
Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по курсу общей физики № 5.5.5

Компьютерная γ -спектроскопия

Автор:

Филиппенко Павел Б01-009



Долгопрудный, 2022

Цель работы

Снять и исследовать спектры излучения различных источников, характеризовать различные пики в спектрах радиоактивных веществ.

Теоретическая часть

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 существенен 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 электроном, 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 2π и равна

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

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 $0 = 2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ}$.

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 $= \gamma - E_0$, где $0 = m_e c^2 = 511$ кэВ;

в) оба родившихся гамма-кванта покидают детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии $= \gamma - 2E_0$, где $2_0 = 2m_e c^2 = 1022$ 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 $\gamma \gg mc^2/2$ 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):

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

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 среднеквадратичной флуктуации, которая равна корню из числа частиц. Таким образом, наша формула (3) примет вид

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

Обработка экспериментальных данных

Снимем данные для образцов. По полученным данным построим графики (предварительно из каждого спектра вычтем спектр шума) рис 1.

Используя известные (табличные) значения энергий пиков, соответствующих определенным каналам, найдем линейное преобразования номера канала в энергию пика рис 2.

Таким образом, линейное преобразование имеет вид

$$E = (-53.23 \pm 7.10) + (0.7469 \pm 0.006)N \text{ [кэВ]}$$

Пики натрия:

511 кэВ — канал 725

1275 кэВ — канал 1710

Пик цезия:

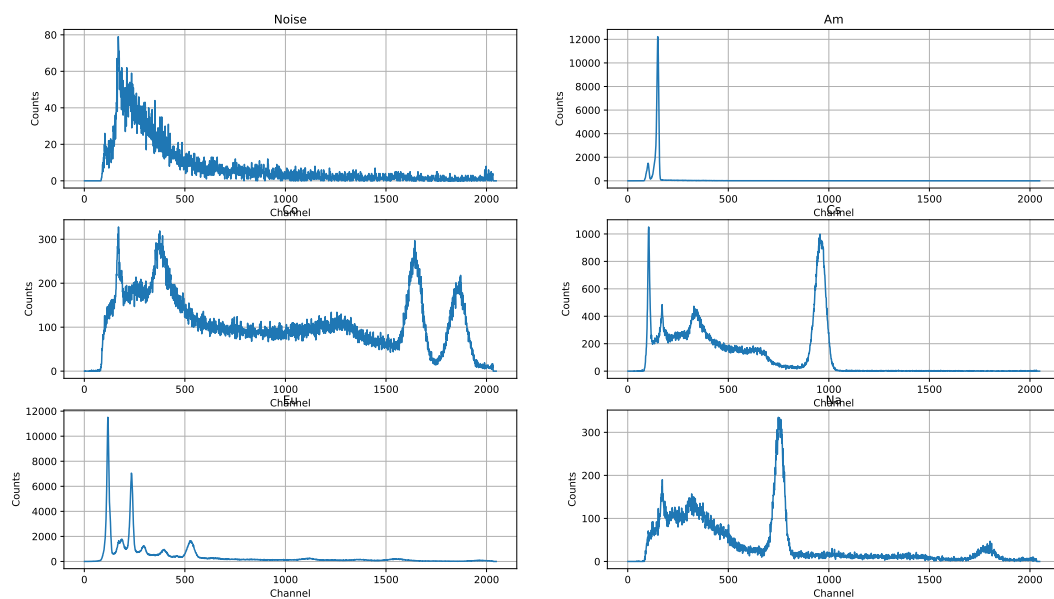


Рис. 1: Спектры для всех элементов

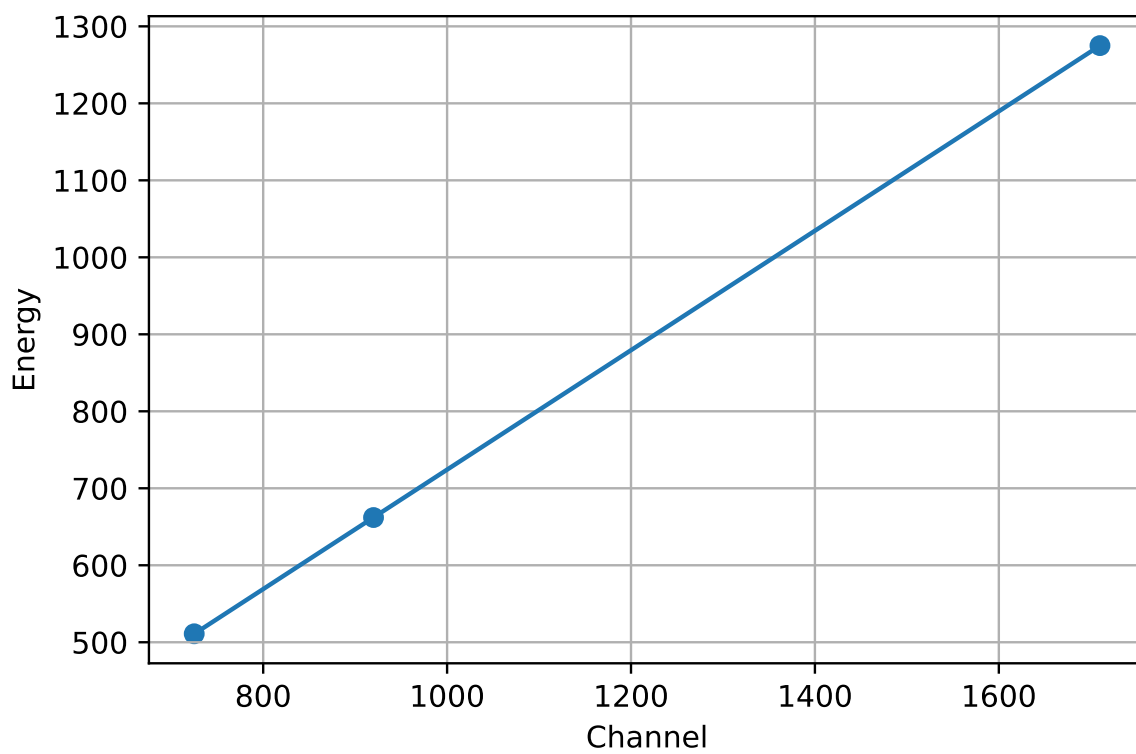


Рис. 2: График перевода номера канала в значение энергии

662 кэВ – канал 920

b

Используя полученное преобразование, найдем энергии пиков полного поглощения для всех остальных элементов ??.

Элемент	N	ΔN	E , кэВ	ΔE , кэВ	R
Na	1779	83	1281,02	62,25	0,049
Na	759	51	516,02	38,25	0,074
Co	1638	84	1175,27	63,00	0,054
Co	1856	88	1338,77	66,00	0,049
Cs	953	58	661,52	43,50	0,066
Am	149	10	58,52	7,50	0,128
Eu	524	38	339,77	28,50	0,084
Eu	394	25	242,27	18,75	0,077
Eu	294	25	167,27	18,75	0,112

Таблица 1: Энергии пиков полного поглощения

Определим энергии края комптоновского поглощения для Co, Cs и Na, и сравним с теоретическими значениями 2.

	exp	thr
Co	895	963
Cs	425	477
Na	1072	1062

Таблица 2: Край комптоновского рассеяния

Определим энергии пиков обратного рассеяния и сравним их с теоретическими 3.

	exp	thr
Co	220	214
Cs	197	184

Таблица 3: Энергии пиков обратного рассеяния

Построим график зависимости квадрата разрешения спектрометра для проверки формулы

$$R_i = \frac{\text{const}}{\sqrt{E_i}}$$

Вывод

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

- фотоэффект (пики полного поглощения)

