

Компьютерная сцинтилляционная γ -спектрометрия (5.5.5)

Манро Эйден B01-3036

Цель работы: В данной работе предполагается изучить спектр γ -излучений для образцов ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am ^{152}Eu , найти для них пики полного поглощения и обратного рассеяния.

Теоретическая часть

Введение в гамма-спектрометрию

Гамма-спектрометрия — метод ядерной физики, предназначенный для измерения энергии и интенсивности γ -излучения. Его основная задача — идентификация радиоактивных изотопов по характерным для них энергиям γ -квантов. Для этого используются детекторы, измеряющие не только факт попадания частицы, но и переданную ей энергию. Одним из наиболее распространённых типов таких детекторов является сцинтилляционный детектор на основе кристалла йодида натрия, активированного таллием (NaI(Tl)).

Принцип работы сцинтилляционного детектора

Работу детектора можно представить как цепочку преобразований энергии:

1. **Взаимодействие γ -кванта с веществом.** Проходя через кристалл, γ -квант взаимодействует с его атомами посредством трёх основных процессов: фотоэффекта, комптоновского рассеяния и рождения электрон-позитронных пар. В результате энергия γ -кванта передаётся электронам (или позитронам), которые начинают движение в кристалле.
2. **Возникновение света.** Быстрые электроны, двигаясь в кристалле, возбуждают его атомы. При возвращении в основное состояние атомы испускают кванты видимого или ультрафиолетового света. Чтобы этот свет не поглощался самим кристаллом, в него вводят активатор (таллий). Уровни энергии атомов таллия позволяют испускать фотоны, слабо поглощаемые в кристалле. Таким образом, прохождение γ -кванта вызывает в сцинтилляторе кратковременную вспышку света — *сцинтилляцию*.
3. **Преобразование света в электрический сигнал.** Световая вспышка попадает на фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Под действием света из фотокатода выбиваются электроны (внешний фотоэффект). Эти электроны ускоряются и, ударяясь о диноды, умножаются в числе. В результате слабый первичный ток значительно усиливается, и на выходе ФЭУ формируется измеримый электрический импульс.

4. **От импульса к спектру.** *Ключевой момент:* амплитуда (размер) выходного импульса *пропорциональна* количеству света во вспышке, которое, в свою очередь, *пропорционально* энергии, переданной γ -квантом кристаллу.

Формирование гамма-спектра

Поскольку γ -кванты взаимодействуют с веществом разными способами, их энергия может передаваться детектору не полностью. В результате даже моноэнергетический источник даёт сложный спектр, состоящий из нескольких характерных областей.

- **Пик полного поглощения (Фотопик)** — наиболее важный элемент спектра. Возникает, когда вся энергия γ -кванта поглощается в кристалле (преимущественно за счёт фотоэффекта). Положение этого пика на энергетической шкале соответствует энергии γ -излучения источника. Именно по фотопикам идентифицируют изотопы.
- **Комптоновское плато и комптоновский край** образуются, если γ -квант испытывает комптоновское рассеяние и покидает детектор, оставив ему лишь часть энергии. Множество таких событий формирует непрерывный участок спектра — комптоновское плато. Его верхняя граница, *комптоновский край*, соответствует максимальной энергии, передаваемой электрону при рассеянии на 180° . Энергия комптоновского края $E_{\text{кр}}$ связана с энергией γ -кванта E_γ соотношением:

$$E_{\text{кр}} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma}}, \quad (1)$$

где $m_e c^2 = 511$ кэВ — энергия покоя электрона.

- **Пик обратного рассеяния** возникает за счёт γ -квантов, рассеянных на материалах окружения (например, защите) и затем попавших в детектор. Энергия таких квантов невелика (~ 200 кэВ).
- **Пики характеристического рентгеновского излучения** появляются при выбивании электронов с внутренних оболочек атомов материалов установки.

Энергетическая калибровка и понятие канала

Электронный тракт спектрометра включает *аналого-цифровой преобразователь (АЦП)*, который измеряет амплитуду каждого импульса и присваивает ей целое число — **номер канала**.

- **Номер канала** — это цифровой аналог амплитуды импульса, а следовательно, и энергии. Меньшей амплитуде (низкой энергии) соответствует меньший номер канала, большей амплитуде (высокой энергии) — больший номер канала.
- Для перевода номеров каналов в абсолютные единицы энергии (МэВ) проводят **энергетическую калибровку**. Регистрируют спектры источников с известными энергиями γ -излучения (например, ^{137}Cs , $E_\gamma = 0.662$ МэВ). Строится график зависимости номера канала N от энергии E , которая обычно линейна:

$$N = a \cdot E + b. \quad (2)$$

Коэффициенты a и b определяют из графика, что позволяет в дальнейшем вычислять энергию любого пика по его номеру канала.

