Р соответствует поглощённая доза в воздухе, равная 0,88 рад (однако эта величина отличается от дозы, которую получил бы человек, если бы он находился в таком же поле излучения)

Контролируемые условия

Устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

- персонал (группы А и Б);
- **все население**, включая лиц из персонала вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются два класса нормативов:

- основные пределы доз (ПД), приведенные в таблице на следующем слайде;
- допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА), среднегодовые удельные активности (ДУА) и другие

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
<p>Примечания.</p> <p>* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.</p> <p>** Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни воздействия персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А. Далее в тексте все нормативные значения для категории «персонал» приводятся только для группы А.</p> <p>*** Относится к дозе на глубине 300 мг/см².</p> <p>**** Относится к среднему по площади в 1 см² значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/см² под покровным слоем толщиной 5 мг/см². На ладонях толщина покровного слоя – 40 мг/см². Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см² площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает непревышение предела дозы на хрусталик от бета-частиц.</p>		

Так какая же доза опасна?

- В году 365 суток по 24 часа → 8760 часов
- 50 мЗв / год = 50000 мкЗв / год
- $50000 / 8760 = 5,71$ мкЗв / час
- **Однако большую опасность несет попадание и накопление радиоактивных веществ в организме!**
 - Например, накопление радиоактивного йода в щитовидной железе

Ограничение природного облучения

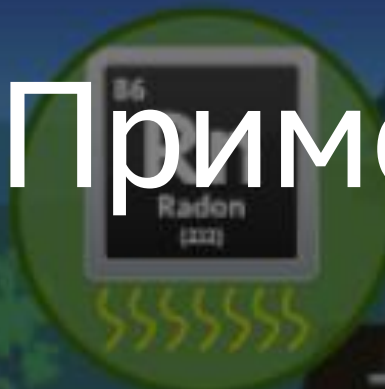
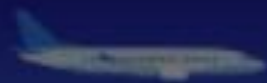
- Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается, **но учитывается (нормативы):**
- При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона в воздухе помещений
- Эффективная удельная активность природных радионуклидов в строительных материалах (щебень, гравий, песок, бутовый и пиленный камень, цементное и кирпичное сырье и пр.)
- Оценка качества питьевой воды по показателям радиационной безопасности
- Удельная дельная активность природных радионуклидов в минеральных удобрениях (^{40}K)

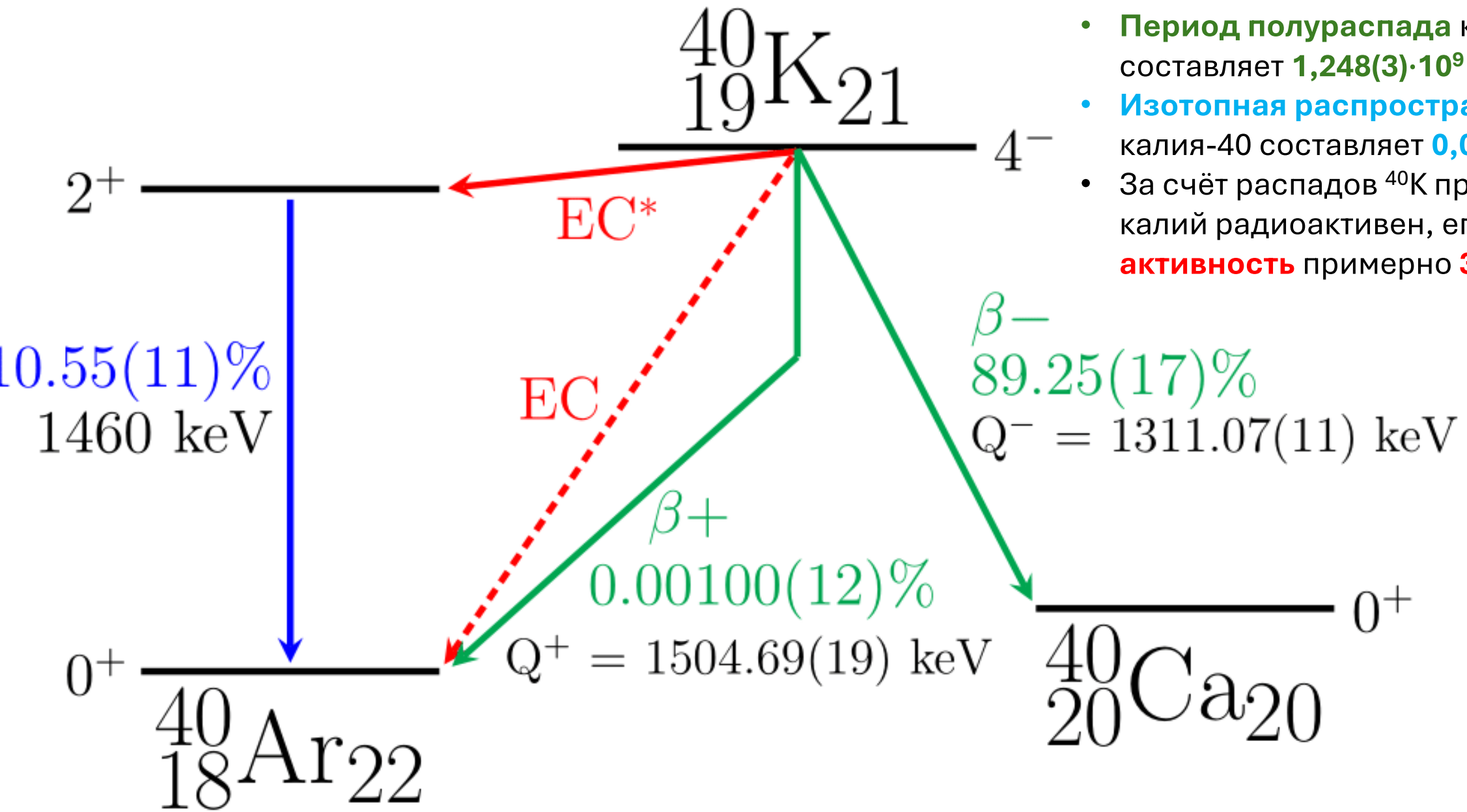


Радиационная защита

- **Радиационная защита** — комплекс мероприятий, направленный на защиту живых организмов от ионизирующего излучения, а также, изыскание способов ослабления поражающего действия ионизирующих излучений
- Основными способами защиты от ионизирующих излучений являются:
 - **защита расстоянием;**
 - **защита временем;**
 - **защита экранированием:**
 - от альфа-излучения — лист бумаги, резиновые перчатки, респиратор;
 - от бета-излучения — плексиглас, тонкий слой алюминия, стекло, противогаз;
 - от гамма-излучения — тяжёлые металлы (вольфрам, свинец, сталь); гамма-излучение поглощается тем эффективнее, чем больше атомный номер вещества, поэтому, например, свинец эффективнее железа.
 - от нейтронов — вода, полиэтилен, другие полимеры, бетон; по закону сохранения энергии, нейтроны эффективно рассеивают энергию на лёгких ядрах, поэтому слой воды или полиэтилена для защиты от нейтронов будет гораздо эффективнее, чем той же толщины броневой стали;
 - **химическая защита** — это ослабление результата воздействия излучения на организм при условии введения в него химических веществ, называемых радиопротекторами.

Примеры радиации вокруг нас





- **Изотоп** калия с атомным номером 19 и массовым числом 40.
- **Период полураспада** калия-40 составляет **$1,248(3) \cdot 10^9$ лет**
- **Изотопная распространённость** калия-40 составляет **0,0117(1)%**
- За счёт распадов ^{40}K природный калий радиоактивен, его **удельная активность** примерно **31 Бк/г.**

Продукты питания богатые калием (К)

Курага



Калий: 1717 (мг)

Фасоль



Калий: 1100 (мг)

Морская капуста



Калий: 970 (мг)

Горох



Калий: 873 (мг)

Чернослив



Калий: 864 (мг)

Изюм



Калий: 860 (мг)

Миндаль



Калий: 748 (мг)

Фундук



Калий: 717 (мг)

Чечевица



Калий: 672 (мг)

Арахис



Калий: 658 (мг)

Кедровые орехи



Калий: 628 (мг)

Горчица



Калий: 608 (мг)

Картофель



Калий: 568 (мг)

Кешью



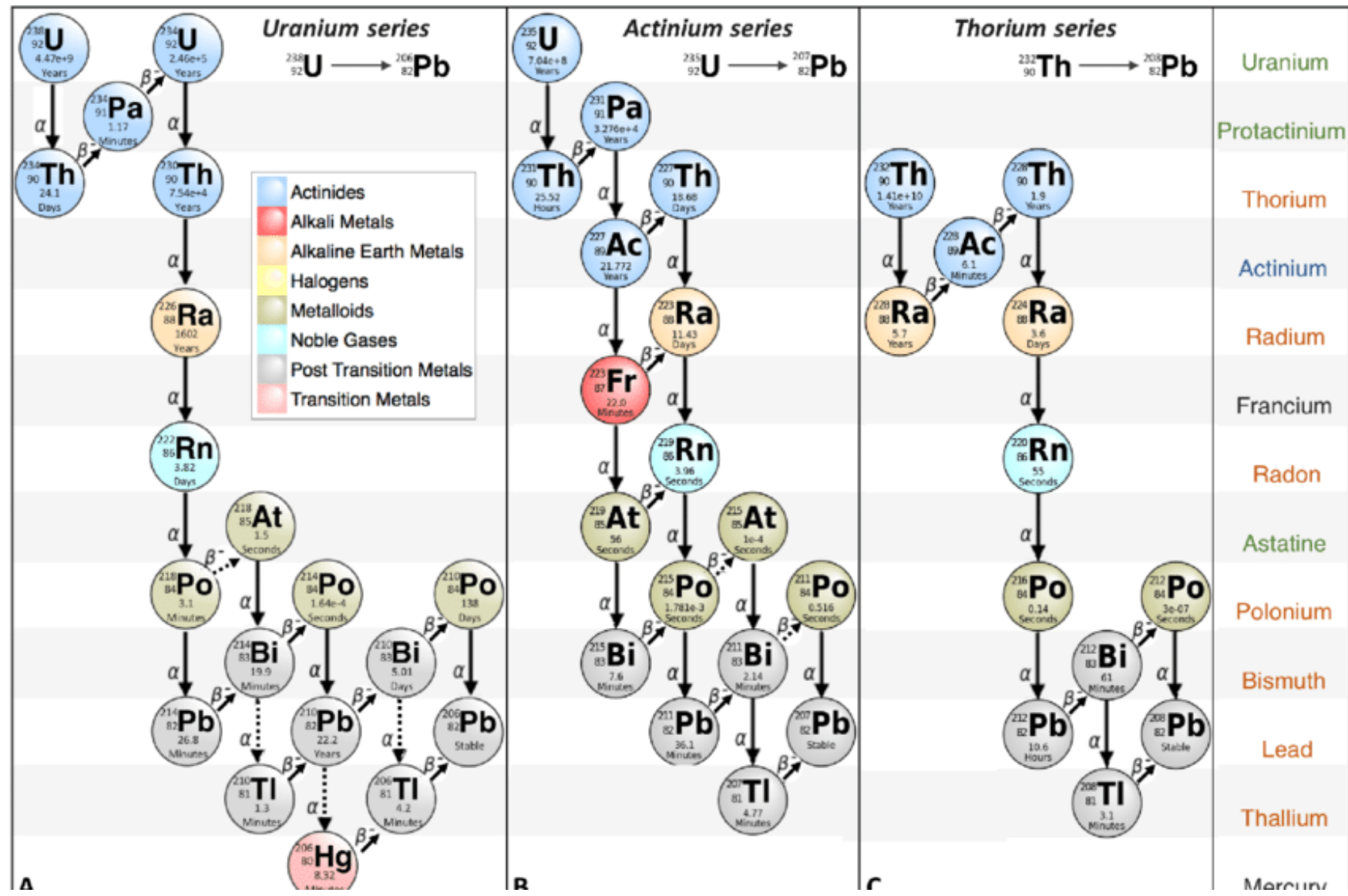
Калий: 553 (мг)

Грецкий орех



Калий: 474 (мг)

