

Работа 5.5.5  
Компьютерная сцинтилляционная  $\gamma$ -спектрометрия

Шарапов Денис, Колесников Иван, Б05-004

## Содержание

<b>1</b>	<b>Аннотация</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Теоретические сведения</b>	<b>2</b>
2.1	Энергетическое разрешение спектрометра . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Экспериментальная установка</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Результаты измерений и обработка данных</b>	<b>4</b>
4.1	Калибровка . . . . .	4
4.2	Определение параметров образцов . . . . .	4
4.3	Исследование зависимости энергетического разрешения от энергии регистрируемого излучения .	4
4.4	Энергии края комптоновского рассеяния . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Вывод</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Приложение: спектрограммы</b>	<b>6</b>

# 1 Аннотация

**Цель работы:** исследовать спектры излучения различных источников, характеризовать различные пики в спектрах радиоактивных веществ.

**В работе используются:** сцинтиллятор, фотоэлектронные умножители (ФЭУ), предусилитель импульсов, высоковольтный блок питания для ФЭУ, блок преобразования аналоговых импульсов с ФЭУ в цифровой код, компьютер.

# 2 Теоретические сведения

**Фотоэффект** — процесс взаимодействия гамма-кванта с электроном, связанным с атомом, при котором электрону передается вся энергия гаммакванта. При этом электрону сообщается кинетическая энергия

$$T_e = E_\gamma - I_i,$$

где  $E_\gamma$  — энергия гамма-кванта,  $I_i$  — потенциал ионизации  $i$ -той оболочки атома. Фотоэффект особенно существен для тяжелых веществ, где он идет с заметной вероятностью даже при высоких энергиях гамма-квантов. В легких веществах фотоэффект становится заметен лишь при относительно небольших энергиях гамма-квантов. Наряду с фотоэффектом, при котором вся энергия гамма-кванта передается атомному электрону, взаимодействие гаммаизлучения со средой может приводить к его рассеянию, т.е. отклонению от первоначального направления распространения на некоторый угол.

**Эффект Комптона** — упругое рассеяние фотона на свободном электроне, сопровождающееся изменением длины волны фотона (реально этот процесс происходит на слабо связанных с атомом внешних электронах). Максимальная энергия образующихся комптоновских электронов соответствует рассеянию гамма-квантов на  $180^\circ$  и равна

$$E_{\max} = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{mc^2}{2\hbar\omega}}.$$

**Процесс образования электрон-позитронных пар.** При достаточно высокой энергии гамма-кванта наряду с фотоэффектом и эффектом Комптона может происходить третий вид взаимодействия гамма-квантов с веществом — образование электрон-позитронных пар. Процесс образования пар не может происходить в пустоте, так как в этом случае не выполняются законы сохранения энергии и импульса. В присутствии ядра или электрона процесс образования пары гамма-квантов возможен, так как можно распределить энергию и импульс гамма-кванта между тремя частицами без противоречия с законами сохранения. При этом если процесс образования пары идет в кулоновском поле ядра или протона, то энергия образующегося ядра отдачи оказывается весьма малой, так что пороговая энергия гамма-кванта  $E_0$ , необходимая для образования пары, практически совпадает с удвоенной энергией покоя электрона

$$E_0 \approx 2mc^2 = 1.022 \text{ МэВ}.$$

Появившийся в результате процесса образования пар электрон свою энергию на ионизацию среды. Таким образом, вся энергия электрона остается в детекторе. Позитрон будет двигаться до тех пор, пока практически не остановится, а затем аннигилирует с электроном среды, в результате чего появятся два гамма-кванта. Т.е., кинетическая энергия позитрона также останется в детекторе. Далее возможны три варианта развития событий:

1. оба родившихся гамма-кванта не вылетают из детектора, и тогда вся энергия первичного гамма-кванта останется в детекторе, а в спектре появится пик с  $E = E_\gamma$ ;
2. один из родившихся гамма-квантов покидает детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии  $E = E_\gamma - E_0$ , где  $E_0 = mc^2 = 511 \text{ кэВ}$ ;
3. оба родившихся гамма-кванта покидают детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии  $E = E_\gamma - 2E_0$ , где  $2E_0 = 2mc^2 = 1022 \text{ кэВ}$ .