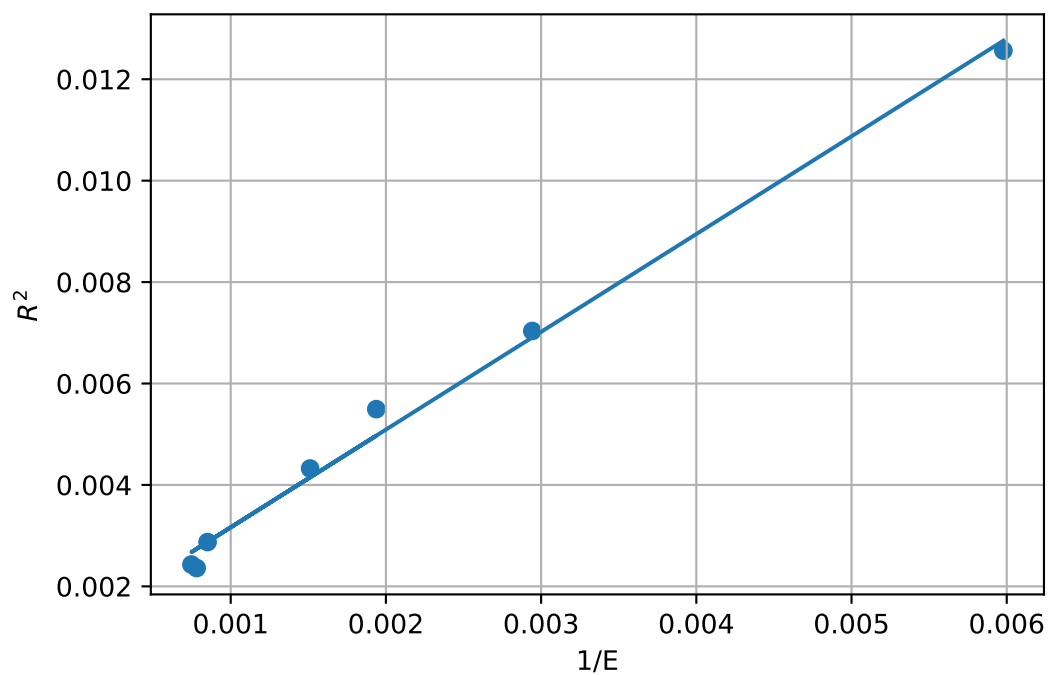


Рис. 3: Проверка формулы $R_i = \frac{\text{const}}{\sqrt{E_i}}$



Рис. 4: Спектры для всех элементов

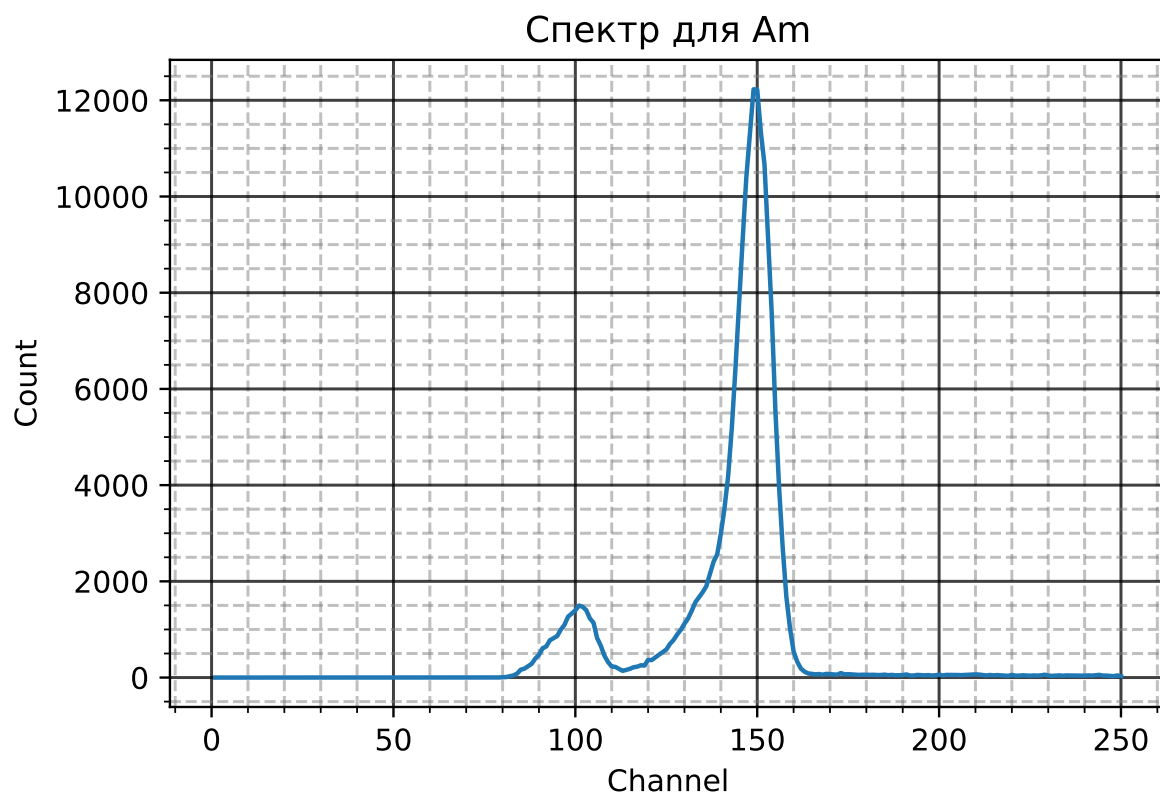


Рис. 5: Спектры для всех элементов

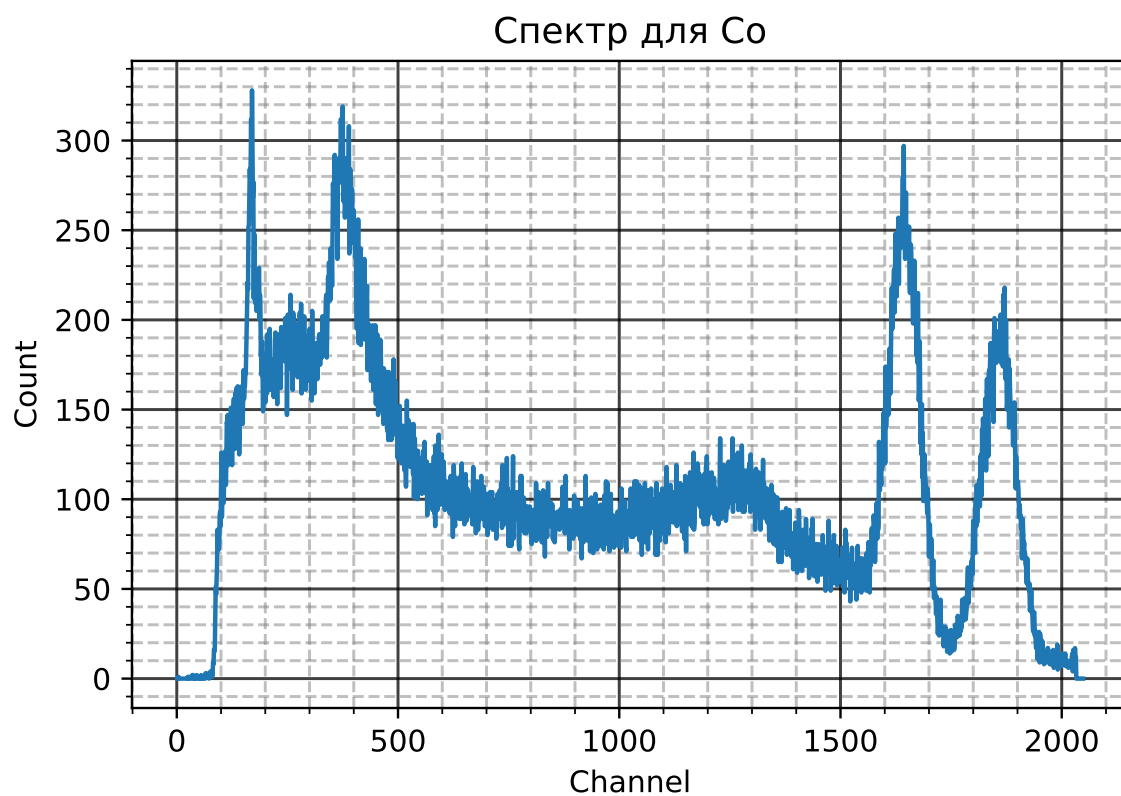


Рис. 6: Спектры для всех элементов

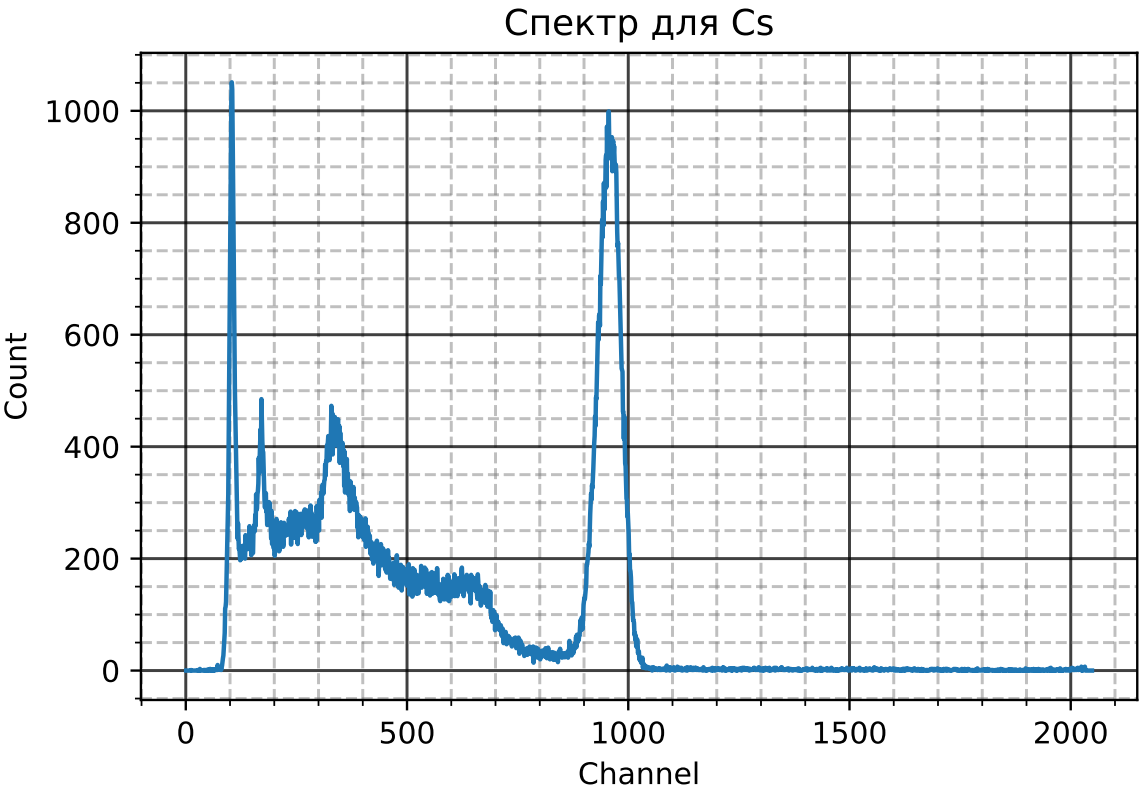


Рис. 7: Спектры для всех элементов

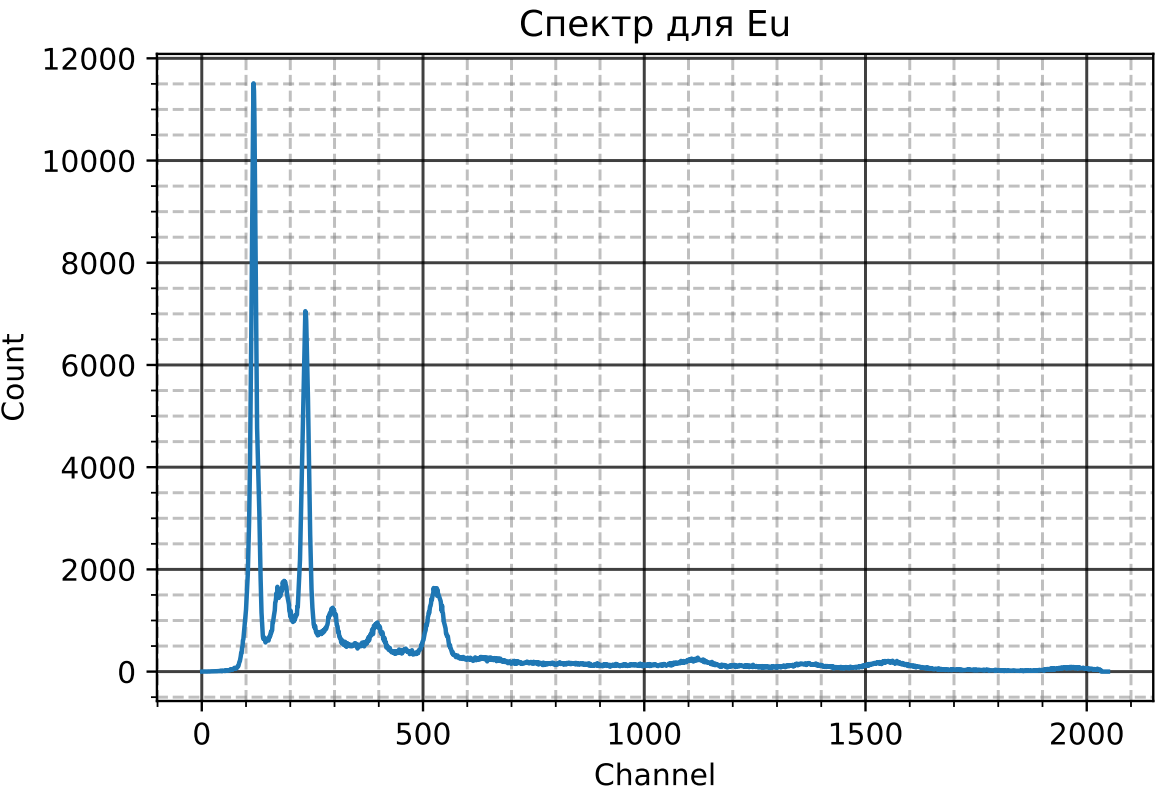


Рис. 8: Спектры для всех элементов

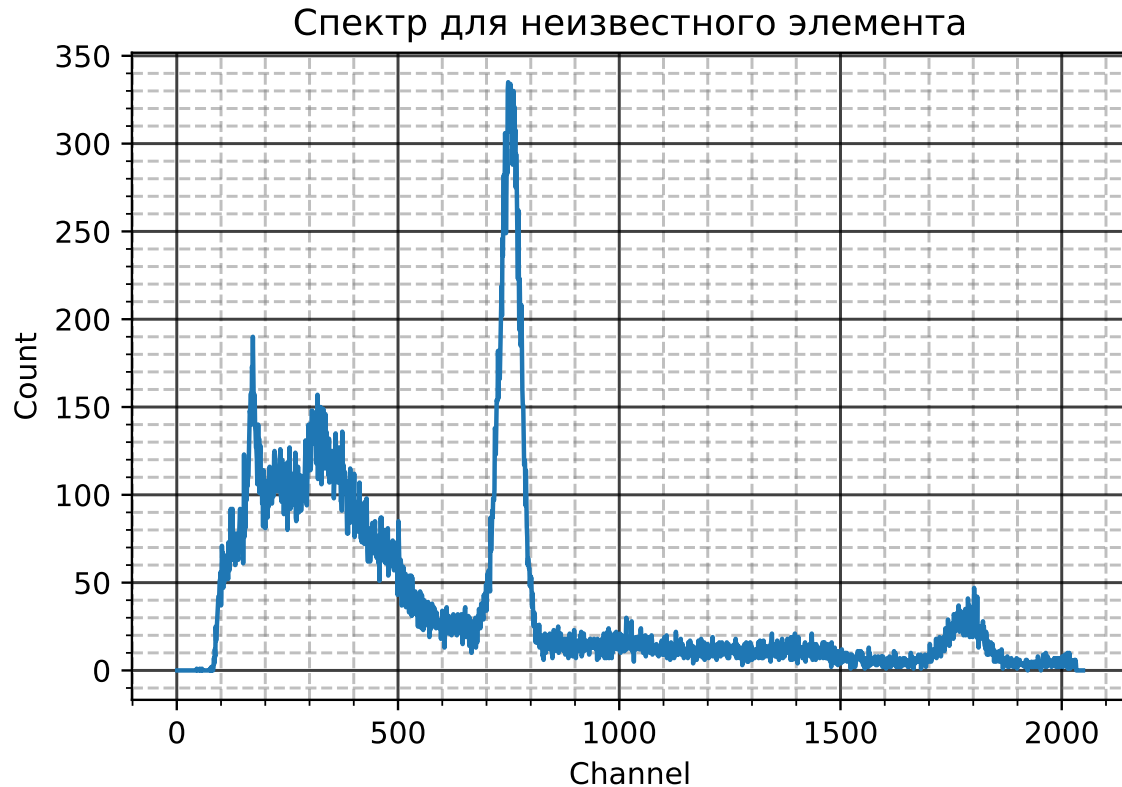


Рис. 9: Спектры для всех элементов

- 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.