

Лабораторная работа 5.5.5 Компьютерная сцинтилляционная γ -спектрометрия

Иван Сладков

14 октября 2021 г.

1 Аннотация

В данной работе проводится исследование спектров γ -лучей от различных образцов при помощи сцинтилляционных γ -спектрометров на основе неорганического кристалла NaI(Tl) и органической сцинтиллирующей пластмассы.

2 Теоретические сведения

Взаимодействие с веществом При прохождении γ -квантов через материальную среду образуются электроны, возникающие за счет фотоэффекта, комптоновского рассеяния и рождения электрон-позитронных пар. 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. 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.

Вообще говоря, возникающее излучение должно сильно поглощаться в сцинтилляторе, так как его энергия в точности равна энергии возбуждения атомов среды. Чтобы избежать этого явления, в кристаллы сцинтиллятора вводят небольшие добавки других атомов. При этом спектр поглощения сдвигается относительно спектра испускания в сторону меньших длин волн, и увеличивается вероятность выхода из вещества хотя бы некоторой части квантов света, отвечающих длинноволновому краю спектра испускания. В этом случае прохождение ионизирующей частицы через вещество будет сопровождаться световой вспышкой, которая и может быть использована для регистрации частицы.

Энергетическое разрешение спектрометра Даже при поглощении частиц с одинаковой энергией амплитуда импульса на выходе фотоприёмника сцинтилляционного детектора меняется от события к событию. Это связано со статистическим характером процессов сбора фотонов на фотоприёмнике и последующего усиления, с различной вероятностью доставки фотона к фотоприёмнику из разных точек сцинтиллятора и с разбросом высвечиваемого числа фотонов. Поэтому линия на спектре размывается. Её часто описывают гауссианом. В данной работе используется этот метод обработки данных.

Энергетическим разрешением спектрометра называется величина

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i} \propto \frac{1}{\sqrt{E_i}}. \quad (1)$$

Здесь ΔE_i – ширина пика полного поглощения, измеренная на половине высоты. Энергетическое разрешение, очевидно, зависит от энергии, поэтому чаще всего его указывают для энергии γ -линии ^{137}Cs .

2.1 Расчётные формулы

Для эффекта Комптона значение энергии γ -кванта после взаимодействия определяется по формуле

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{mc^2} (1 - \cos \theta)}$$

Форма импульсов на выходе ФЭУ определяется выражением

$$U(t) \propto e^{-\frac{t}{RC}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right). \quad (2)$$

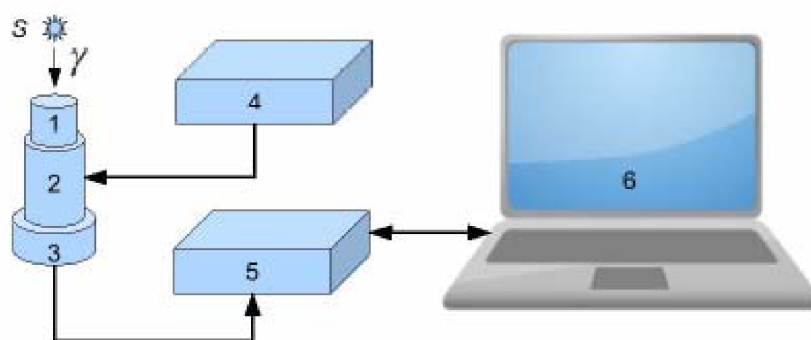


Рис. 1: Принципиальная схема экспериментальной установки

Источник	N_i	ΔN_i	E_i , МэВ	ΔE_i , МэВ	R_i
^{22}Na	719 ± 1	50.3 ± 0.5	0.511 ± 0.001	0.038 ± 0.001	0.070 ± 0.001
	1695 ± 2	68 ± 4	1.274 ± 0.003	0.051 ± 0.003	0.040 ± 0.004
^{60}Co	1567 ± 1	75 ± 1	1.168 ± 0.001	0.058 ± 0.001	0.049 ± 0.002
	1771 ± 1	80 ± 2	1.327 ± 0.001	0.062 ± 0.002	0.047 ± 0.003
^{137}Cs	914 ± 1	57 ± 1	0.662 ± 0.001	0.044 ± 0.001	0.066 ± 0.001
^{152}Eu	114.8 ± 0.1	15 ± 1	0.039 ± 0.001	0.011 ± 0.001	0.280 ± 0.003
	227 ± 1	15 ± 0.5	0.126 ± 0.001	0.011 ± 0.002	0.081 ± 0.001
^{241}Am	145.5 ± 0.5	11 ± 1	0.0630 ± 0.0005	0.008 ± 0.001	0.128 ± 0.002
	99.3 ± 0.5	14.1 ± 0.5	0.027 ± 0.001	0.0103 ± 0.0005	0.370 ± 0.002

Таблица 1: Сводная таблица пиков

3 Оборудование и инструментальные погрешности

Схема экспериментальной установки отображена на рис. 1.