Таким образом, любой спектр, получаемый с помощью гамма-спектрометра, описывается несколькими компонентами, каждая из которых связана с определенным физическим процессом. Как описано выше, основными физическими процессами взаимодействия гамма-квантов с веществом является фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар, и каждый из них вносит свой вклад в образование спектра. Помимо этих процессов, добавляется *экспонента*, связанная с наличием фона, *пик характеристического излучения*, возникающий при взаимодействии гамма-квантов с окружающим веществом, а также *пик обратного рассеяния*,

образующийся при энергии квантов  $E_\gamma \gg mc^2/2$  в результате рассеяния гамма-квантов на большие углы на материалах конструктивных элементов детектора и защиты. Положение пика обратного рассеяния определяется по формуле

$$E_{\text{обр}} = \frac{E}{1 + 2E/mc^2}, \quad (1)$$

где  $E$  – энергия фотопика.

## 2.1 Энергетическое разрешение спектрометра

Даже при поглощении частиц с одинаковой энергией амплитуда импульса на выходе фотоприёмника сцинтилляционного детектора меняется от события к событию. Это связано:

1. со статистическим характером процессов сбора фотонов на фотоприёмнике и последующего усиления,
2. с различной вероятностью доставки фотона к фотоприемнику из разных точек сцинтиллятора,
3. с разбросом высвечиваемого числа фотонов

В результате в набранном спектре линия (которая для идеального детектора представляла бы дельта-функцию) оказывается размытой, её часто описывают гауссианом. Энергетическим разрешением спектрометра называется величина

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i}, \quad (2)$$

где  $\Delta E_i$  – ширина пика полного поглощения, измеренная на половине высоты,  $E_i$  – энергия регистрируемого  $\gamma$ -излучения. Значение  $E_i$  пропорционально среднему числу фотонов  $\bar{n}_i$  на выходе ФЭУ, т.е.:

$$E_i = \alpha \bar{n}_i. \quad (3)$$

Полуширина пика полного поглощения  $\Delta E_i$  пропорциональна среднеквадратичной флуктуации  $\overline{\Delta n_i}$ . Т.к.  $n_i$  является дискретной случайной величиной, которая распределена по закону Пуассона, то  $\overline{\Delta n_i} = \sqrt{\bar{n}_i}$  и поэтому

$$\Delta E_i = \alpha \overline{\Delta n_i} = \alpha \sqrt{\bar{n}_i}. \quad (4)$$

Из (3), (4) получаем, что

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i} = \frac{\text{const}}{\sqrt{E_i}}. \quad (5)$$

Поскольку энергетическое разрешение зависит от энергии, его следует указывать для конкретной энергии. Чаще всего разрешение указывают для энергии гамма-линии  $^{137}\text{Cs}$  (661,7 кэВ).

## 3 Экспериментальная установка

Принципиальная блок-схема гамма-спектрометра, изучаемого в данной работе, показана на рис. 1.

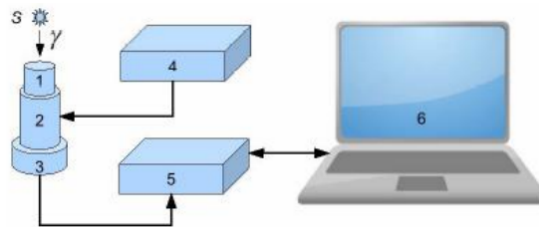


Рис. 1: Принципиальная блок-схема спектрометра: 1 – сцинтиллятор, 2 – ФЭУ, 3 – предусилитель импульсов, 4 – высоковольтный блок питания для ФЭУ, 5 – блок преобразования аналоговых импульсов с ФЭУ в цифровой код (АЦП), 6 – компьютер для сбора данных, их обработки и хранения