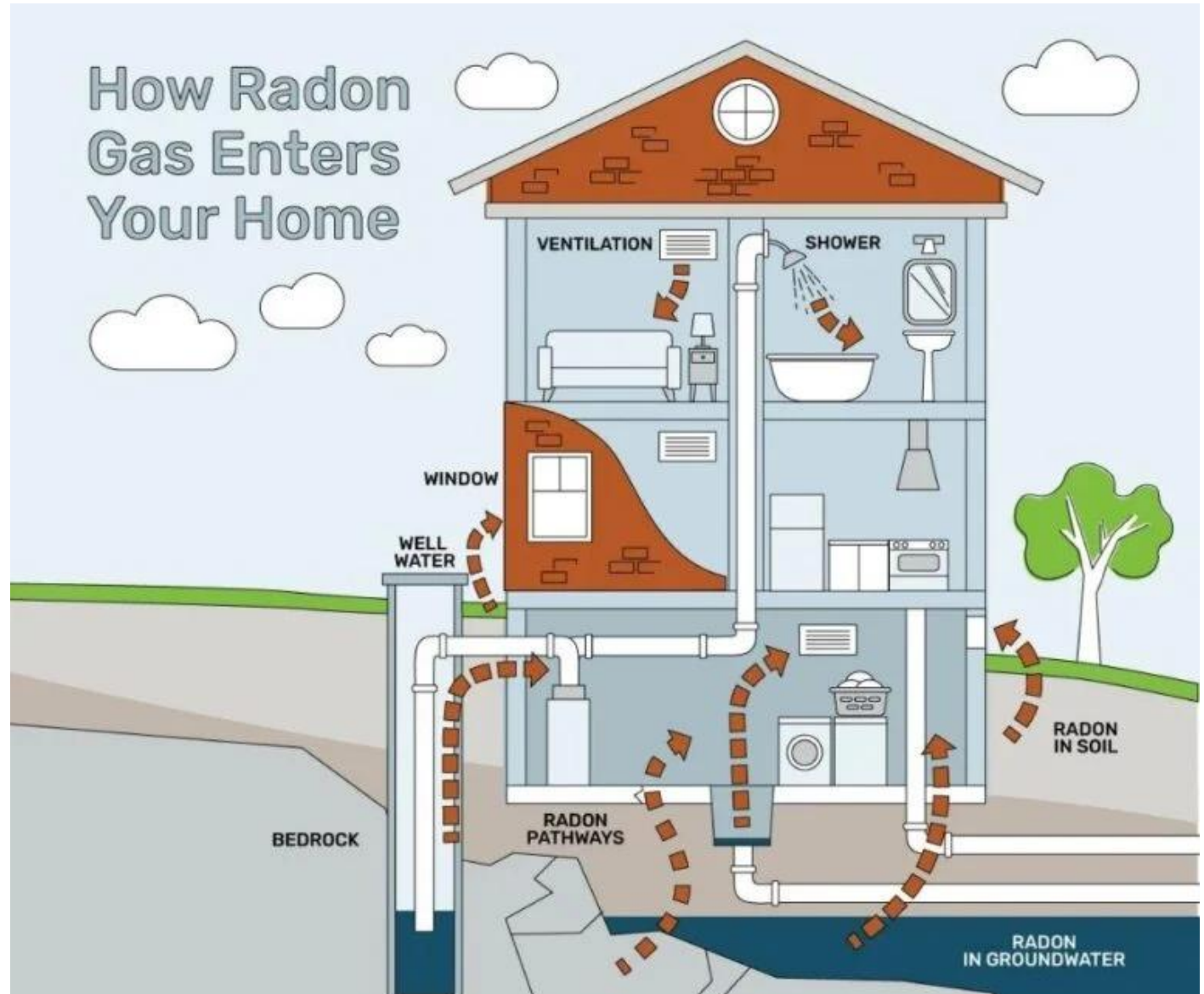
Радиоактивные альфа-ряды

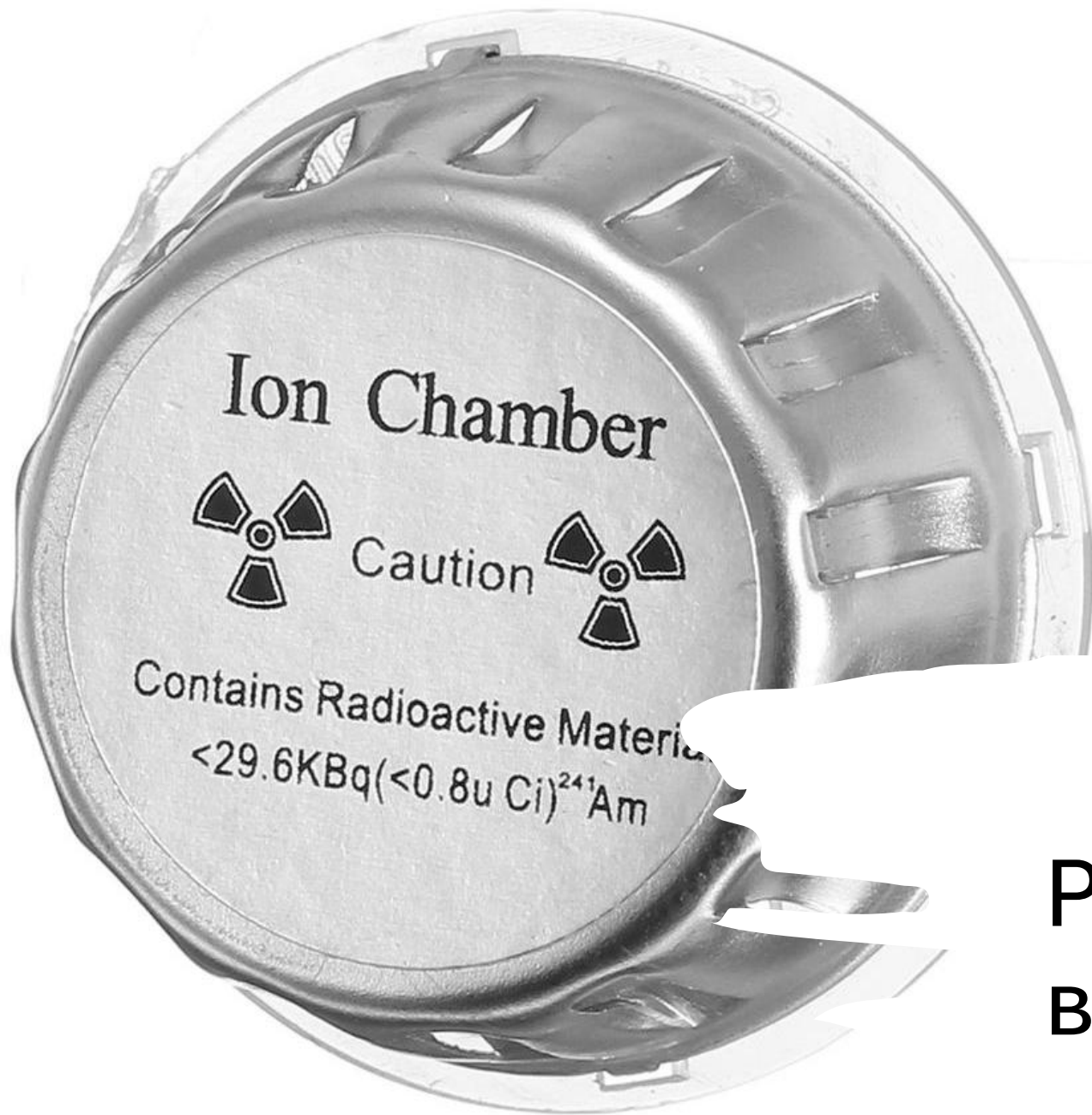


Вековое равновесие заключается в том, что число распадов (активность) всех членов радиоактивного ряда равно друг другу, и если исходный изотоп имеет очень большое время жизни (постоянная активность), то никакого изменения активности и у дочерних радиоактивных элементов не наблюдается.

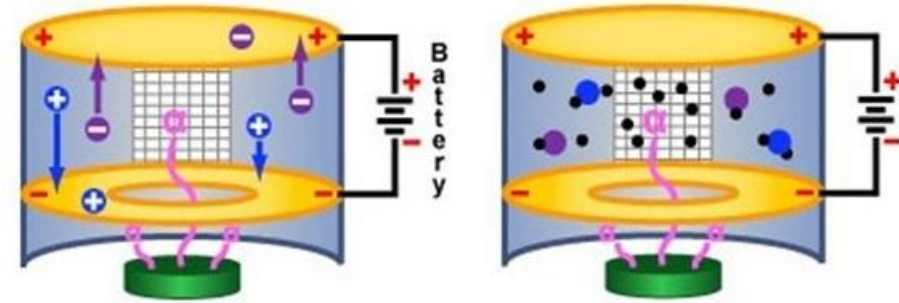
Радон

- Радон и его дочерние продукты обуславливают более половины всей эффективной дозы облучения, которую в среднем получает организм человека от природных и техногенных радионуклидов окружающей среды.
- Безопасной средней по площади здания плотностью потока радона на поверхности грунта считается менее 80 мБк/м²с для жилых зданий и 40 мБк/м²с для малоэтажных коттеджей
- Основные способы снизить концентрацию радона в дома:
 - Улучшение вентиляции помещения
 - Предотвращение проникновения радона из подвальных помещений в жилые помещения
 - Установка системы для удаления радона из подвальных помещений
 - Установка систем вентиляции с положительным давлением



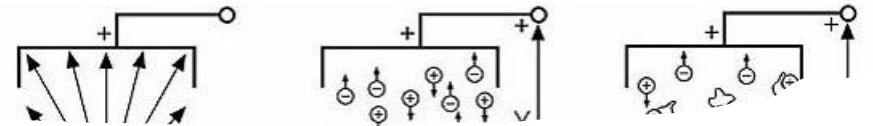


Принцип действия ионизационного детектора дыма



Камера 1
Альфа частицы ионизируют молекулы воздуха, и приложении напряжения к клеммам в цепи возникает слабый ток.

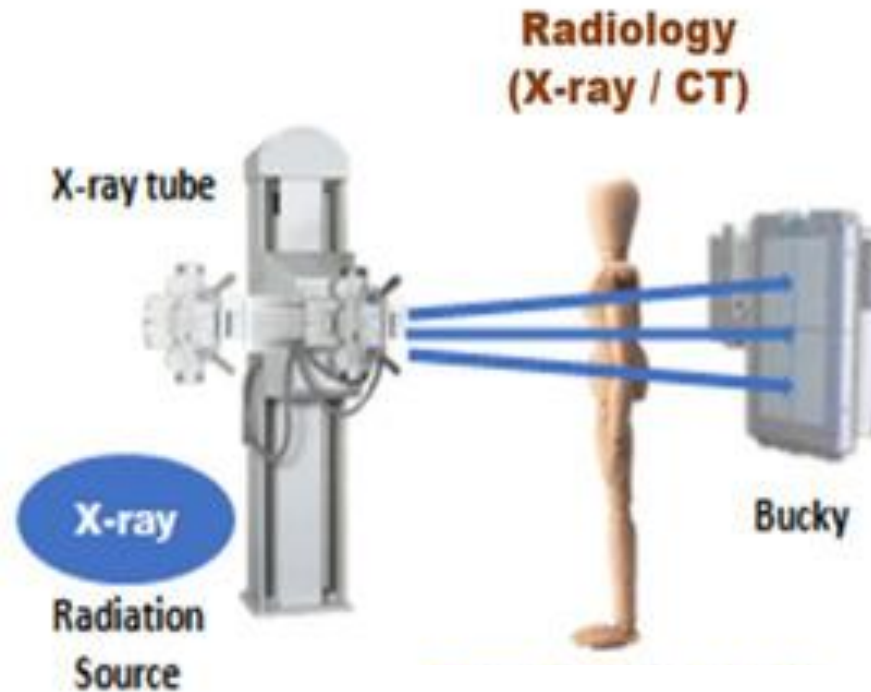
Камера 2
Частицы дыма попадают в камеру и приклепляются к ионам, делая их нейтральными. Ток уменьшается. Включается тревога.



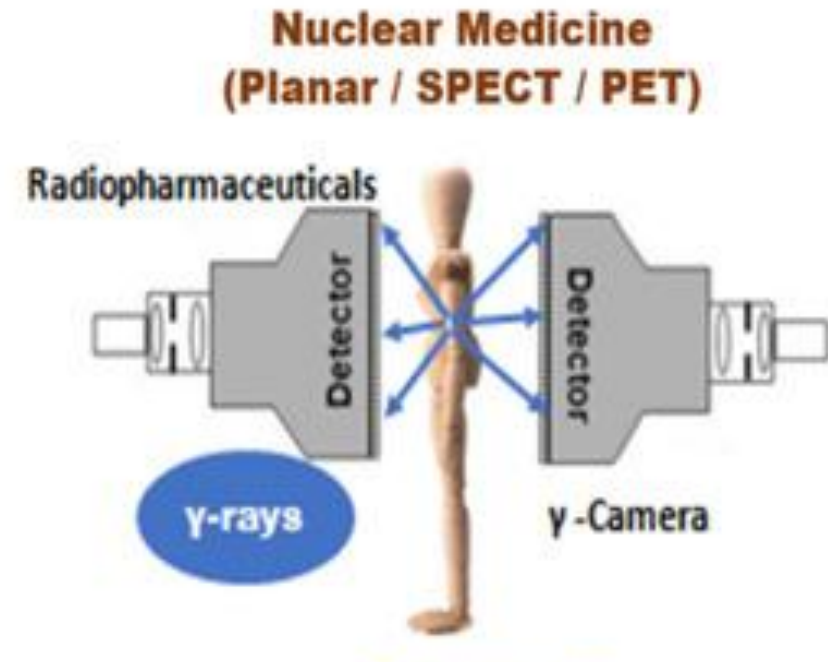
Радиоактивные вещества в технике

Radiology vs Nuclear Medicine

Медицинские исследования и радиация



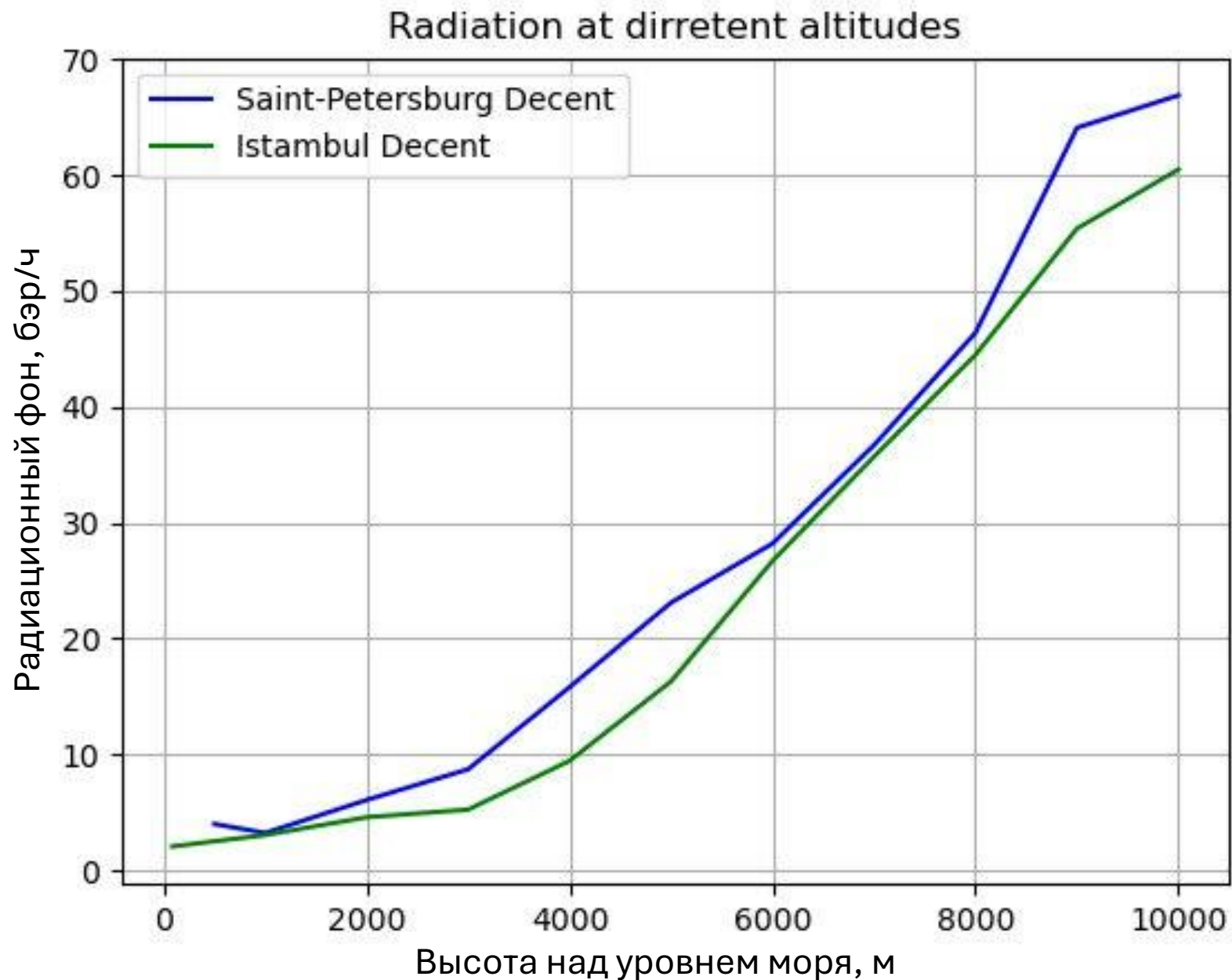
Рентгеновские снимки



Эмиссионная томография

Доза от полёта в самолёте

- Измерения выполнены с учетом спектра излучения
 - Сцинтилляционный дозиметр-спектрометр
 - 0,6 мкЗв/ч на высоте 9 км
- Дозиметр на основе счетчика Гейгера на высоте 9 километров выдает 1,6-1,7 мкЗв/ч