В работе используются:

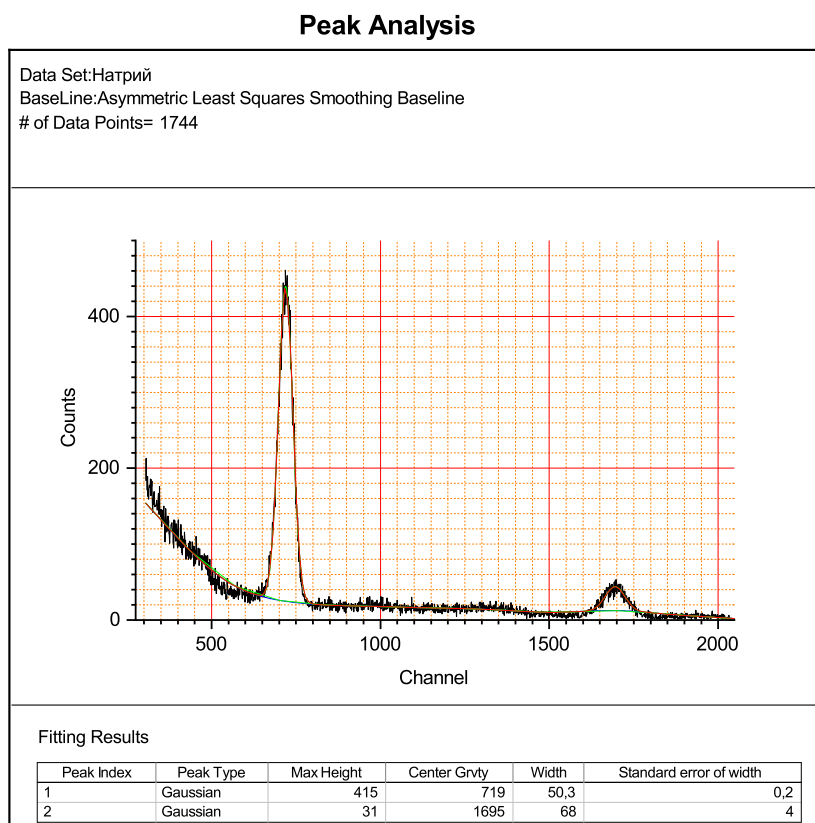
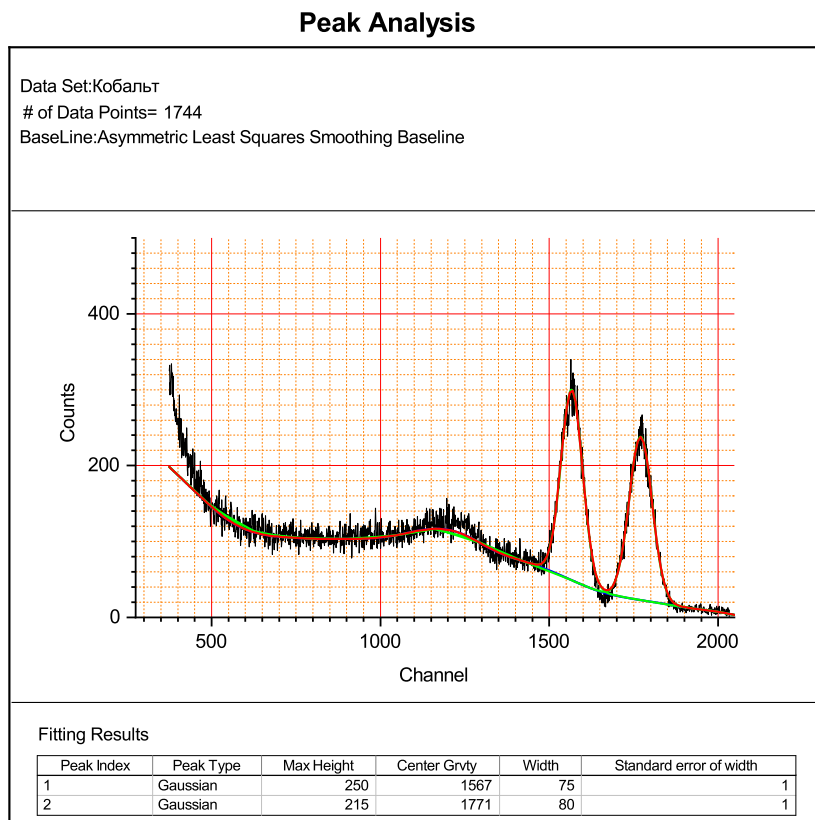
- Сцинтиллятор
- Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)
- Предусилитель импульсов
- Высоковольтный блок питания ФЭУ
- Блок АЦП
- Компьютер для сбора данных