## 4 Результаты измерений и обработка данных

### 4.1 Калибровка

Используя известные значения (табл. 1) пиков в спектрах натрия и цезия, построим калибровочный график соответствия номера канала определённому значению энергии (рис. 2). Получаем уравнение для перехода от номера канала к значению энергии:

$$E = 0.73N_i - 48,41 \text{ [кэВ]}.$$

Таблица 1: Известные значения пиков в спектрах натрия и цезия

Образец	$E$ , кэВ	$N$
$^{22}\text{Na}$	511,0	766
$^{22}\text{Na}$	661,7	971
$^{137}\text{Cs}$	1275,0	1811

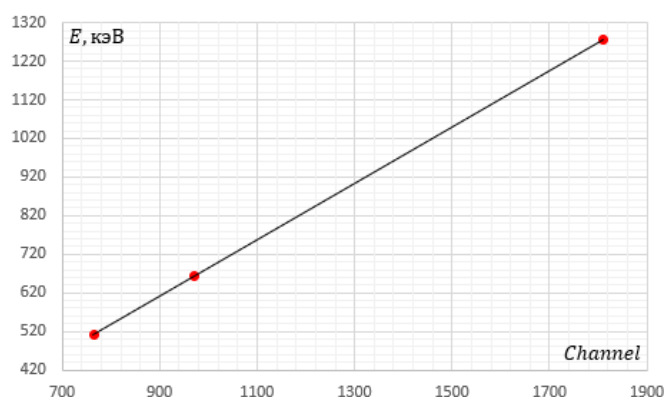


Рис. 2: Калибровочный график для перехода от номера канала к значению энергии

### 4.2 Определение параметров образцов

Используя калибровочный график, определим для всех остальных источников значения энергии пиков полного поглощения  $E_i$ , их ширины на половине высоты  $\Delta E_i$  и энергетическое разрешение  $R_i$ . Результаты занесём в таблицу 2. В последний столбец  $E$  запишем справочные значения для соответствующих энергий пиков полного поглощения.

Таблица 2: Пики полного поглощения различных образцов

Элемент	$N_i$	$\Delta N_i$	$E_i$ , МэВ	$\Delta E_i$ , МэВ	$R_i$	$E$ , МэВ
$^{22}\text{Na}$	1811	83	1.274	0.030	0.023	1.274
$^{60}\text{Co}$	1670	37	1.171	0.027	0.023	1.173
$^{60}\text{Co}$	1892	45	1.333	0.033	0.024	1.332
$^{137}\text{Cs}$	967	62	0.662	0.022	0.032	0.662
$^{241}\text{Am}$	149	13	0.060	0.004	0.067	0.595
$^{152}\text{Eu}$	235	17	0.123	0.006	0.045	0.122
$^{152}\text{Eu}$	399	31	0.243	0.010	0.040	0.245
$^{152}\text{Eu}$	534	41	0.341	0.015	0.041	0.344

### 4.3 Исследование зависимости энергетического разрешения от энергии регистрируемого излучения

Проверим зависимость (5). Для этого построим график зависимости  $R^2 = f(1/E)$  (рис. 3). Наблюдается линейная зависимость. Из-за неточностей в определении полуширины пиков точки не лежат на одной прямой.

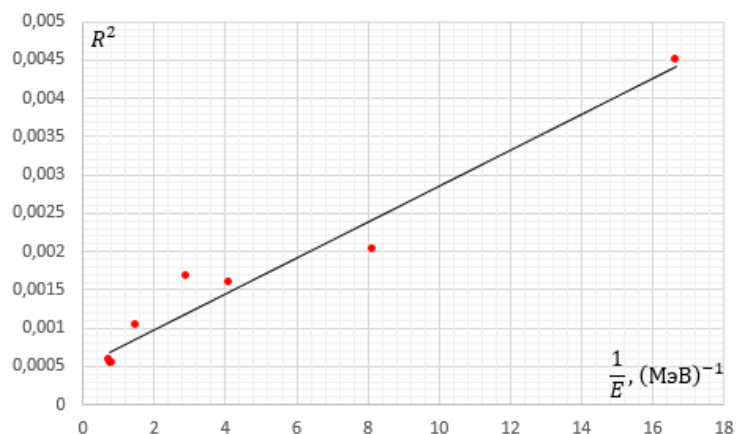


Рис. 3: Зависимость энергетического разрешения от энергии регистрируемого излучения