Энергетическое разрешение

Идеальный моноэнергетический источник давал бы на спектре бесконечно узкую линию. В реальности пик всегда размыт. Это размытие характеризуется **энергетическим разрешением** R .

Разрешение определяется как отношение ширины пика на половине его высоты ΔE к энергии пика E :

$$R = \frac{\Delta E}{E}. \quad (3)$$

Отсюда следует характерная зависимость

$$R \propto \frac{1}{\sqrt{E}}. \quad (4)$$

Разрешение показывает, насколько близкие по энергии γ -линии детектор может разделить. Чем меньше R , тем лучше разрешение. Оно обусловлено статистическим характером всех этапов преобразования энергии (флуктуации числа фотонов, фотоэлектронов и др.). Для сцинтилляционных детекторов на NaI(Tl) разрешение составляет несколько процентов (например, 7–8% для энергии 662 кэВ).

Принципиальная схема установки

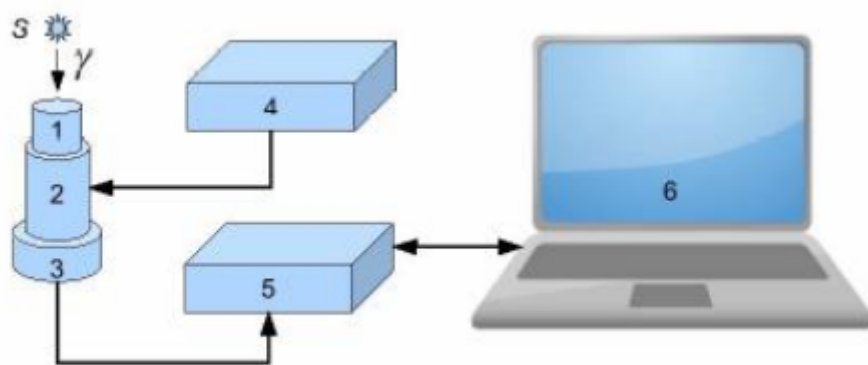


Рис. 1: 1 - сцинтиллятор, 2 - ФЭУ, 3 - предусилитель импульсов, 4 - блок питания для ФЭУ, 5 - АЦП, 6 - компьютер.

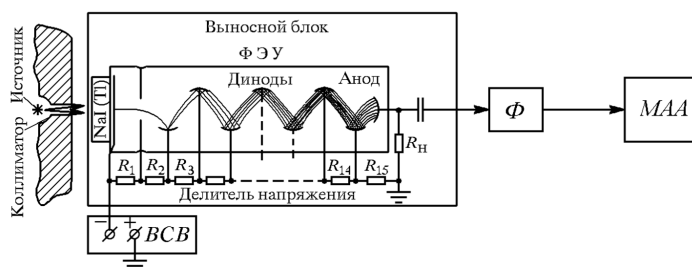


Рис. 2: Блок-схема сцинтилляционного спектрометра.

Принцип работы ФЭУ

В фотоэлектронном умножителе (ФЭУ) слабый световой сигнал сначала преобразуется в один или несколько фотоэлектронов на фотокатоде (фотоэффект), после

чего эти электроны ускоряются высоким напряжением к первому диоду и, ударяясь о него, вызывают вторичную эмиссию.

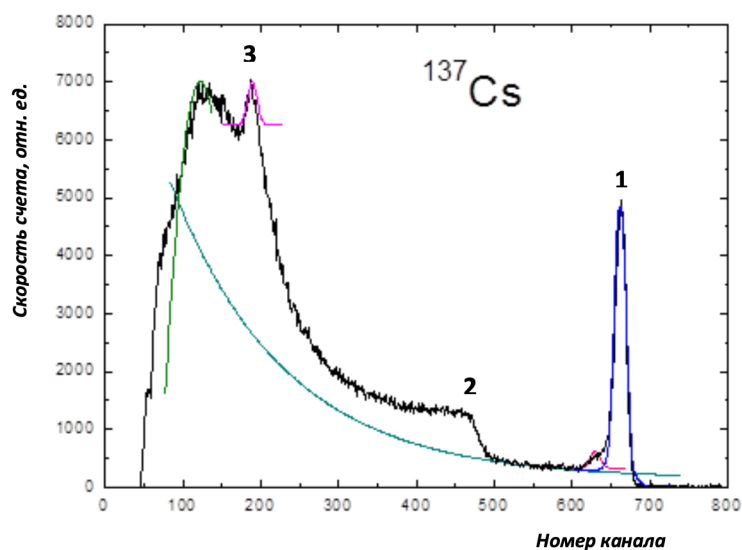


Рис. 3: Пример спектра.