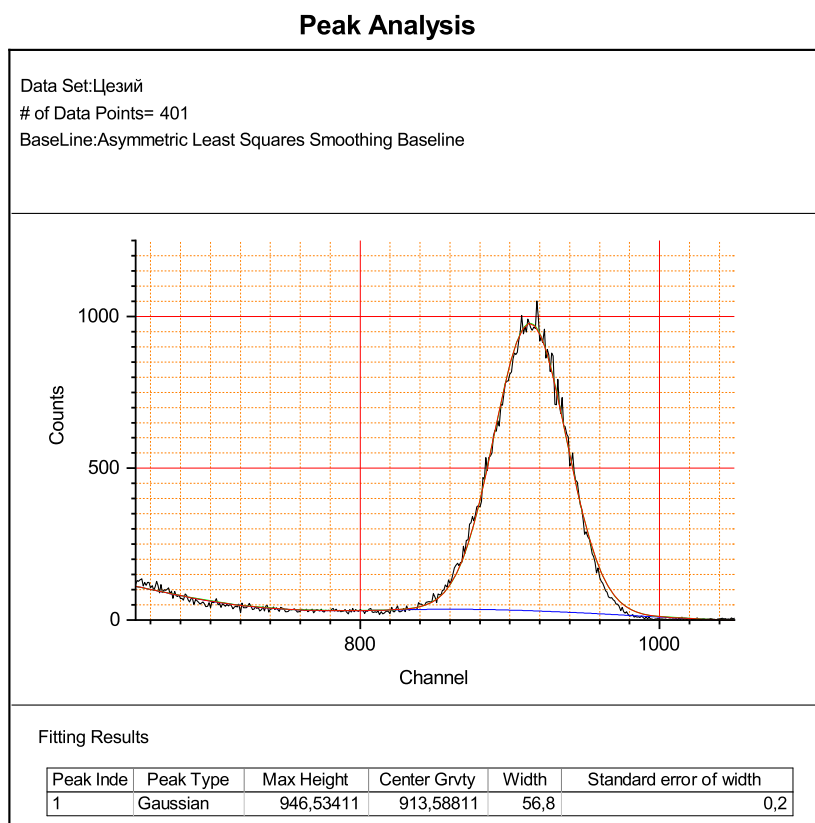
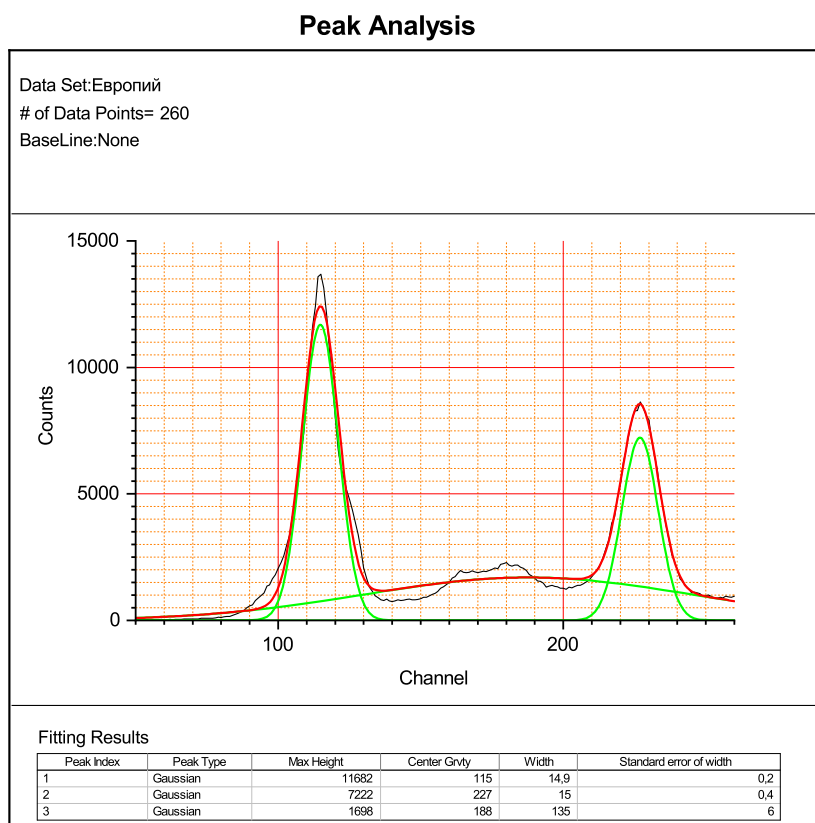
4 Результаты измерений и обработка данных