#### 4.4 Энергии края комптоновского рассеяния

Определим энергии края комптоновского поглощения для образцов  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и сравним их с соответствующими справочными значениями. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3: Результаты определения энергии края комптоновского поглощения

Образец	$E_{\text{exp}}, \text{МэВ}$	$E_{\text{thr}}, \text{МэВ}$
$^{60}\text{Co}$	0,922	0,963
$^{137}\text{Cs}$	0,448	0,477
$^{22}\text{Na}$	0,999	1,062

В спектрах, где наблюдаются пики обратного рассеяния, определим энергии этих пиков и сравним измеренные значения с определёнными по формуле (1). Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4: Энергии пиков обратного рассеяния

Образец	$E_{\text{exp}}, \text{МэВ}$	$E_{\text{thr}}, \text{МэВ}$
$^{60}\text{Co}$	0,228	0,209
$^{60}\text{Co}$	0,228	0,214
$^{137}\text{Cs}$	0,198	0,184

Эти значения практически совпадают. Пики обратного рассеяния в спектре кобальта, отвечающие разным пикам полного поглощения, на графике неразрешимы (виден один широкий пик).

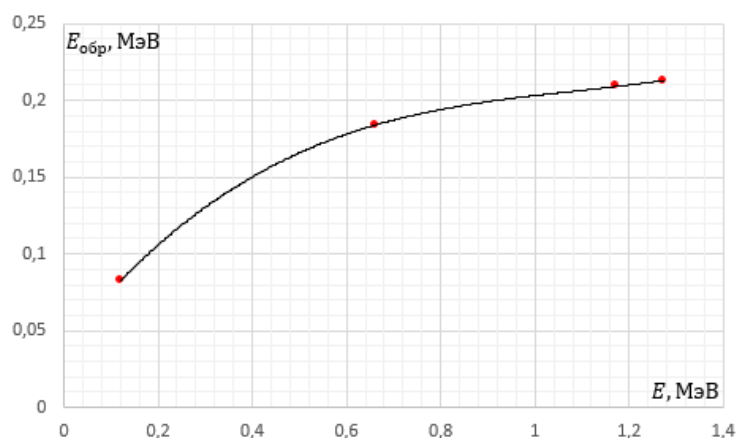