Регистрация ионизирующего излучения



Некоторые
методы
регистрации
ионизирующего
излучения

Физические

(ионизация, люминесценция,
калориметрия)

Химические

(фотографические, выделение
элементов)

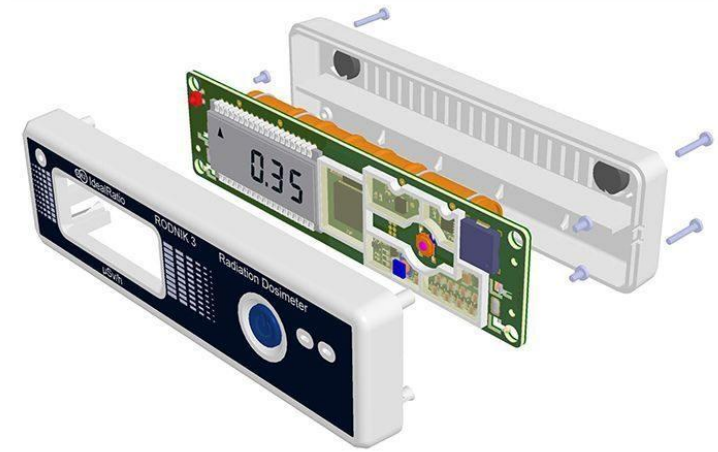
Газоразрядные счетчики

- **Счетчик Гейгера-Мюллера** представляет собой газонаполненный конденсатор, который пробивается при пролёте ионизирующей частицы через объём газа.
- Гамма-кванты, испускаемые радиоактивным изотопом, попадая на стенки счётчика, выбивают из них электроны.
- Электроны, двигаясь в газе и сталкиваясь с атомами газа, выбивают из атомов электроны и создают положительные ионы и свободные электроны.
- Электрическое поле между катодом и анодом создает ударную ионизацию → лавина ионов,
- При достаточно большой напряжённости поля энергии этих ионов становится достаточной, чтобы породить вторичные лавины



Как проводить измерения?

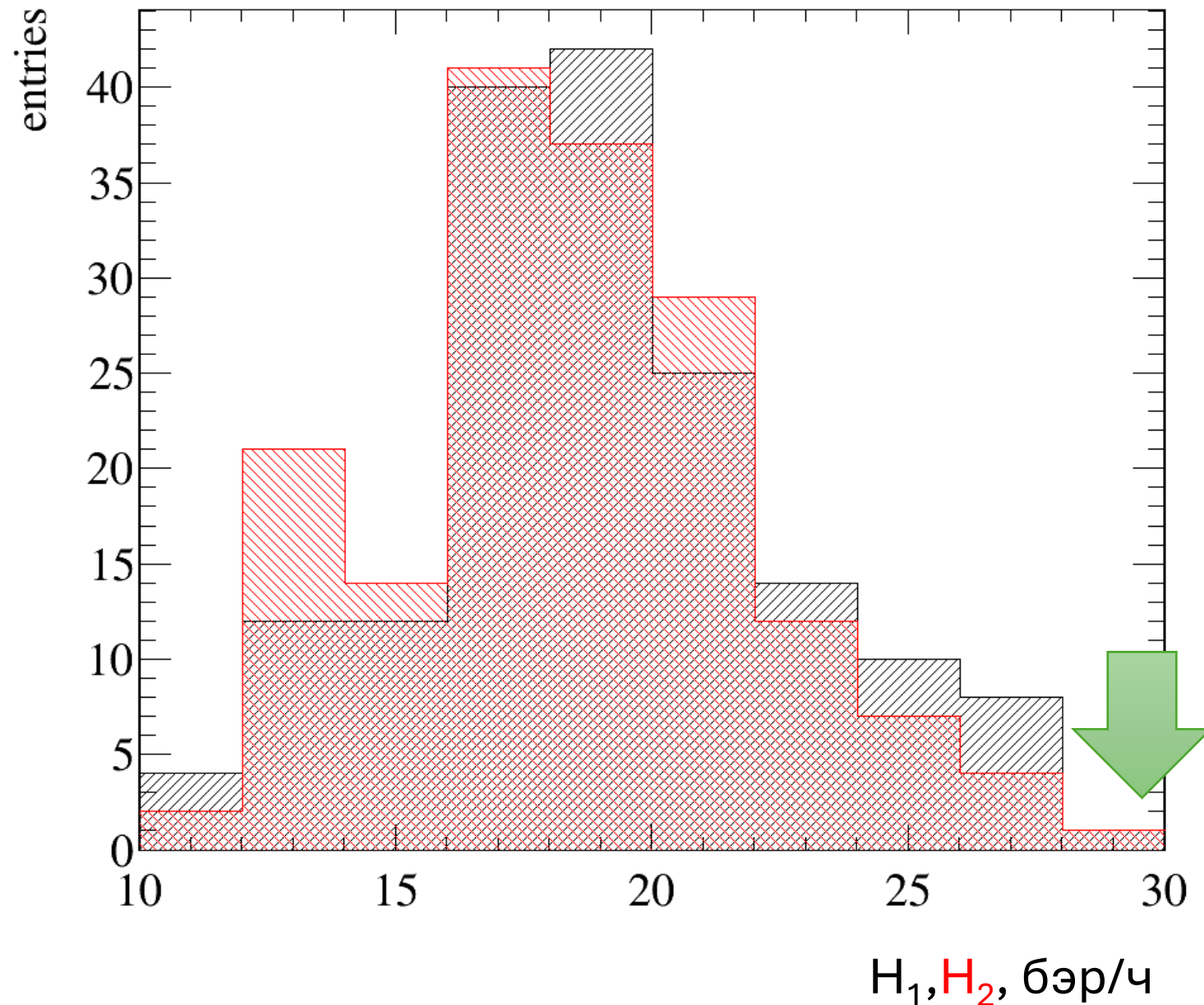
- Число отсчетов счетчика Гейгера пропорционально числу частиц, проходящих через него
 - Информация об энергии частиц теряется
 - Доза пропорциональна числу отсчетов
 - Если спектр излучения мягкий, то доза завышается, если жесткий, то занижается
- N_1 – число отсчетов во время измерения образца (за время T_{S+B})
- N_2 – число отсчетов во время измерения фона (за время T_B)
- N_1 и N_2 флуктуируют, то есть могут и будут отличаться при повторении измерения



$$S = \frac{N_1}{T_{S+B}} - \frac{N_2}{T_B}$$

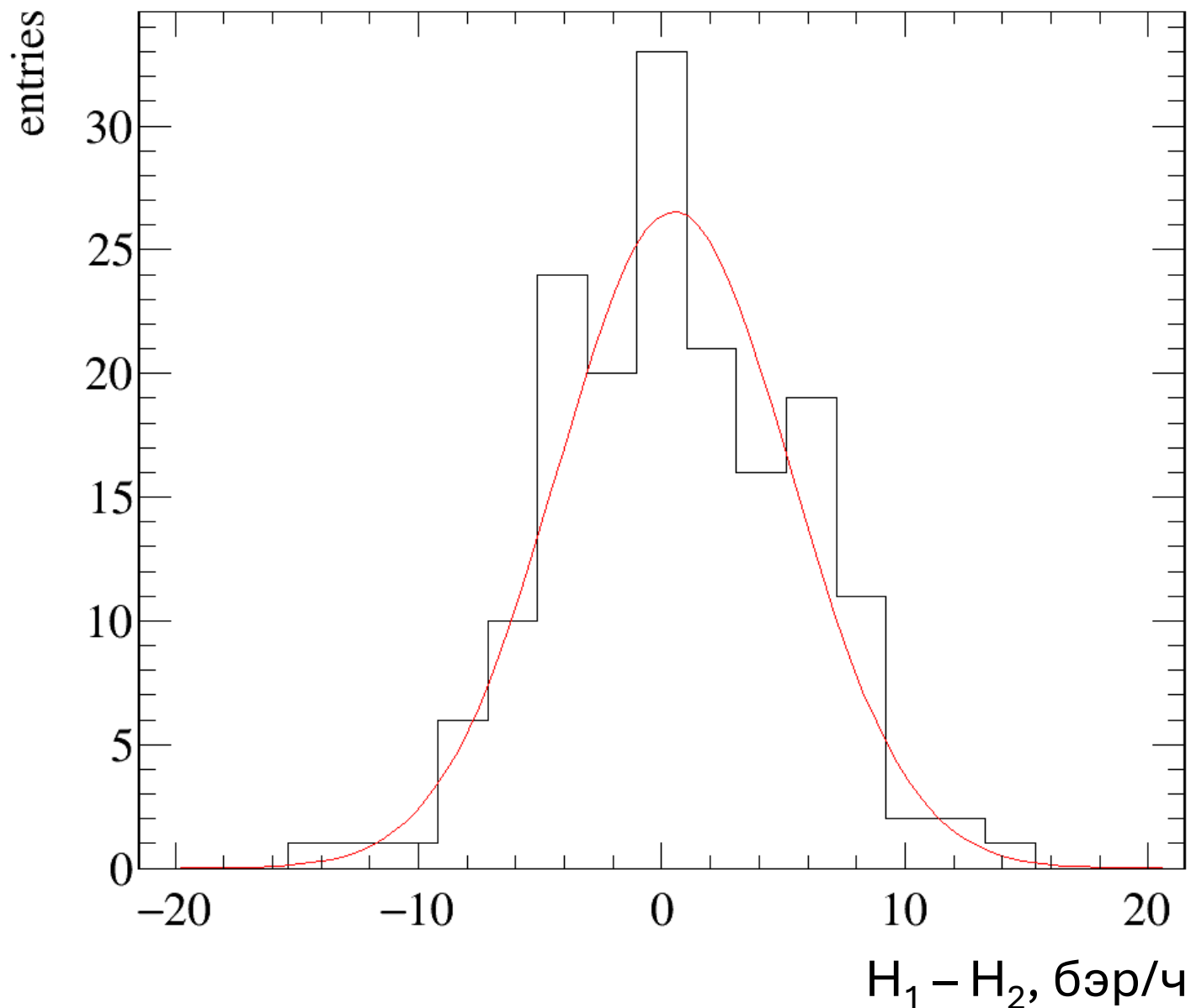
Сравнение двух дозиметров

- Распределение показаний двух дозиметров при измерении фона
- Если образец показывает $>0,3\text{мкЗв/ч}$, то что-то есть!
- Какой критерий сравнения выбрать?



Сравнение двух дозиметров

- Распределение разности показаний двух дозиметров при измерении фона
- **Аппроксимация при помощи нормального распределения**
 - Среднее: 0.51 ± 0.39
- **Одинаковы в пределах погрешности измерений**



Как проводить измерения

$$S = \frac{N_1}{T_{S+B}} - \frac{N_2}{T_B}$$

- **S** – число отсчетов при измерении образца
- **B** – число отсчетов при измерении фона
- **Оптимальное время измерения**



$$\left. \frac{T_{S+B}}{T_B} \right|_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{S+B}{B}}$$

- Когда сигнал много больше фона нужно снимать только сигнальный спектр
- Когда сигнал мал, нужно половину времени снимать фон, а половину фон+сигнал
- Для уменьшения уровня фона (**B**) можно использовать защиту (например, свинцовый домик)

Малые сигналы: удобрения с калием (?)