После проверки работоспособности приборов и калибровки проведём измерение фона. Соответствующий спектр отображён на рис. 18.

Также найдём и проанализируем пики полного поглощения для веществ ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{241}Am . Результаты анализа и аппроксимации пиков отображены на рис. 2-6 соответственно.

В каждом спектре определим номера каналов, отвечающие центрам пиков полного поглощения излучения от радиоактивных источников ^{22}Na и ^{137}Cs . Этим каналам присваивают соответствующие табличные значения энергий и проводят линейную аппроксимацию зависимости энергии от номера канала для данного γ -спектрометра при данной геометрии измерения и настройках γ -спектрометра. Построим калибровочный график зависимости номера канала от энергии γ -кванта на рис. 7. Из него можно получить формулу для энергии: $E_i = N_i/1286 - 0.047$ МэВ. Используя калибровочный график, определим для всех остальных источников значения энергии пиков полного поглощения E_i , их ширины на половине высоты ΔE_i и энергетическое разрешение R_i . Результаты сохраним в таблице 1.

Рис. 2: Пики полного поглощения для ^{22}Na Рис. 3: Пики полного поглощения для ^{60}Co

Рис. 4: Пики полного поглощения для ^{137}Cs Рис. 5: Пики полного поглощения для ^{152}Eu