Ход работы

Исследуем спектры следующих образцов: ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{152}Eu :

Источник	Энергия, кэВ	Канал
Na	511	725
Na	1275	1710
Cs	662	920
Co	1173	1604
Co	1332	1835

Таблица 1

Построим калибровочный график зависимости номера канала N_i от энергии γ -кванта E_i .

Получаем уравнение для перехода от номера канала к значению энергии в КэВ:

$$E = (0.75 \pm 0.02)N - (50 \pm 5) \text{ КэВ} \quad (5)$$

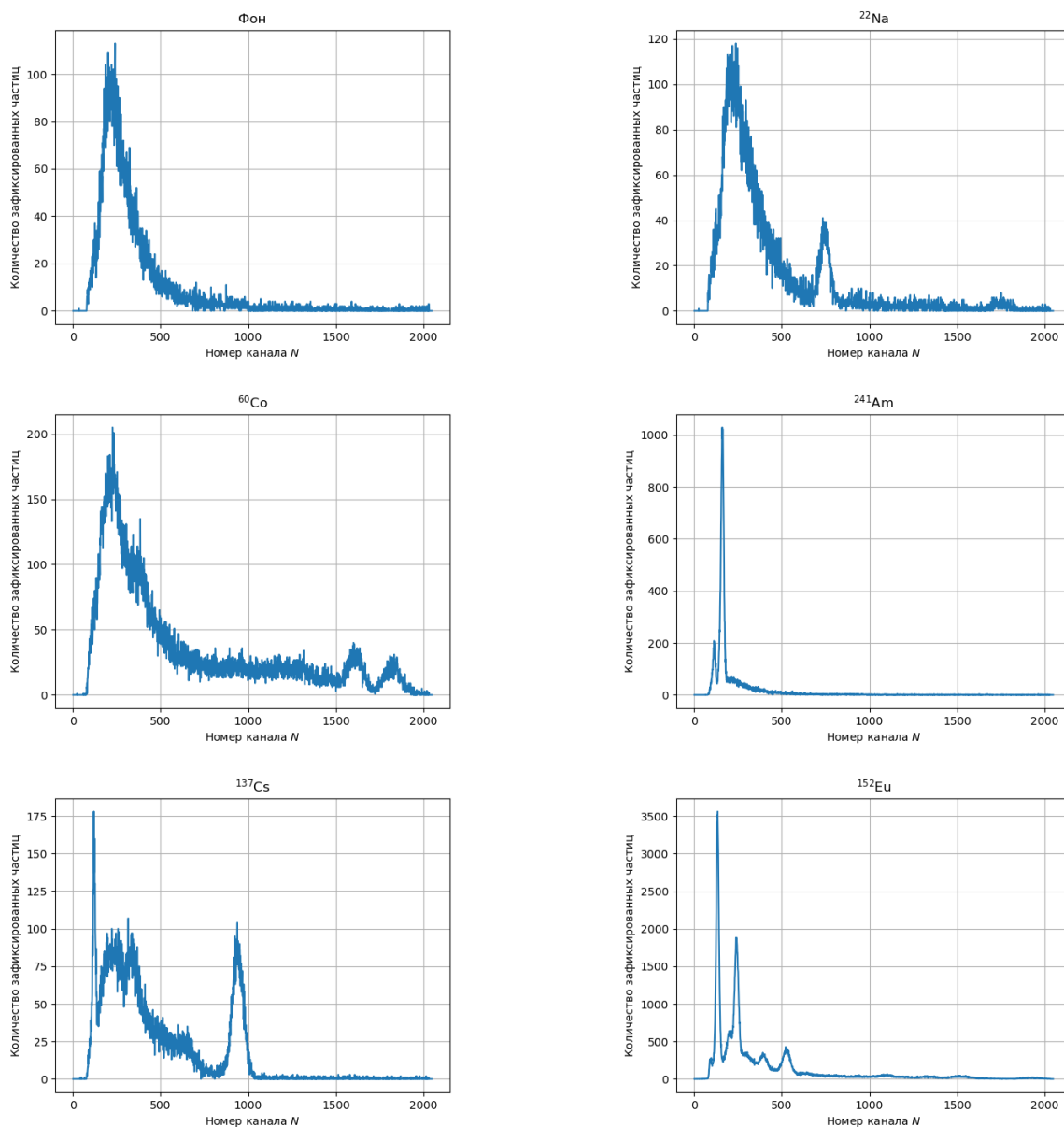
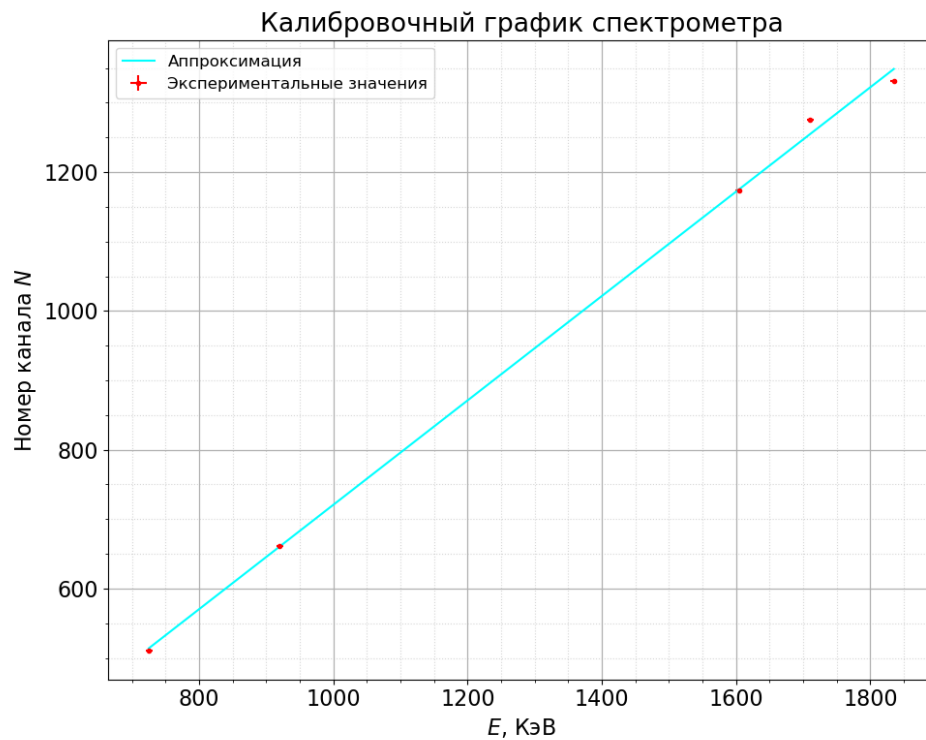


Рис. 4: Спектры образцов

Источник	N	ΔN	E , кэВ	ΔE , кэВ	R
Co (1173)	1604	95	1164	70	0.060
Co (1332)	1835	78	1328	58	0.044
Cs (662)	937	75	668	55	0.082
Na (1275)	1720	162	1246	120	0.096
Na (511)	739	67	522	50	0.095
Am	160	18	93	11	0.118
Am	112	16	57	10	0.175
Eu	132	18	72	13	0.180
Eu	241	25	153	19	0.124
Eu	524	50	362	38	0.105
Eu	392	45	270	34	0.125
Eu	1100	62	789	46	0.059

Таблица 2: Результаты измерения энергий пиков и расчёта энергетического разрешения



Проверим зависимость (4). Для этого построим график зависимости $R^2 = f(1/E)$. Наблюдается линейная зависимость. Из-за неточностей в определении полуширины пиков и ложных пиков у европия точки не лежат на одной прямой.

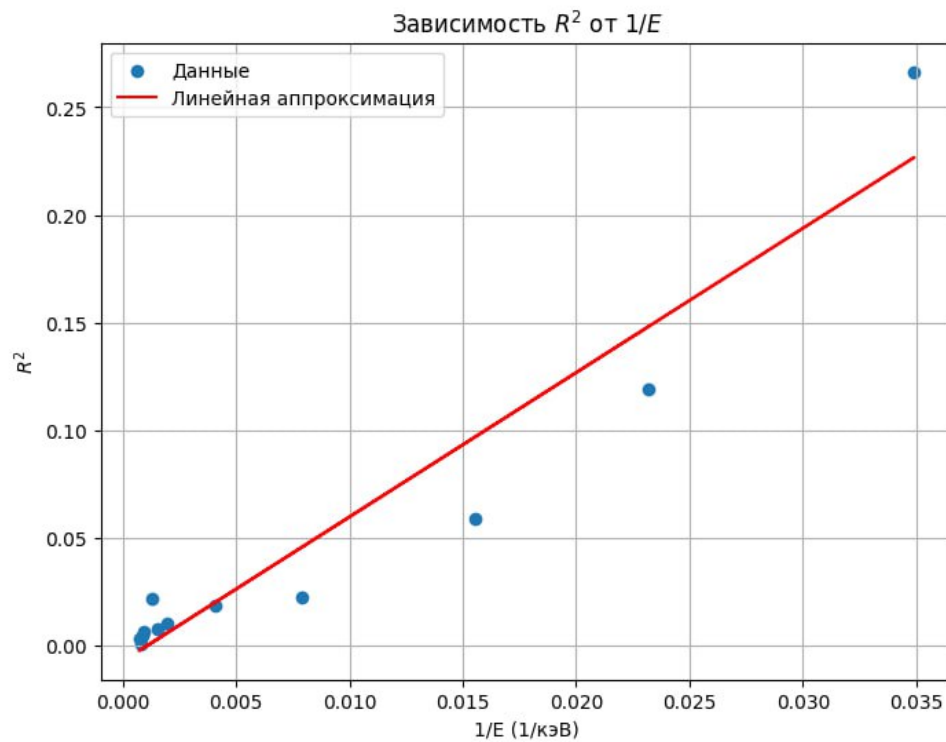


Рис. 5: График зависимости R^2 от $1/E$

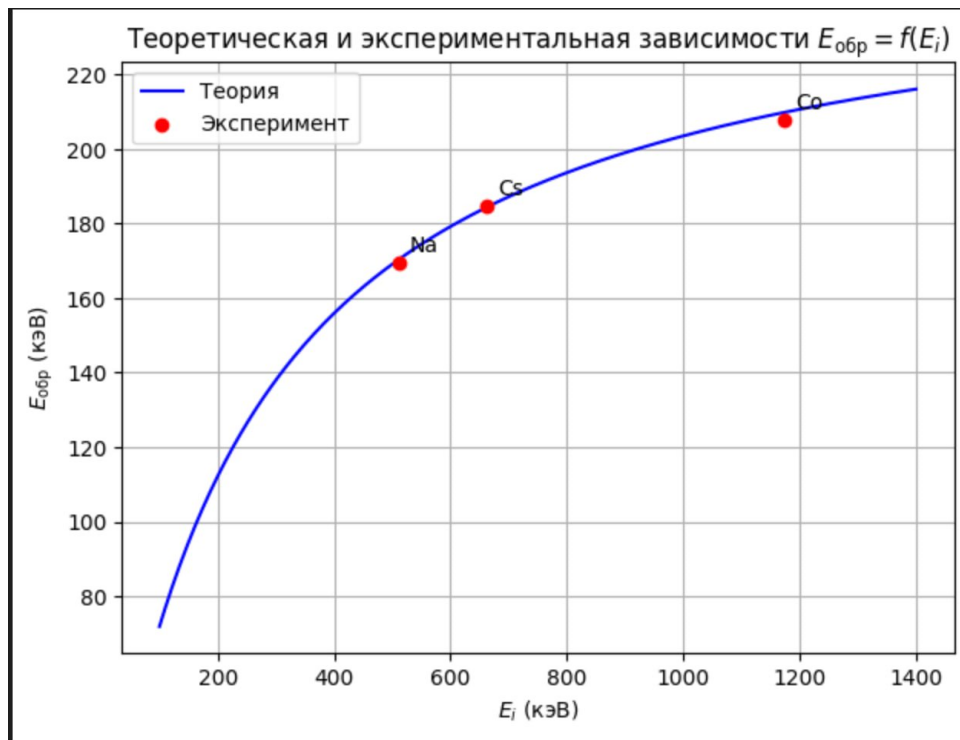


Рис. 6: График зависимости $E_{\text{обр}}$ от E_i

Выводы

В ходе эксперимента были проанализированы γ -спектры изотопов ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am и ^{152}Eu . Определены положения фотопиков, их полуширины, а также выполнена энергетическая калибровка детектора, описываемая зависимостью

Сравнение с табличными энергиями показало согласие в пределах нескольких кэВ, что подтверждает надежность проведённой калибровки.

Кроме фотопиков, на спектрах были зафиксированы характерные для источников признаки — комптоновские плато, края и пики обратного рассеяния. Однако основное внимание уделялось именно пикам полного поглощения, использованным для калибровки и анализа разрешающей способности. Также были замечены ложные пики у Европия, образованные наложением пиков.