Серия из 20 измерений на каждый образец

Вычисляем среднее

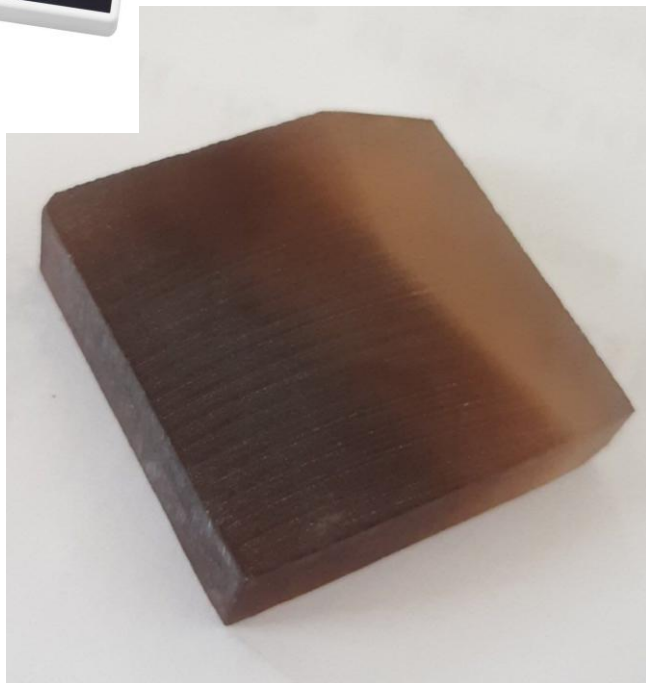
Sig.: 18.6 +/- 0.78
Bkg.: 16.9 +/- 0.88
Diff: 1.7 +/- 1.17
1.4 sigma

Sig.: 22.6 +/- 0.67
Bkg.: 16.9 +/- 0.88
Diff: 5.8 +/- 1.11
5.2 sigma

Sig.: 18.5 +/- 0.88
Bkg.: 16.9 +/- 0.88
Diff: 1.6 +/- 1.24
1.3 sigma

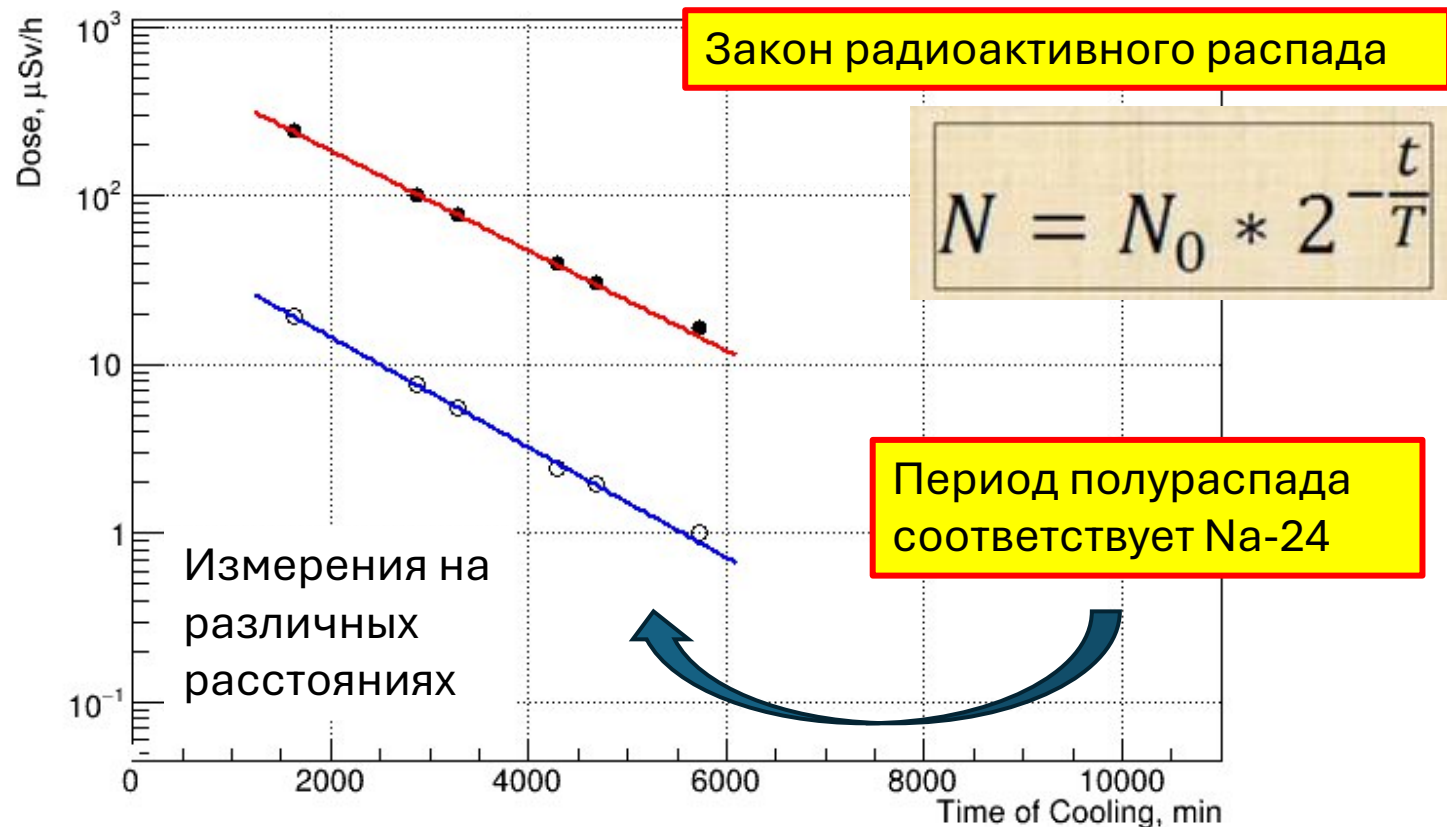


Измерение периода полураспада при помощи счетчика Гейгера (большие сигналы)



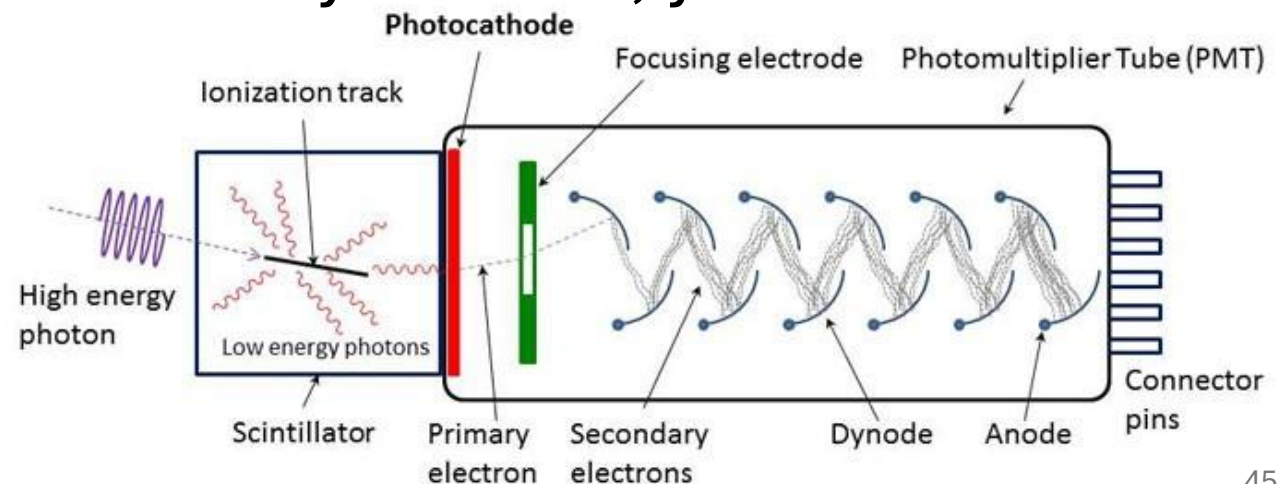
Кристалл природного топаза облучен пучком протонов

Topaz Cooling (since 2024-06-24 10:00MSK)

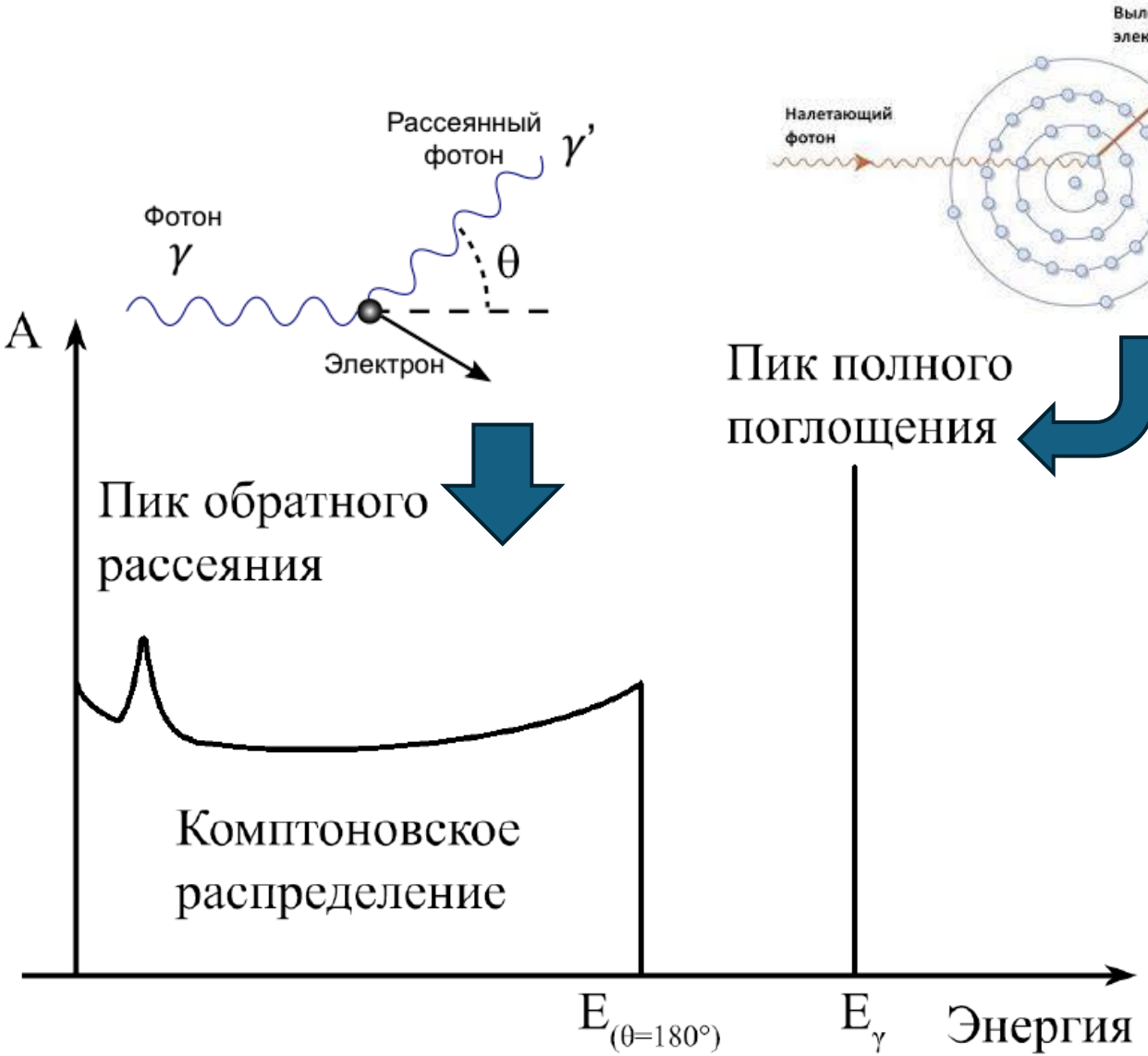


Сцинтилляционные детекторы

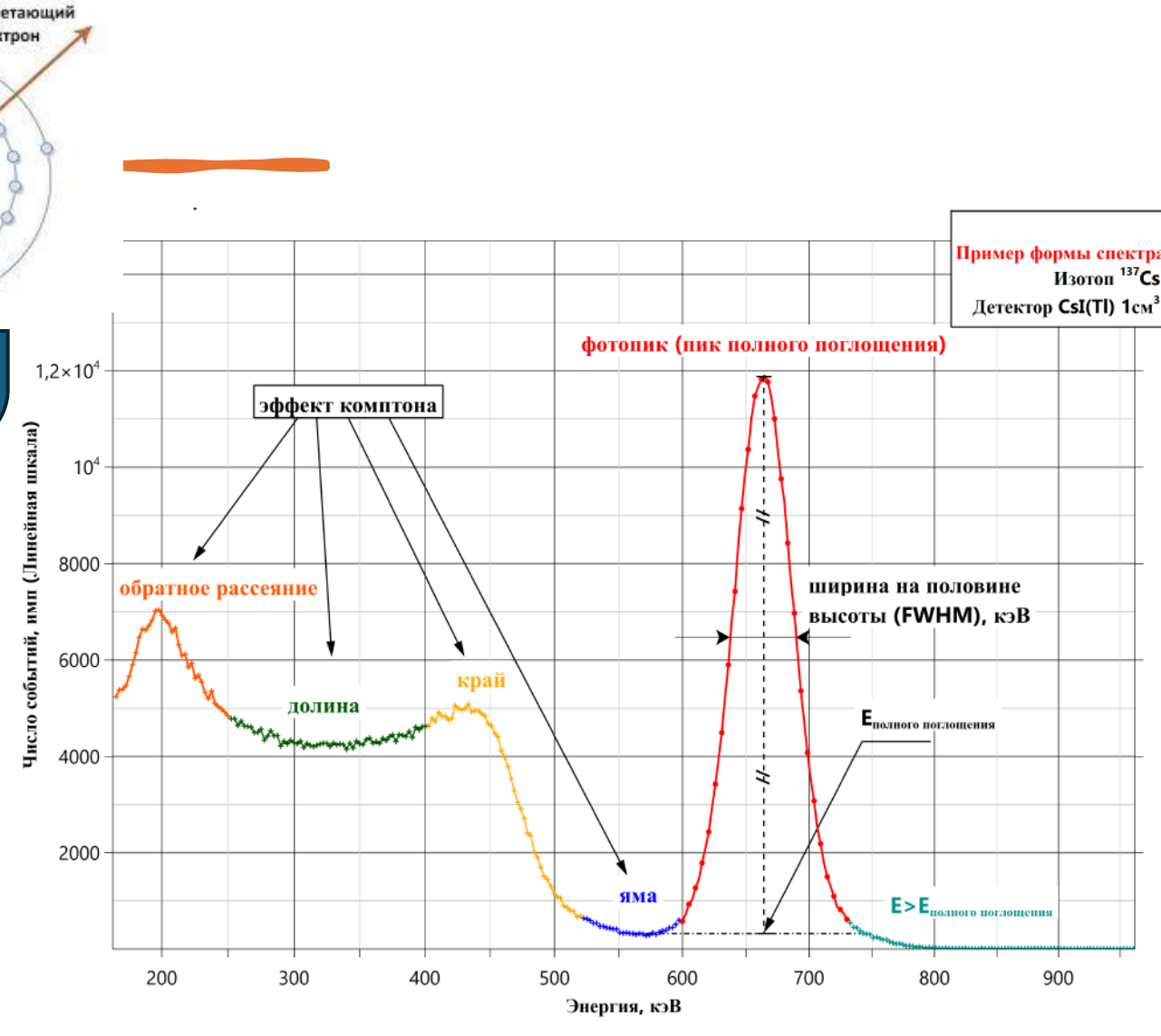
- **Сцинтилляторы** — вещества, излучающие свет при поглощении ионизирующего излучения
 - Как правило, излучаемое количество фотонов для данного типа излучения приближённо пропорционально поглощённой энергии, что позволяет получать энергетические спектры излучения.
 - Пластиковые, кристаллические, жидкие
- Свет, излученный при сцинтилляции, собирается на фотоприёмнике, преобразуется в импульс тока, усиливается
- **Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)**
- Относительно дешёвые быстрые детекторы



Спектр сцинтилляционного детектора



Идеальный спектр



Реальный спектр

Дозиметр-спектрометр RadiaCode

Detector

The sensor is made with an artificially grown **CsI(Tl)** or **GAGG(Ce)** crystal, depending on the model. This makes it 20 times faster and more sensitive to radiation than a Geiger counter.