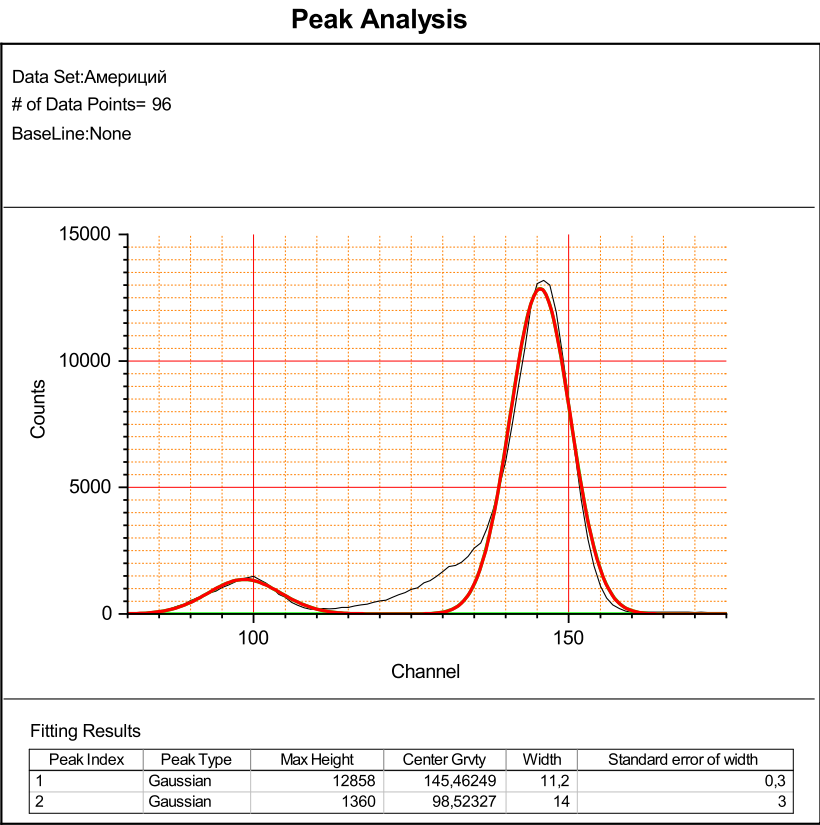


Рис. 6: Пики полного поглощения для ^{241}Am

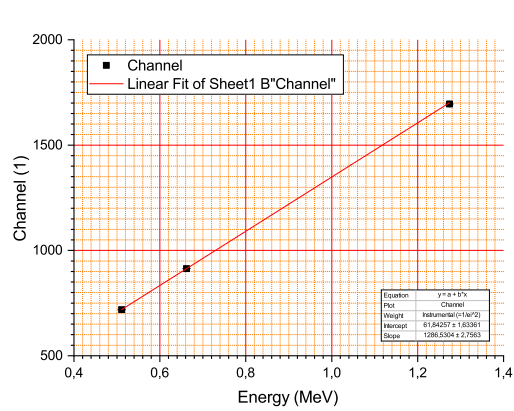


Рис. 7: Калибровочный график $N_i = a + bE_i$

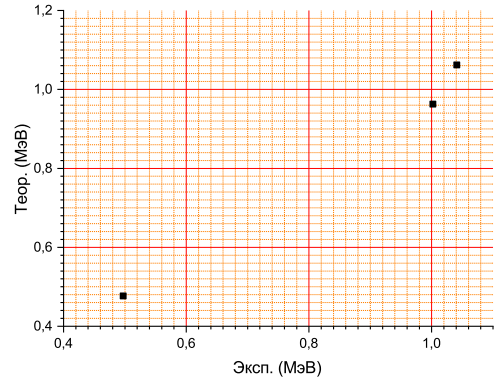
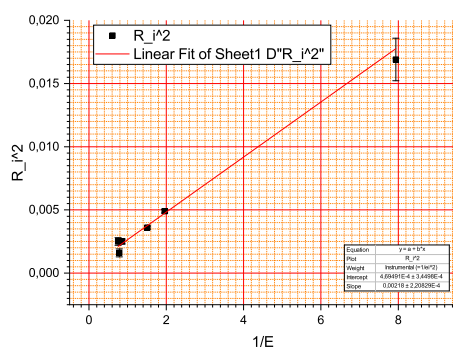
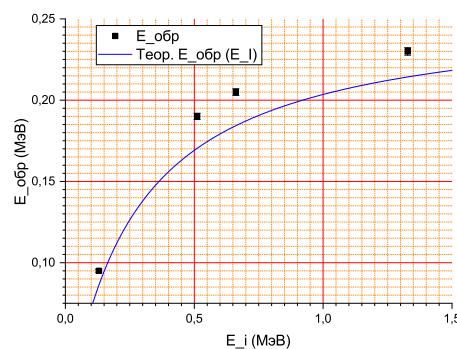


Рис. 8: Сравнение теоретических и практических значений максимальной энергии при эффекте Комптона

Рис. 9: График зависимости $R_i = f(1/E_i)$ Рис. 10: Теоретическая и экспериментальная зависимости $E_{обр} = f(E_i)$

По результатам измерения энергии края комптоновского поглощения (табл. 2) построим график 8, по одной оси которого отложим экспериментальные значения, а по другой – расчетные значения этой энергии.

	E_{max} , МэВ	
	Эксп.	Теор.
^{22}Na	1.041	1.062
^{60}Co	1.002	0.963
^{137}Cs	0.497	0.477

Таблица 2: Результаты измерения энергии края комптоновского поглощения

Для проверки зависимости (1), построим по полученным данным график 9. Значение минимальной энергии для ^{241}Am исключим из рассмотрения из-за большой погрешности.

Далее, построим график зависимости энергии пика обратного рассеяния от энергии на рис. 10.

