

# Отчет о выполнении лабораторной работы 5.5.5

## Компьютерная сцинтилляционная $\gamma$ -спектрометрия

Выполнил: Голубович Тимур, группа Б01-110

01.11.2023

### Цель работы

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

### Оборудование и приборы

Источник  $\gamma$ -квантов со свинцовым коллиматором; набор поглотителей из различных материалов; сцинтилляционный счётчик; пересчётный прибор.

### Теоретическое введение

Основная задача спектрометрических измерений заключается в определении энергии, интенсивности дискретных гамма-линий от различных гамма-источников и их идентификации.

Основными процессами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар. Каждый из этих процессов вносит свой вклад в образование наблюдаемого спектра. Образующиеся при этих процессах электроны испытывают большое количество неупругих соударений с молекулами и атомами среды. Неупругие соударения могут сопровождаться как ионизацией, так и возбуждением молекул или атомов среды. В промежуточных же стадиях (при переходах возбужденных молекул или атомов в основное состояние, при рекомбинации электрических зарядов и т.п.) в веществе возникают кванты света различных длин волн, присущих данному веществу.

При **фотоэффекте** кинетическая энергия электрона  $T_e = E_\gamma - I_i$ , где  $I_i$  — энергия 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 гамма-излучения со средой может приводить к его рассеянию, т.е. отклонению от первоначального направления распространения на некоторый угол.

При **эффекте Комптона** происходит упругое рассеяние фотона на свободном электроны, 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  $2\pi$  и равна

$$E_{c\_max} = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{m_e c^2}{2\hbar\omega}} \quad (1)$$

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**. 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, необходимая для образования пары, практически совпадает с удвоенной энергией покоя электрона  $E_0 = 2m_e c^2 = 1.022 \text{ МэВ}$ .

Появившийся в результате процесса образования пар электрон теряет 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:

а) оба родившихся гамма-кванта не вылетают из детектора, и тогда вся энергия первичного гамма-кванта останется в детекторе, а в спектре появится пик с  $E = E_\gamma$ ;

б) один из родившихся гамма-квантов покидает детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии  $E = E_\gamma - E_0$ , где  $E_0 = m_e c^2 = 511 \text{ кэВ}$ ;

в) оба родившихся гамма-кванта покидают детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии  $E = E_\gamma - 2E_0$ , где  $2E_0 = 2m_e c^2 = 1022 \text{ кэВ}$ ;

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 являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар, и каждый из них вносит свой вклад в образование спектра. Помимо этих процессов, добавляются 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 ( $E$  — энергия фотопика):

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

## Экспериментальная установка

Энергетическим разрешением спектрометра называется величина

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i} \quad (3)$$

т.е. отношение ширины пика полного поглощения (измеренной на полувысоте) к регистрируемой энергии пика поглощения. Это значение  $E_i \propto \bar{n}_i$  — числу частиц на выходе ФЭУ. При этом  $\Delta E_i \propto \overline{\Delta n_i} = \sqrt{\bar{n}_i}$  — ширина пика пропорциональна средне-квадратичной флуктуации, которая равна корню из числа частиц. Таким образом, наша формула (3) примет вид