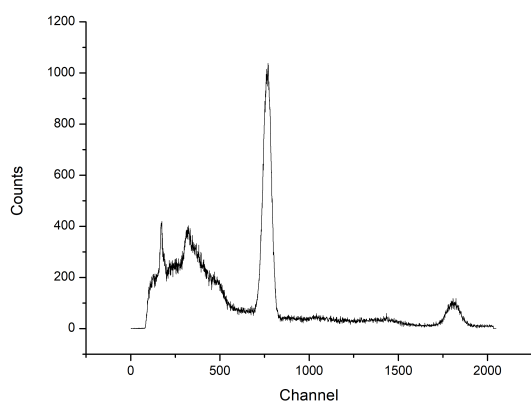
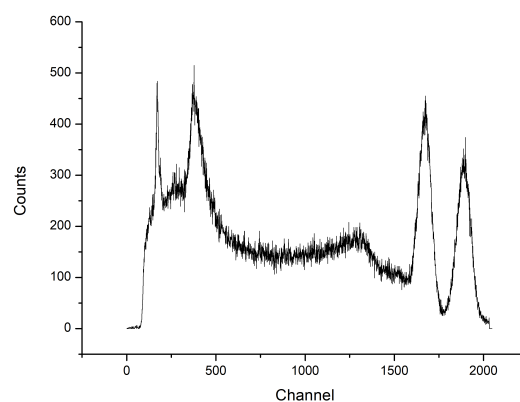
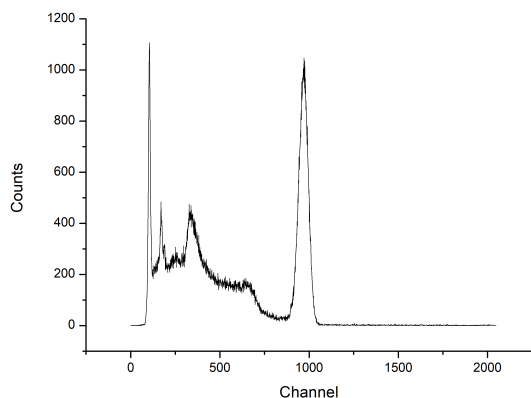
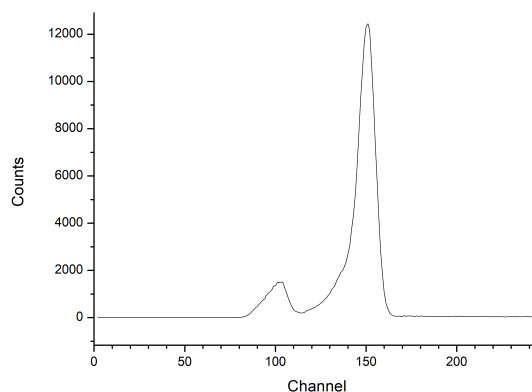
Рис. 4: Пики обратного рассеяния

## 5 Вывод

В ходе работы после калибровки прибора были сняты спектры образцов  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ , а также исследован спектр неизвестного образца и определен его состав —  $^{137}\text{Cs}$ . В спектрах были исследованы пики, соответствующие следующим взаимодействиям гамма-квантов с веществом:

- фотоэффект (пики полного поглощения)
- эффект Комптона (характерное распределение энергий в спектре, оканчивающееся комптоновским краем)
- обратное рассеяние (пики обратного рассеяния)
- аннигиляция позитронов (пик 511 кэВ в спектре натрия, по которому проводилась калибровка)

## 6 Приложение: спектрограммы

Рис. 5: Спектр  $^{22}\text{Na}$ Рис. 6: Спектр  $^{60}\text{Co}$ Рис. 7: Спектр  $^{137}\text{Cs}$ Рис. 8: Спектр  $^{241}\text{Am}$

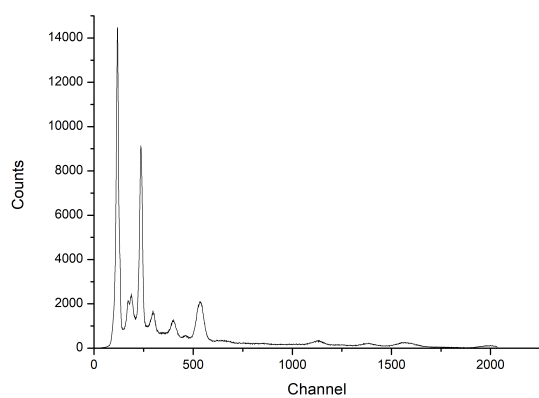
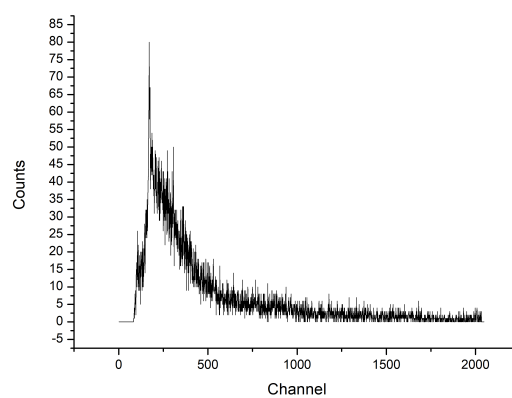
Рис. 9: Спектр  $^{152}\text{Eu}$ 

Рис. 10: Спектр шума