Display

Tough, low-power backlit display that's great to view in sunlight or darkness.

CPU & Motherboard

The central processor, based on the latest ARM architecture, provides real-time sensor data analysis and conversion for high measurement speed and accuracy.



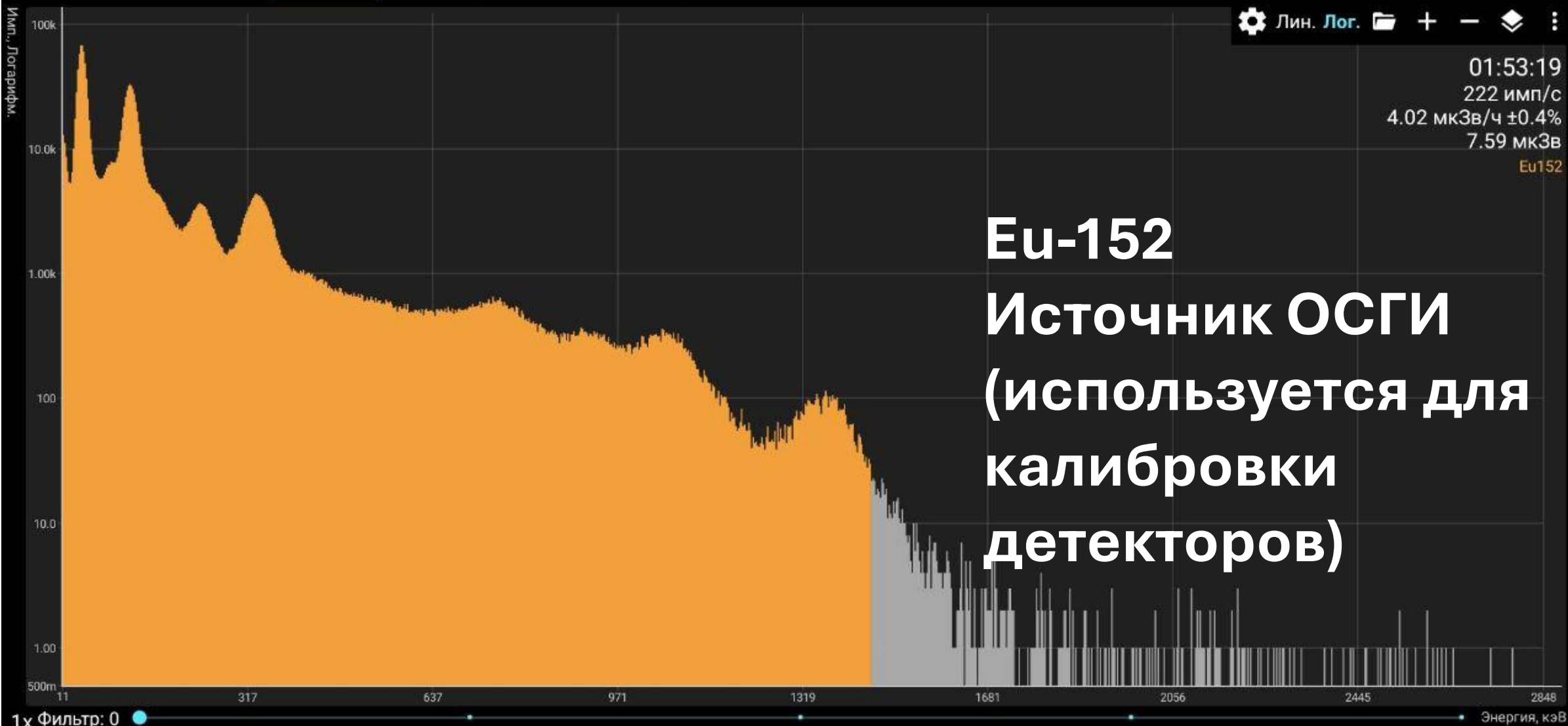
Case

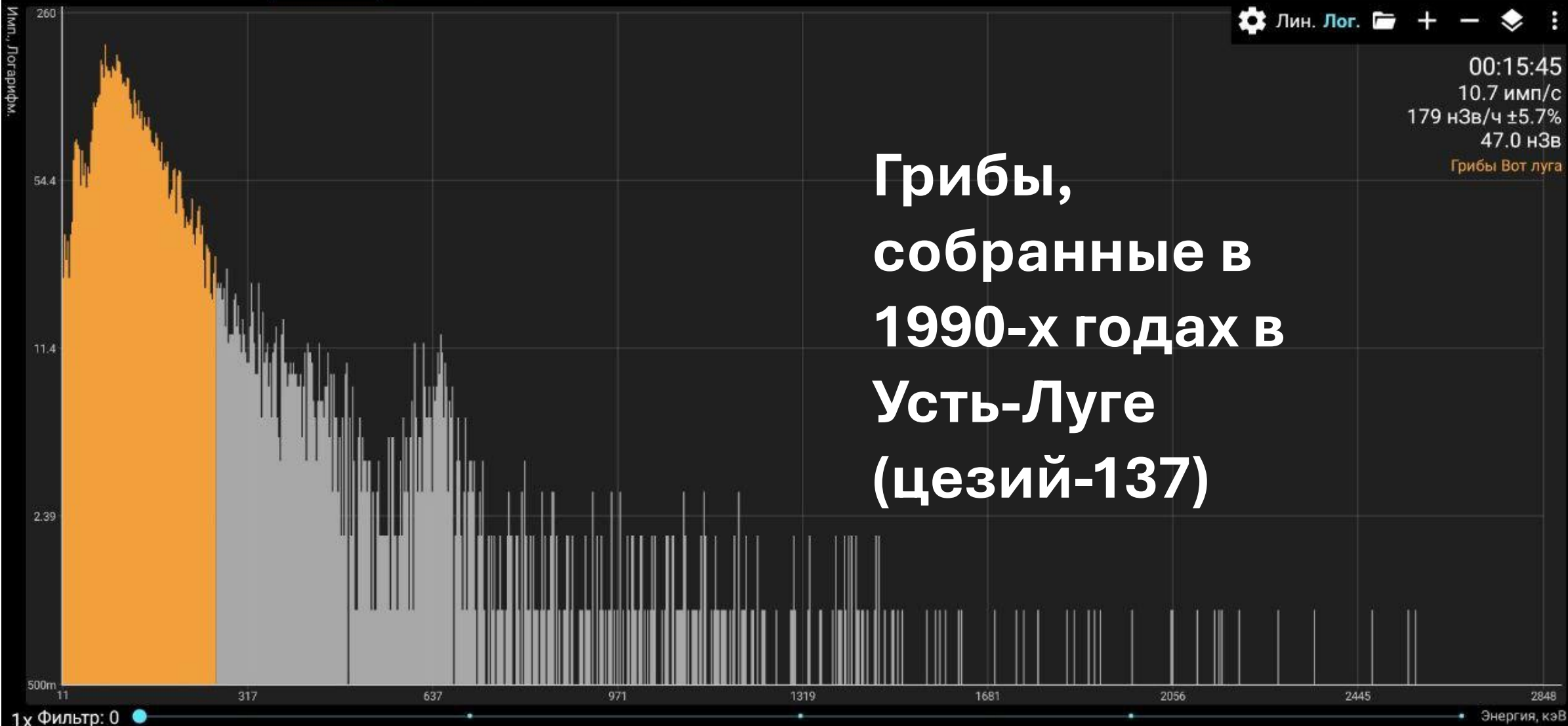
Compact, radiation-transparent plastic case designed for easy everyday use.

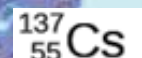
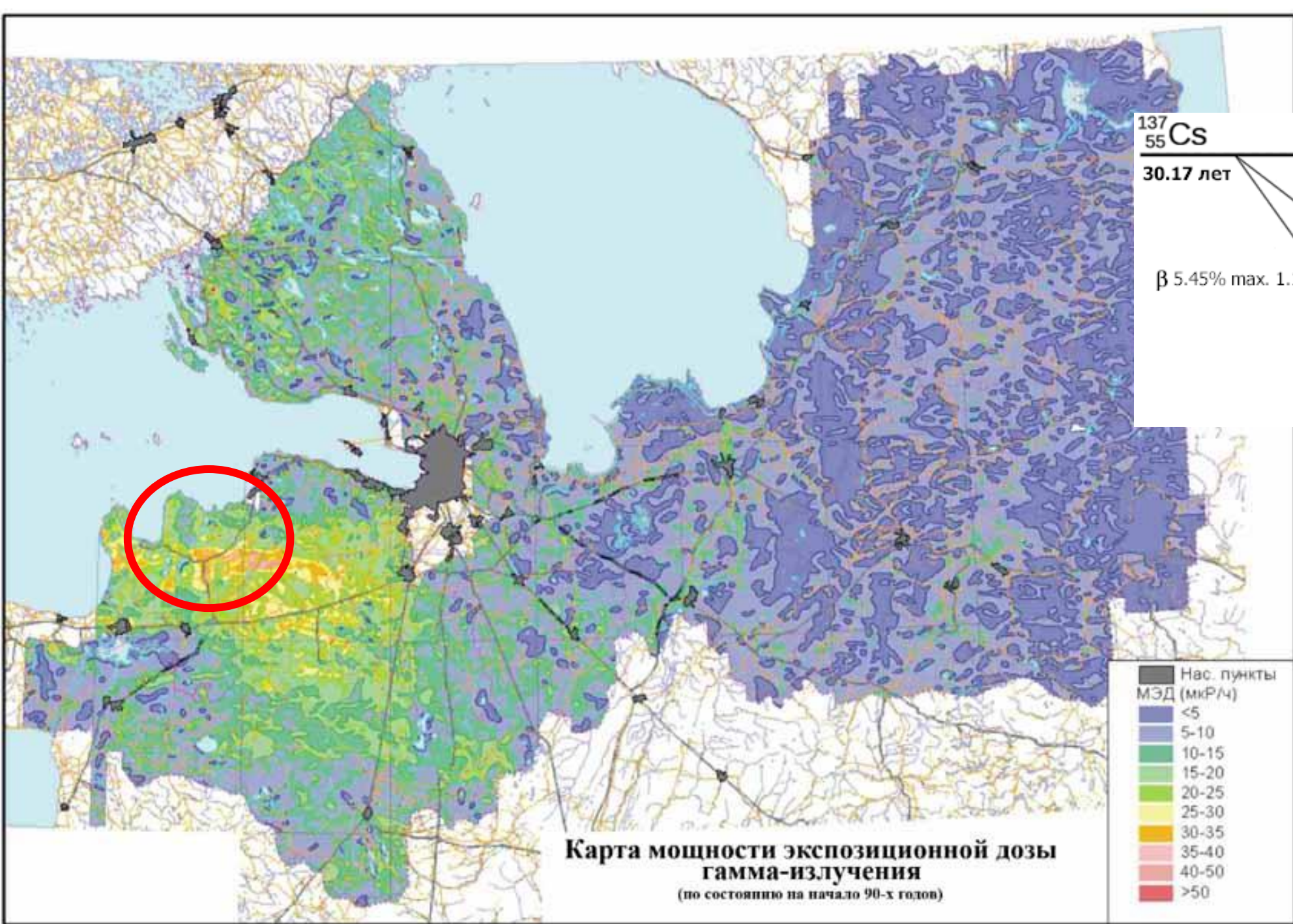
Battery

The Li-poly battery (1000mAh for the 10X series models, 1500mAh for the 110 model) provides up to 200 and 290 hours of operation, respectively, and is charged via a widely available Type-C connector.

Press the "Prnt Scrn" on your keyboard to take a screenshot







30.17 лет

$7/2+$

β 94.6% max. 512 кэВ

β 5.45% max. 1.174 МэВ



2.88 мин $11/2-$

γ 85.1% 661.7 кэВ

$1/2+$

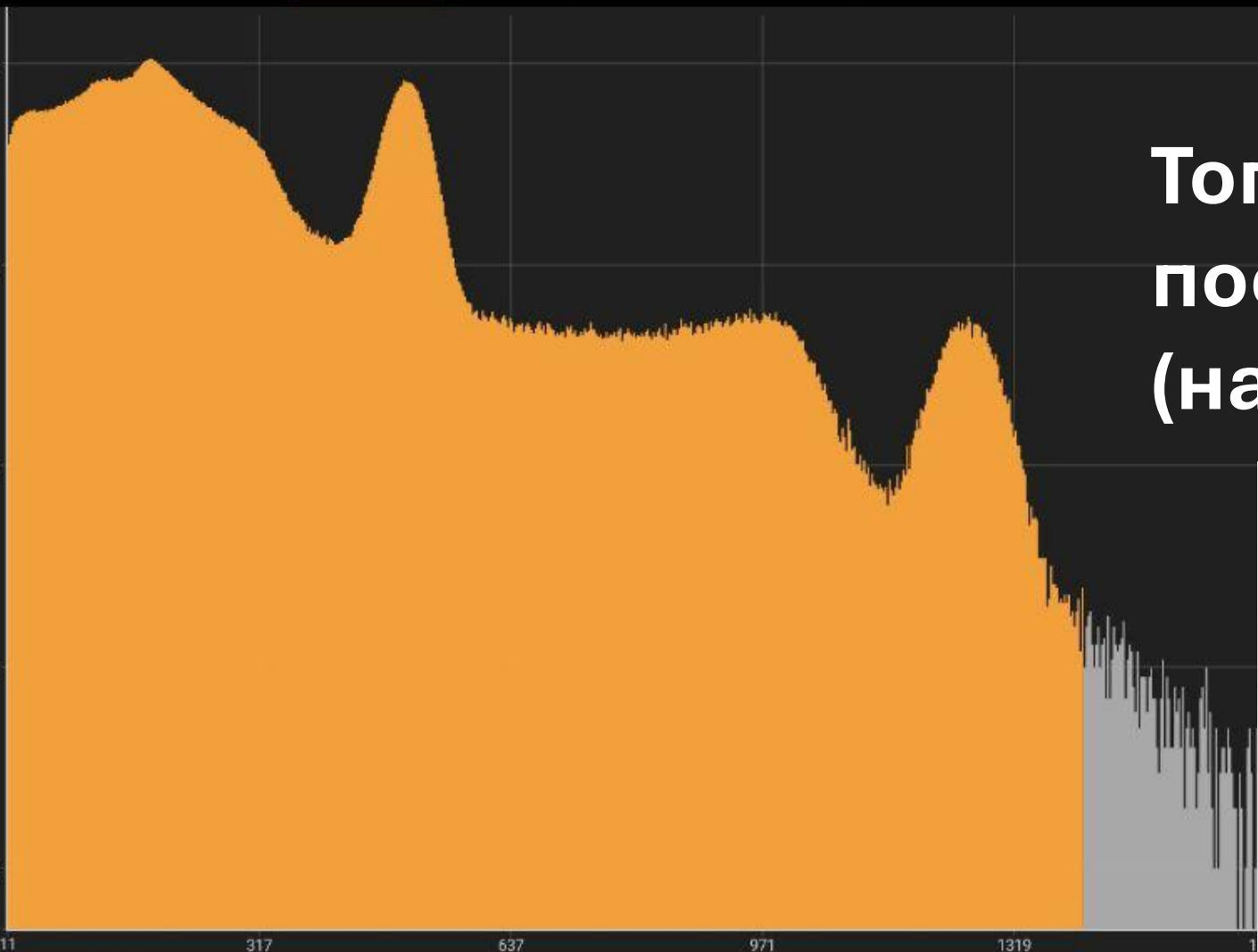


$3/2+$



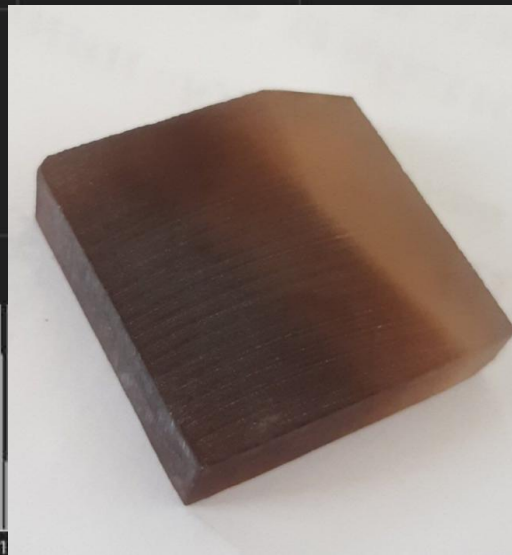
Имп., Логарифм.

10.0k
1.00k
100
10.0
1.00
500m



00:06:59
 3.20k имп/с
 113 мкЗв/ч ±0.3%
 13.0 мкЗв
 Топаз

Топаз через год после облучения (натрий-22)

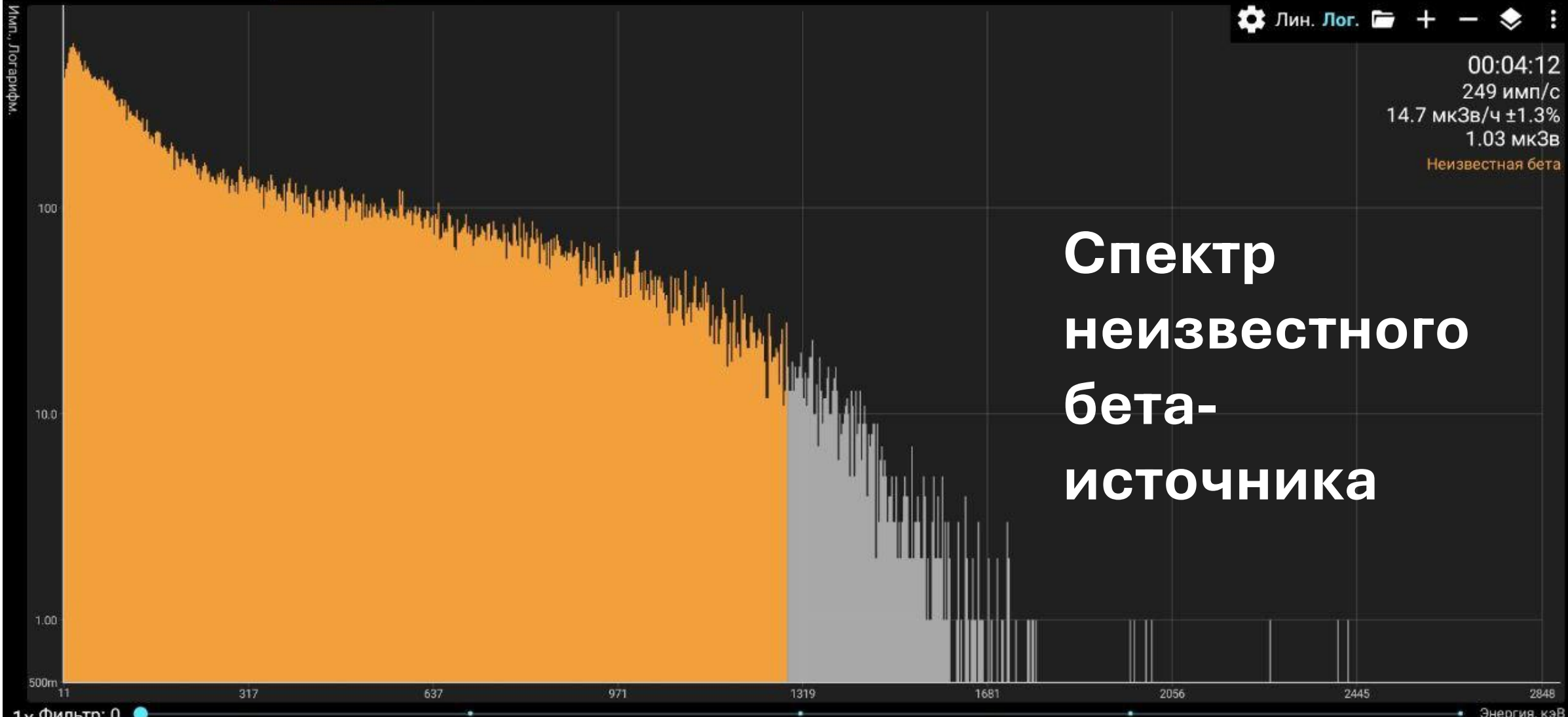


1x Фильтр: 0

Энергия, кэВ



00:04:12
249 имп/с
14.7 мкЗв/ч ±1.3%
1.03 мкЗв
Неизвестная бета



Спектр неизвестного бета- источника



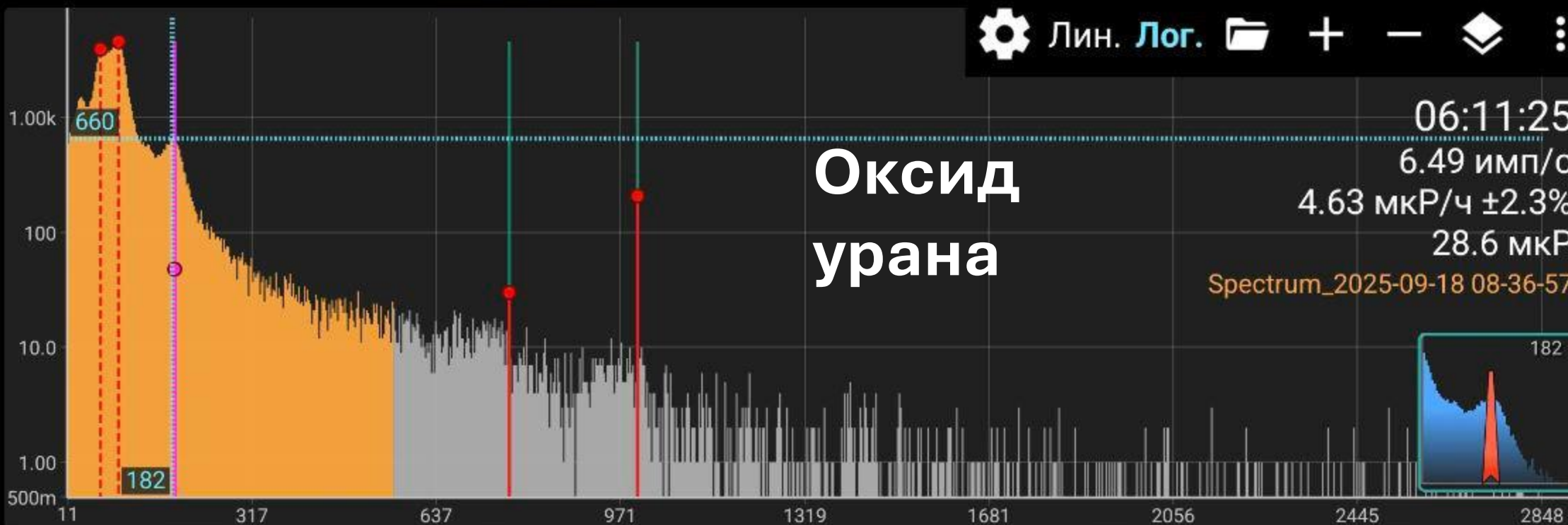


Uranium: 186 кэВ [182 кэВ]

Цепь Uranium

- Графики
- Поиск
- Спектр
- Просмотр
- Спектрограмма
- Активность
- Доза
- Журнал

Имп., Логарифм.



Оксид урана

Лин. **Лог.**

06:11:25
 6.49 имп/с
 4.63 мкР/ч ±2.3%
 28.6 мкР
 Spectrum_2025-09-18 08-36-57



1x Фильтр: 0

Энергия, кэВ

14:46 

RadiaCode v. 1.65.03 / 4.14

  0 dBm   17.5 °C



Графики Поиск Спектр Просмотр Спектрограмма Активность Доза Журнал

Имп., Логарифм.

 Лин. **Лог.**      

Калий-40
(в домике)

05:21:38
1.23 имп/с
6.06 мкР/ч ±2.7%
32.5 мкР
Авто, 4 сек.



1x Фильтр: 0  Энергия, кэВ

Активационный анализ

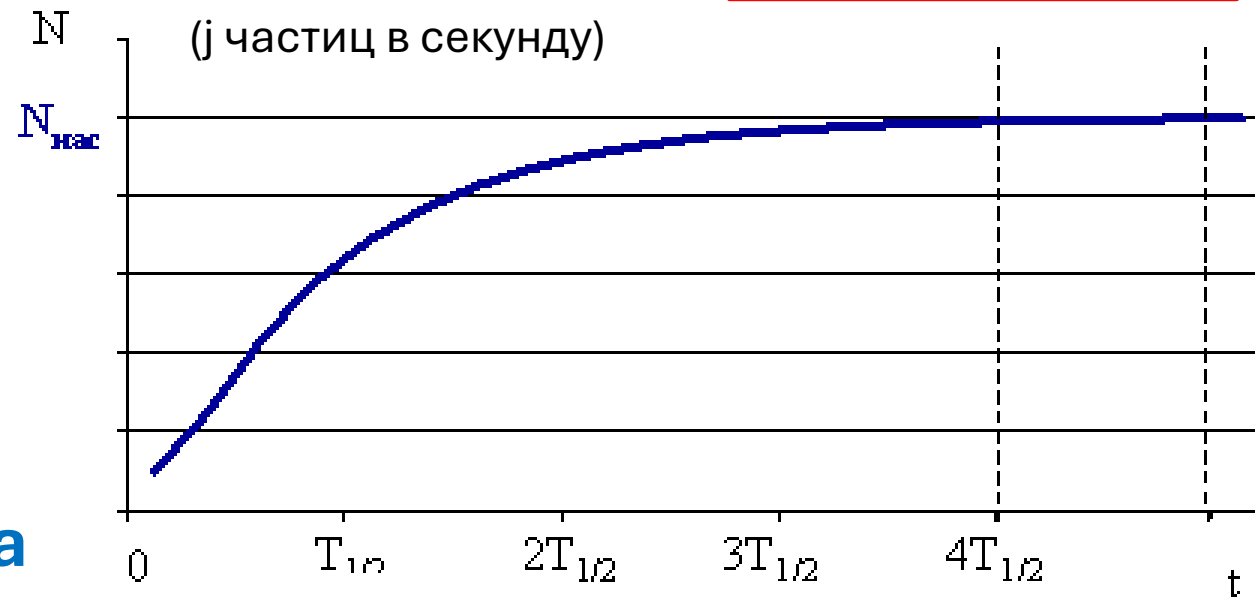
Активацией называется процесс получения радиоактивного вещества в результате ядерных реакций при облучении стабильных ядер нейтронами, гамма-квантами, протонами или другими частицами

Определение изотопного состава образца и концентраций

В качестве примера можно упомянуть нейтронно-активационный анализ волос Исаака Ньютона, который был проведен в английском ядерном центре в Олдермастоне. Для исследования на присутствие золота и ртути облучение нейтронами продолжалось 5 дней, а на мышьяк, сурьму и серебро - до 14 дней. Оказалось, что содержание металлов с высокой токсичностью значительно превышало нормальный уровень; так количество ртути в волосах Ньютона в 40 раз превосходило норму. Полученные данные подтверждают предположение о том, что Ньютон в течение длительного времени болел вследствие ртутного отравления.

Кривая активации

$$N(t) = \frac{ij\sigma_i}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t})$$



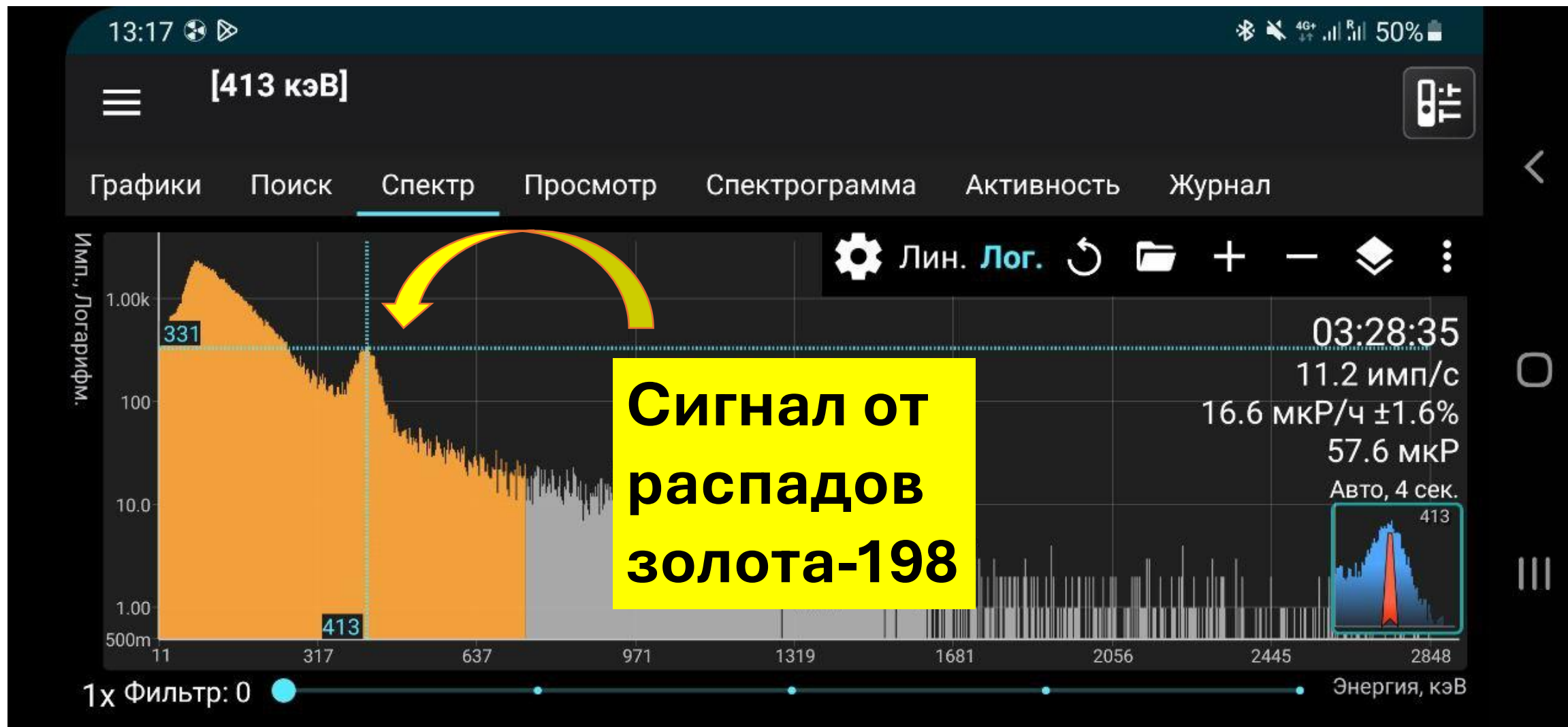
$$i = m_A N_A / M,$$

$$dN = ij\sigma_i dt - \lambda N dt.$$

$t_{\text{обл}}$ – время облучения, $t_{\text{охл}}$ – время охлаждения, т.е. время с момента окончания облучения до момента начала измерения.

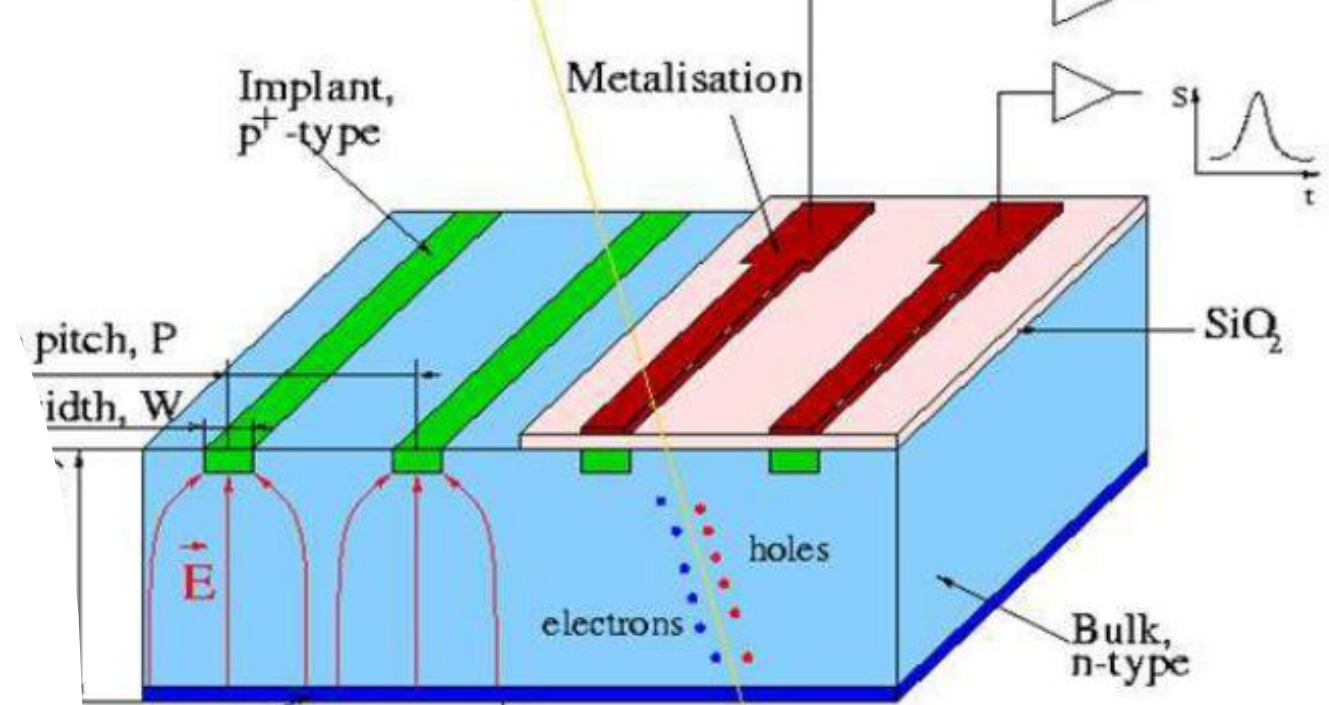
$$I = ij\sigma_i (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}}$$

Нейтронно-активационный анализ (пример)

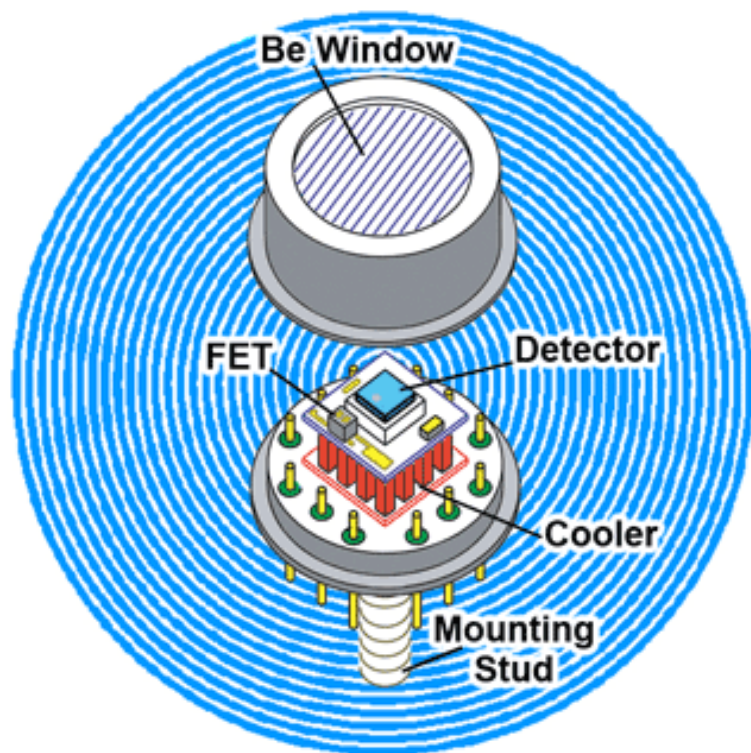


Кремниевые детекторы

- Малая энергия образования электрон-дырочной пары
 - Хорошее энергетическое разрешение, если использовать в качестве спектрометра
 - Рентген-флуоресцентный анализ
- Микронные точности восстановления положения трека
- Необходимо интегрировать считывающую электронику в специально созданные чипы
- **Дорого!**



Рентген-флюоресцентный анализ



Кремниевый дрейфовый детектор

Фотоны из
рентгеновской
трубки

γ -квант

Энергия рентгеновского
кванта различается для
различных элементов

Рентгеновский
квант $E_L - E_K$

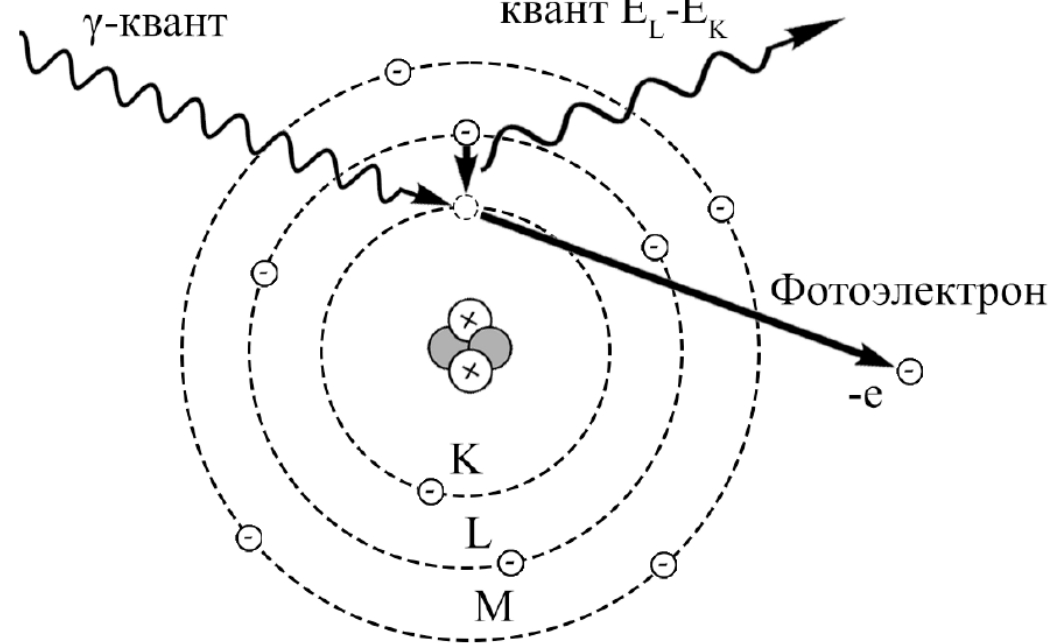
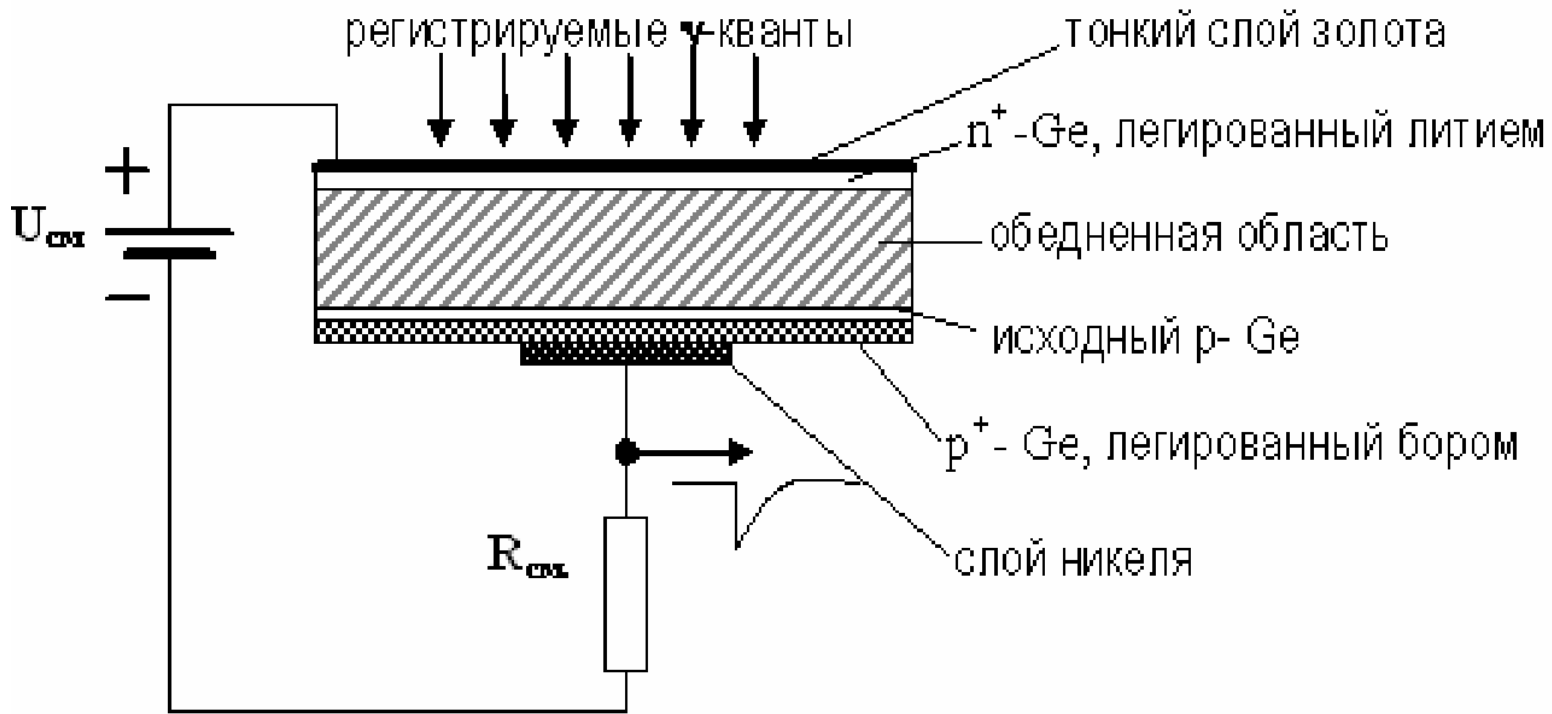


Таблица L и K-линий Характеристического рентгеновского излучения

H 1																He 2							
0.052 Li 3	0.110 Be 4	$K_{\alpha 1}$ $K_{\beta 1}$ Au 79 $L_{\alpha 1}$ $L_{\beta 1}$										0.185 B 5	0.282 C 6	0.392 N 7	0.526 O 8	0.677 F 9	0.851 Ne 10						
1.04 1.07 Na 11	1.25 1.30 Mg 12																1.49 1.55 Al 13	1.74 1.83 Si 14	2.02 2.14 P 15	2.31 2.46 S 16	2.62 2.82 Cl 17	2.96 3.19 Ar 18	
3.31 3.59 K 19	3.69 4.01 Ca 20	4.09 4.46 Sc 21	4.51 4.93 Ti 22	4.95 5.43 V 23	5.41 5.43 Cr 24	5.90 6.49 Mn 25	6.40 7.06 Fe 26	6.93 7.65 Co 27	7.48 8.26 Ni 28	8.05 8.90 Cu 29	8.64 9.57 Zn 30	9.25 10.26 Ga 31	9.89 10.98 Ge 32	10.54 11.73 As 33	11.22 12.50 Se 34	11.92 13.29 Br 35	12.65 14.1 Kr 36						
13.39 14.96 Rb 37	14.16 15.83 Sr 38	14.96 16.74 Y 39	15.77 17.67 Zr 40	16.61 18.62 Nb 41	17.48 19.61 Mo 42	18.41 19.61 Tc 43	19.28 21.66 Ru 44	20.21 22.72 Rh 45	21.18 23.82 Pd 46	22.16 24.94 Ag 47	23.17 26.09 Cd 48	24.21 27.27 In 49	25.27 28.48 Sn 50	26.36 29.72 Sb 51	27.47 30.99 Te 52	28.61 32.29 I 53	29.80 33.6 Xe 54						
1.69 1.75 Cs 55	1.81 1.87 Ba 56	1.92 2.00 57 - 71	2.04 2.12 Hf 72	2.17 2.26 Ta 73	2.29 2.40 W 74	2.42 2.54 Re 75	2.56 2.68 Os 76	2.70 2.83 Ir 77	2.84 2.99 Pt 78	2.98 3.15 Au 79	3.13 3.32 Hg 80	3.29 3.49 Tl 81	3.44 3.66 Pb 82	3.61 3.84 Bi 83	3.77 4.03 Po 84	3.94 4.22 At 85	4.11 4.42 Rn 86						
4.29 4.62 Fr 87	4.47 4.83 Ra 88	90.89 102.85 Ac 89	7.90 9.02 90-100	8.15 9.34 90-100	8.40 9.67 90-100	8.65 10.01 90-100	8.91 10.35 90-100	9.19 10.71 90-100	9.44 11.07 90-100	9.71 11.44 90-100	9.99 11.82 90-100	10.27 12.21 90-100	10.55 12.61 90-100	10.84 13.02 90-100	11.13 13.44 90-100	11.42 13.87 90-100	11.72 14.3 90-100						
Lanthanides 57-71		33.44 37.80 La 57	34.72 39.26 Ce 58	36.02 40.75 Pr 59	37.36 42.27 Nd 60	38.65 43.96 Pm 61	40.12 45.40 Sm 62	41.53 47.03 Eu 63	42.98 48.72 Gd 64	44.47 50.39 Tb 65	45.99 52.18 Dy 66	47.53 53.93 Ho 67	49.10 55.69 Er 68	50.73 57.58 Tm 69	52.36 59.35 Yb 70	54.06 61.28 Lu 71							
Actinides 90-100		4.65 5.04 Th 90	4.04 5.26 Pa 91	5.03 5.49 U 92	5.23 5.72 Np 93	5.43 5.96 Pu 94	5.64 6.21 Am 95	5.05 6.45 Cm 96	6.06 6.71 Bk 97	6.20 6.90 Cf 98	6.50 7.25 Es 99	6.72 7.53 Fm 100	6.95 7.01 90-100	7.10 0.10 90-100	7.41 0.40 90-100	7.65 0.71 90-100							
		93.33 105.59 Th 90	95.85 108.41 Pa 91	98.43 111.29 U 92	101.00 114.18 Np 93	103.65 117.15 Pu 94	106.35 120.16 Am 95	109.10 123.24 Cm 96	111.90 126.36 Bk 97	114.75 129.54 Cf 98	117.65 132.78 Es 99	120.60 136.08 Fm 100	12.97 16.20 90-100	13.29 19.70 90-100	13.61 17.22 90-100	13.95 17.74 90-100	14.28 18.28 90-100	14.62 18.83 90-100	14.96 19.39 90-100	15.31 19.97 90-100	15.66 20.56 90-100	16.02 21.17 90-100	16.38 21.79 90-100

Германиевые детекторы высокой чистоты

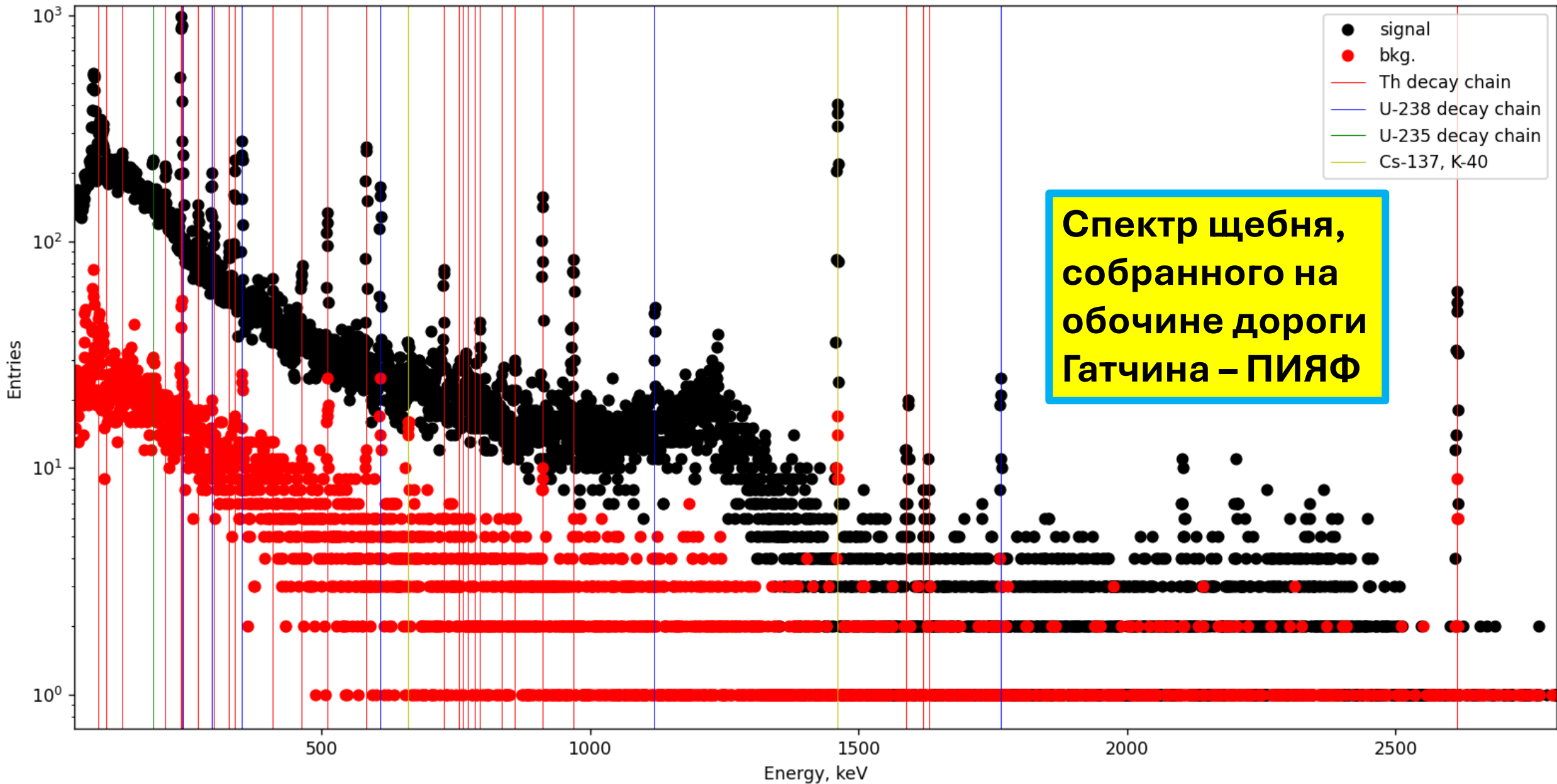


Структура HPGe-детектора

**Требует охлаждения иначе сломается.
Заливка жидкого азота раз в неделю!**



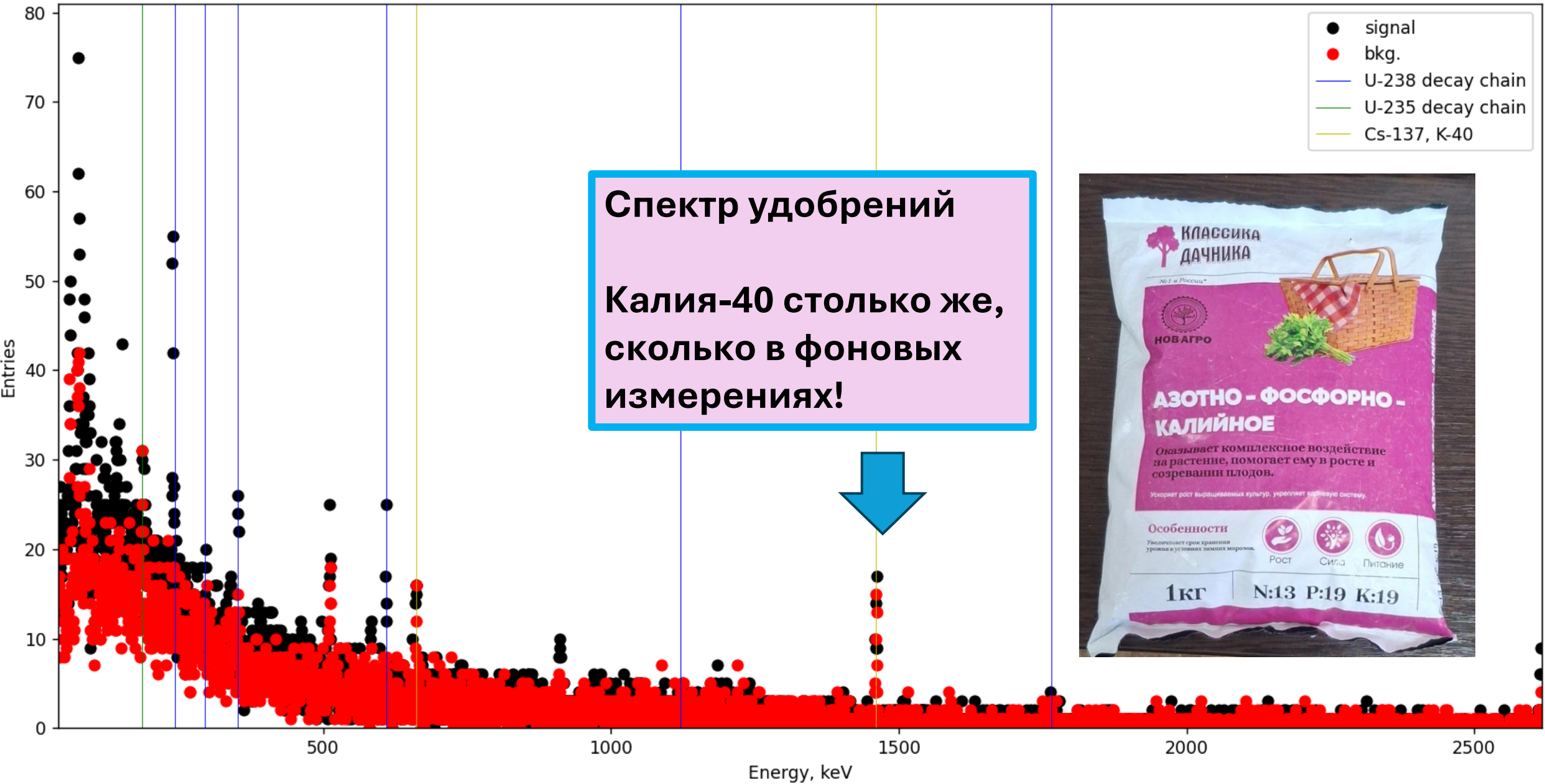
High-Purity Germanium Spectrometer



High-Purity Germanium Spectrometer

- signal
- bkg.
- U-238 decay chain
- U-235 decay chain
- Cs-137, K-40

Спектр удобрений
Калия-40 столько же,
сколько в фоновых
измерениях!



Подведем итоги

- Ионизирующее излучение (ИИ)
 - Виды ИИ / Источники ИИ / Единицы измерения
- Некоторые примеры радиоактивности
 - Калий-40 / Альфа-ряды / Америций-241
- Некоторые методы измерения ИИ
 - Счетчики Гейгера / Сцинтилляционные детекторы / Полупроводниковые детекторы
- Схема проведения измерений
 - Фоновые условия / Время измерения
- Основы статистики для счетных измерений
 - Флуктуации числа отсчетов / Обработка спектров
- Активационный и флюоресцентный анализ