$$R_i = \frac{\text{const}}{\sqrt{E_i}} \quad (4)$$

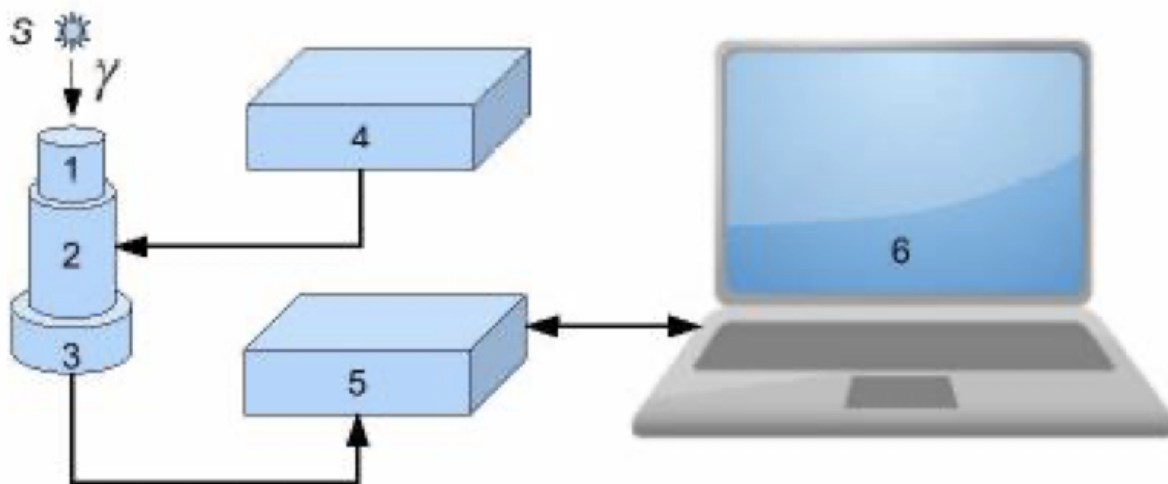


Рис. 1: Экспериментальная установка

## Ход работы

Проведем измерения гамма-спектров для  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{152}\text{Eu}$ , а также измерение фона. Измерения для цезия повторим на соседней установке. Получаем зависимость счета на сцинтилляторе  $N'_q$  от номера канала  $N$ .

Найдем пики полного рассеяния для натрия  $^{22}\text{Na}$  и цезия  $^{137}\text{Cs}$ :

$$N_{Na\_1} = 597.5, \quad N_{Na\_2} = 1395.2, \quad N_{Cs} = 754.2 \quad (5)$$

Мы знаем, что этим пикам соответствуют табличные значения энергии 511, 1275 и 662 кэВ соответственно. Тогда проведем калибровку спектрометра, построив линейную зависимость энергии гамма-кванта от номера канала  $E_j = f(N_j)$ . Результат калибровки:

$$E_j = (-60.537 + 0.957N_i) \text{ кэВ} \quad (6)$$

С помощью полученной зависимости переведем все полученные значения каналов в энергии, а счет сцинтиллятора отнормируем по времени, получив число частиц за секунду  $N_q = \frac{N'_q}{t}$ . Погрешность счета подсчитаем по формуле

$$\sigma_{N_q} = N_q \cdot \frac{\sqrt{N'_q}}{N'_q} = \frac{\sqrt{N'_q}}{t} \quad (7)$$

Во всех измерениях  $t$  в диапазоне 600 – 700 секунд. Отложим по оси абсцисс энергию полученных экспериментальных точек, а по оси ординат – число частиц за секунду (рис. 1 – 6).

С помощью ПО компьютера экспериментальной установки получим значения пиков полного поглощения и их ширины. По формуле (3) подсчитаем для них разрешающую способность спектрометра. Результаты сведем в таблицу.

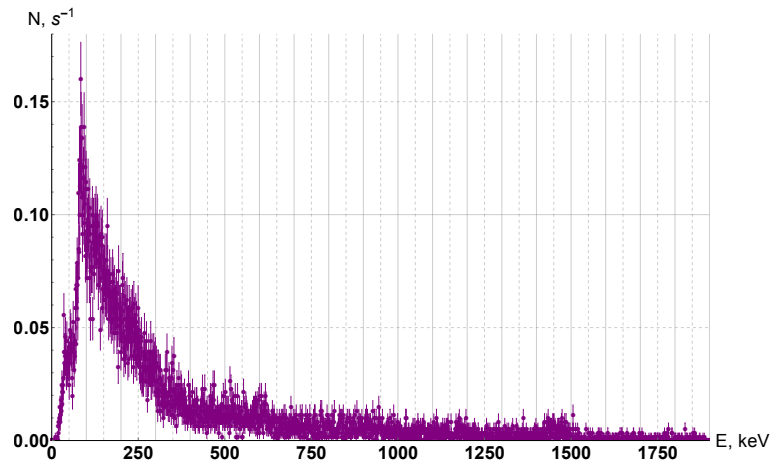
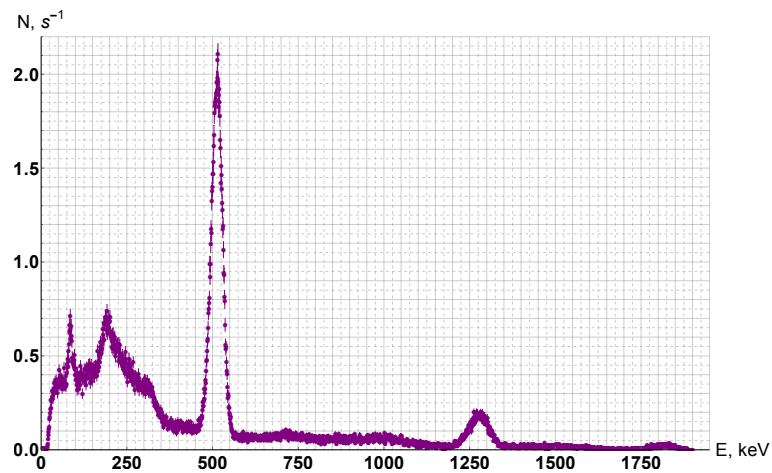


Рис. 2: Измерение фона

Рис. 3: Измерение спектра источника натрия  $^{22}\text{Na}$

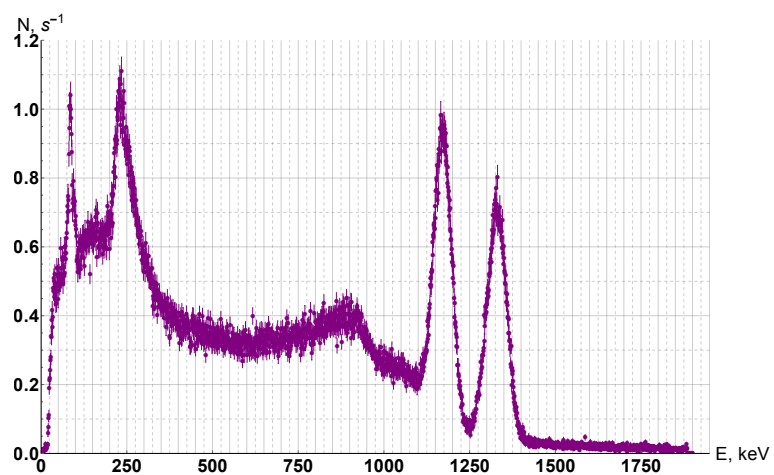


Рис. 4: Измерение спектра источника кобальта  $^{60}\text{Co}$

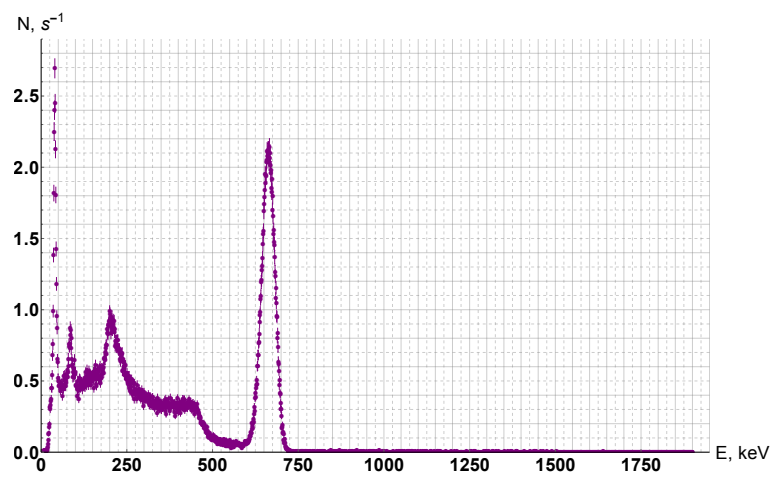


Рис. 5: Измерение спектра источника цезия  $^{137}\text{Cs}$

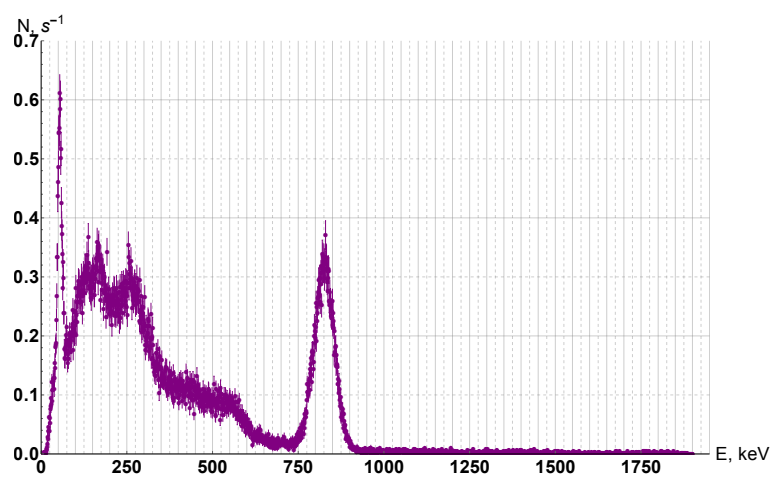
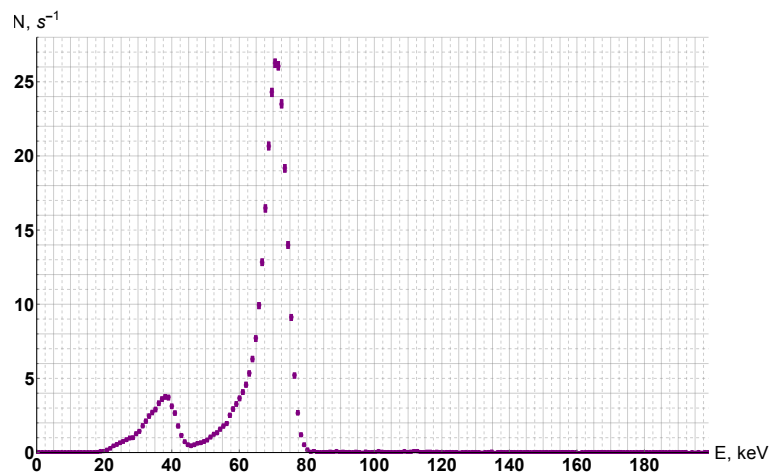
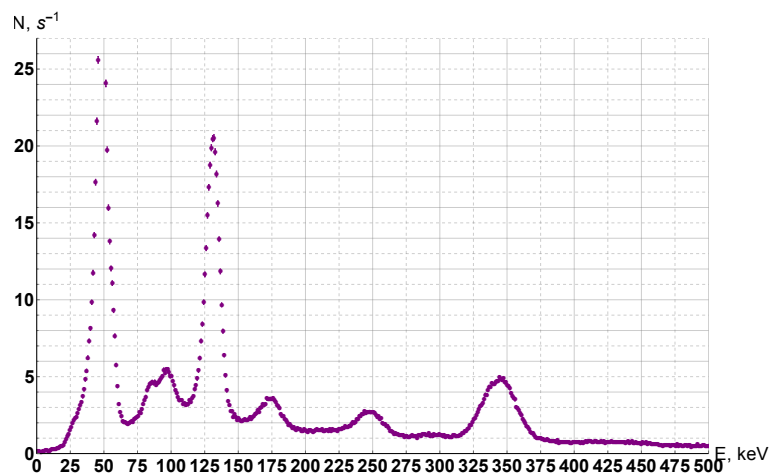


Рис. 6: Измерение на второй установке спектра источника цезия  $^{137}\text{Cs}$

Рис. 7: Измерение спектра источника америция  $^{241}\text{Am}$ Рис. 8: Измерение спектра источника европия  $^{152}\text{Eu}$ 

Образец	$N_i$	$\Delta N_i$	$E_i$ , кэВ	$\Delta E_{,i}$ кэВ	$R_i$
Натрий $^{22}\text{Na}$	597.48	42	511.4	40.2	0.079
Натрий $^{22}\text{Na}$	1395.23	76.6	1275.1	73.4	0.058
Цезий $^{137}\text{Cs}$	754.22	47.4	661.5	45.3	0.069
Кобальт $^{60}\text{Co}$	1286.1	65.1	1170.6	62.3	0.053
Кобальт $^{60}\text{Co}$	1450.59	73.3	1328.1	70.2	0.053
Америций $^{241}\text{Am}$	135.57	9.5	69.2	9	0.131
Европий $^{152}\text{Eu}$	199.01	12.3	130	11.7	0.09
Европий $^{152}\text{Eu}$	320.8	23.1	246.6	22.1	0.089
Европий $^{152}\text{Eu}$	421.7	30.4	343.2	29.1	0.085

Таблица 1: Пики прямого поглощения

Экспериментально оценим пики комптоновского рассеяния и сравним с теоретическим расчетом. Результаты сведем в таблицу. Построим график зависимости теоретического расчета от экспериментального.

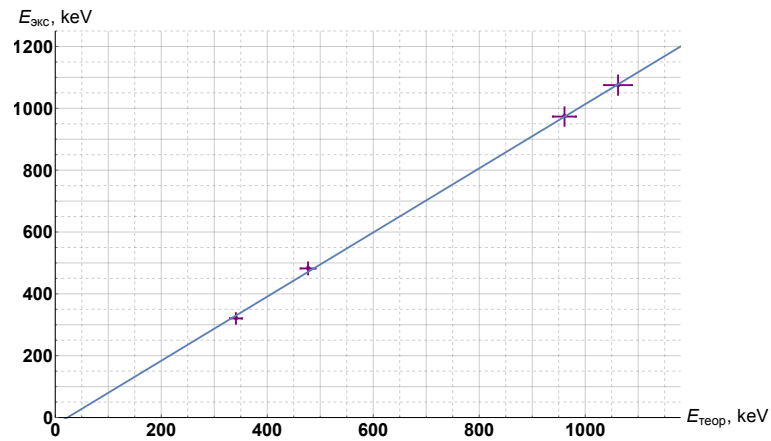


Рис. 9: Зависимости теоретического расчета края комптоновского спектра от экспериментального

Найдем параметры фита:

Образец	$E_i$ , кэВ	$E_{c \text{ экc}}$ , кэВ	$E_{c \text{ теор}}$ , кэВ
Натрий $^{22}\text{Na}$	511.4	320.5	341.
Цезий $^{137}\text{Cs}$	661.5	482.2	477.2
Кобальт $^{60}\text{Co}$	1270.6	973.3	960.9
Натрий $^{22}\text{Na}$	1275.1	1075	1062.3

Таблица 2: Комптоновские спектры

	Estimate	Standard Error
b	23.43	12.36
a	0.96	0.02

Таблица 3: Фит рис. 8 функцией  $y = ax + b$

Видим, что коэф. при  $x \simeq 1$ , т.е. результат согласуется с теорией.

Для проверки соотношения (4) построим график зависимости  $R_i^2 = f(\frac{1}{E_i})$  для величин из таблицы 1.

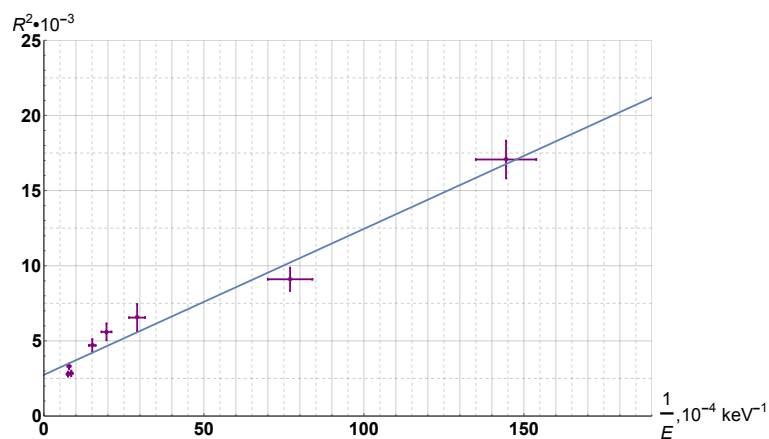


Рис. 10: Проверка формулы  $R = \frac{\text{const}}{\sqrt{E}}$

Результаты фита сведем в таблицу:

	Estimate	Standard Error
b	2.74367	0.40169
a	0.097081	0.00673854

Таблица 4: Фит рис. 9 функцией  $y = ax + b$

Видно, что точки вполне хорошо описывают прямую.

Теперь найдем пики обратного рассеяния.

Образец	$E_i$ , кэВ	$E_{\text{обр}}$ , кэВ
Натрий $^{22}\text{Na}$	511.4	190
Цезий $^{137}\text{Cs}$	661.5	205
Кобальт $^{60}\text{Co}$	1328.1	230
Европий $^{152}\text{Eu}$	129.973	95

Таблица 5: Пики обратного рассеяния

Построим график зависимости  $E_{\text{обр}} = f(E)$  согласно (2) и нанесем экспериментальные точки:



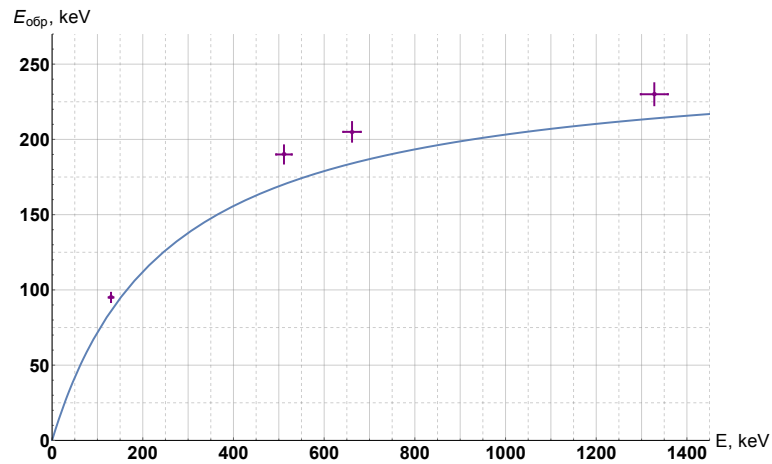


Рис. 11: Пики обратного рассеяния

Заметим, что на наших графиках (для натрия, цезия, кобальта и европия) в левой части спектра присутствует узкий (небольшой и широкий для европия) пик, соответствующий энергии порядка  $E_x \simeq 80$  кэВ. Это соответствует характеристическому излучению из свинца, служащего защитой спектрометра от внешнего излучения.

Пронаблюдав на осциллографе изображение импульсов с ФЭУ, оценим величины  $\tau_0 \simeq 0,6$  мкс — характерное время высвечивания для ФЭУ, и постоянную времени  $RC \simeq 35$  мкс. Это было оценено по передним и задним фронтам импульсов соответственно.

## 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 keV в спектре натрия, по которому проводилась калибровка)

Все значения энергии, определённые по спектрам, практически совпадали с табличными и расчётными.

Также была проверена линейная зависимость квадрата спектрального разрешения прибора от величины, обратной энергии полного поглощения.

## Список литературы

- [1] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 3. Квантовая физика: учебное пособие* под ред. Ю. М. Ципенюка