По данным осциллографа, отображённым на рис. 11, где виден импульс от высокоэнергетической частицы, из соотношения (2) оценим величины τ_0 и RC по переднему и заднему фронтам импульса соответственно

$$\tau_0 \approx 0,8 \text{ мс},$$

$$RC \approx 2 \text{ мс}.$$

4.1 Оценка погрешностей

В данной работе крайне сложно проводить оценку погрешностей по причине характера исходных данных. В частности, не представляется возможным сделать оценку инструментальных погрешностей. Поэтому все оценки погрешностей проводились исключительно из статистических соображений, посчитаны из аппроксимации пиков и являются существенно заниженными. Погрешности косвенных измерений рассчитаны по стандартной формуле.

5 Вывод

В ходе работы после калибровки прибора были сняты спектры образцов ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{152}Eu . 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)

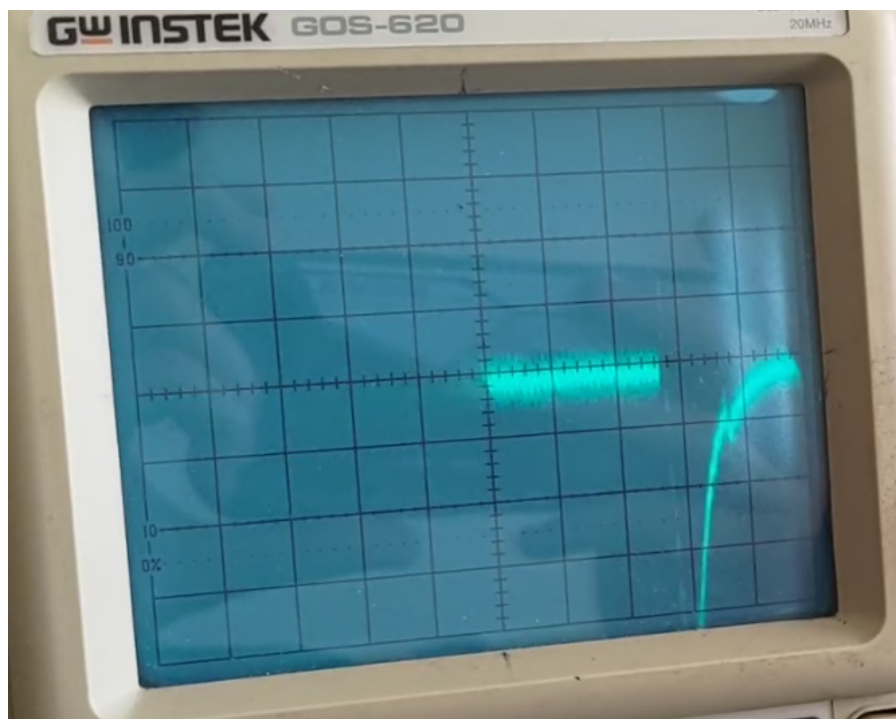


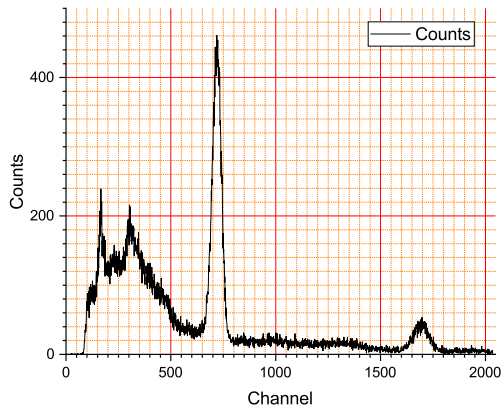
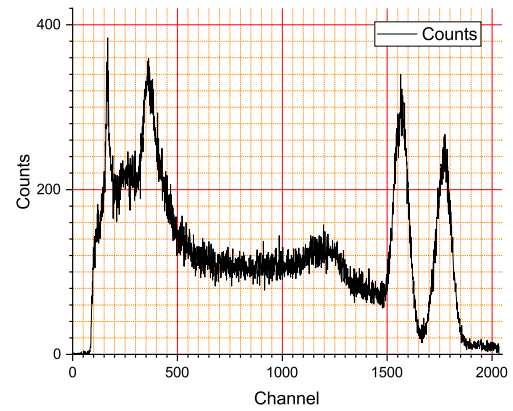
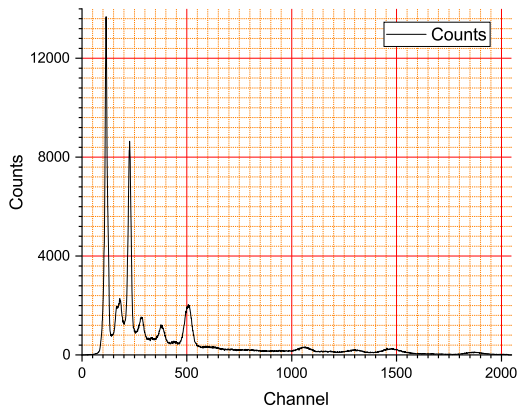
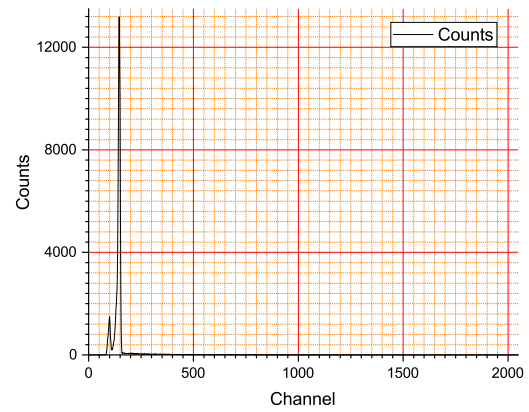
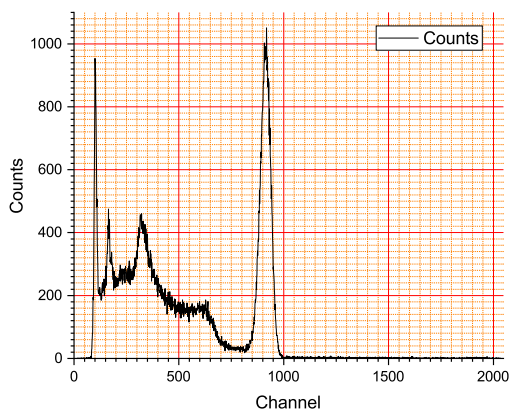
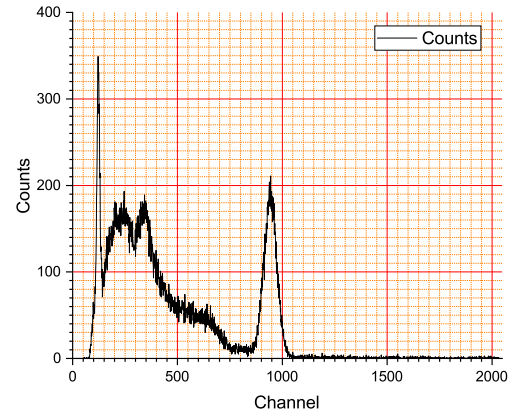
Рис. 11: Импульс от высокоэнергетической частицы на экране осциллографа

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

Проведено сравнение спектров ^{137}Cs для двух разных сцинтилляторов: на кристаллах NaI(Tl) и на органической сцинтиллирующей пластмассе. Также даны оценки характеристик экспериментальной установки – времени высвечивания сцинтиллятора, а также постоянной времени анодной цепи ФЭУ.

А Необработанные результаты опытов

Спектры, полученные по результатам проведения опытов, представлены на рис. 12-18.

Рис. 12: Спектр ^{22}Na Рис. 13: Спектр ^{60}Co Рис. 14: Спектр ^{152}Eu Рис. 15: Спектр ^{241}Am Рис. 16: Спектр ^{137}Cs Рис. 17: Спектр ^{137}Cs с другой установки

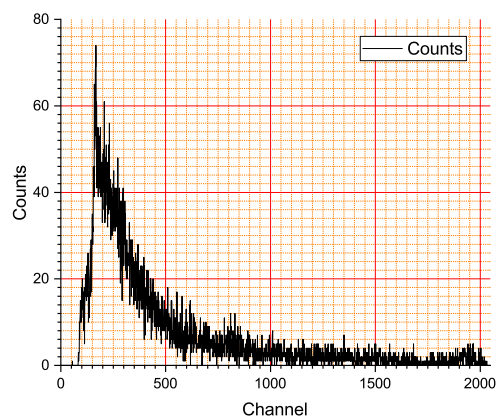


Рис. 18: Спектр, соответствующий фону

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 4 Оптика*, 2004
- [2] Кириченко Н. А. *Принципы оптики*, 2014
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Оптика: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева