ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.082.79 + 539.1.074.3 + 539.1.075

РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО СПЕКТРОМЕТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ КРИСТАЛЛА NaI(Tl) И КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ

©2027 г. И. С. Александров, А. И. Баясхаланова*, Д. Е. Калашников, А. В. Хромов

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

**E-mail: AIBayaskhalanova@mephi.ru*

Поступила в редакцию 17.06.2026

После доработки 12.10.2026

Принята к публикации 27.10.2026

Представлены результаты разработки компактного учебного спектрометра гамма-излучения, предназначенного для использования в образовательном процессе, например, при выполнении лабораторных работ и демонстрации экспериментов по ядерной физике. В основе прибора лежит сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) в сочетании с кремниевым фотоумножителем (SiPM), что позволяет уменьшить габариты и упростить эксплуатацию спектрометрического комплекса. Описаны конструкция прибора, архитектура электронной системы, программное обеспечение и методика обработки спектров. Приведены экспериментальные спектры радионуклидных источников Am-241, Ba-133, Cs-137, Eu-152 и Na-22. Показано, что разработанный спектрометр обеспечивает регистрацию характерных фотопиков, позволяет выполнять энергетическую калибровку и оценку энергетического разрешения в учебном эксперименте.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, учебный спектрометр, сцинтилляционный детектор, NaI(Tl), кремниевый фотоумножитель (SiPM), регистрация гамма-излучения, энергетическое разрешение, энергетическая калибровка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное образование в области ядерной физики требует широкого знакомства обучающихся с метододикой эксперимента, включающей в себя принципы регистрации излучения и анализа получаемых данных. Наиболее привлекательной с этой точки зрения является спектрометрия ионизирующего излучения: в ней органично пересекаются применение детекторов различного типа и ядерной электроники (формирователей, усилительных каскадов, АЦП), проектирование экспериментальной установки (в том числе

анализ используемых источников излучения и требуемых режимов работы аппаратуры) и, наконец, обработка массивов цифровых данных [1–3].

Промышленные приборы, предназначенные для проведения спектрометрических измерений, как правило, ориентированы на научные и прикладные задачи и не предназначены для массового использования в школах и высших учебных заведениях. Это ограничено их высокой стоимостью, сложностью эксплуатации и требованиями к инфраструктуре. В связи с этим встает актуальная задача проектирования специализированных учебных приборов, сочетающих достаточную точность измерений с простотой эксплуатации.

2. ПРЕДПОСЫЛКИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрим ключевые технологические решения, принятые в процессе проектирования рассматриваемого спектрометра.

2.1. Вид и характер излучения

Гамма-излучение радионуклидов имеет дискретный энергетический спектр, поэтому набор зарегистрированных фотопиков может служить характерным признаком источника [1, 4]. Это делает гамма-спектрометрию удобной для лабораторных работ по идентификации радионуклидов и энергетической калибровке, при этом возможна регистрация излучения источников ниже минимально значимой активности, а эксперимент может быть выполнен за разумное учебное время.

2.2. Тип детектора излучения

Для разрабатываемого учебного гамма-спектрометра был выбран сцинтилляционный детектор. Такой тип детектора хорошо подходит для регистрации гамма-излучения, поскольку он обеспечивает достаточную эффективность регистрации, позволяет получать амплитудные спектры и выделять характерные фотопики радионуклидов. В отличие от полупроводниковых спектрометров высокого разрешения, сцинтилляционные детекторы проще в эксплуатации, не требуют сложной системы охлаждения и могут быть реализованы в виде компактного и относительно недорогого прибора [1, 5]. При этом их энергетического разрешения достаточно для выполнения учебных задач: регистрации спектров, энергетической калибровки, идентификации радионуклидов и оценки разрешающей способности.

Выбор конкретного сцинтиллятора определялся его световыходом, плотностью, доступностью и стоимостью. Сравнение наиболее распространенных кристаллических сцинтилляторов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительная таблица кристаллических сцинтилляторов

Сцинтиллятор	*L*, фотон/кэВ	ρ, г/см^3	Гигроскопичность	Стоимость (по отношению к NaI)
NaI(Tl)	38–40	3.67	Да	1x
$LaBr_3$(Ce)	63	5.08	Да	~10x
BGO	8-9	7.13	Нет	~4x

Примечание: L – световыход, ρ – плотность сцинтиллятора.

На основе приведенного сравнения видим, что наиболее подходящим кандидатом является сцинтилляционный кристалл NaI(Tl).

2.3. Выбор фотоприемников

Для регистрации сцинтилляционного света использован кремниевый фотоумножитель SiPM, представляющий собой матрицу лавинных фотодиодов, работающих в гейгеровском режиме. По сравнению с вакуумными фотоэлектронными умножителями SiPM имеет меньшие габариты, механически более устойчив, требует меньшего напряжения питания и удобен для интеграции в компактный прибор. Эти свойства особенно важны для учебного оборудования, которое должно быть простым в подключении и устойчивым к частой эксплуатации.

3. ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСА

3.1. Конструкция спектрометра

В основе разработанного спектрометра лежит сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) размером 25×25 мм^2, преобразующий энергию гамма-квантов в световые импульсы. Для регистрации сцинтилляционного излучения применяется кремниевый фотоумножитель (SiPM) производства компании Sensl с активной областью 6×6 мм^2. Все элементы системы помещены в эргономичный изолированный от внешнего света металлический корпус (рис. 1).

Рис. 1. Внешний вид разработанного учебного спектрометра гамма-излучения

3.2. Электронная система

Электронная система спектрометра (рис. 2) включает:

– аналоговый тракт (усилитель сигнала),

– компаратор для установки порога регистрации,

– аналого-цифровой преобразователь (АЦП),

– управляющее ядро на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

Рис. 2. Структурная схема электронной системы спектрометра

Аналоговый тракт обеспечивает согласование сигнала с SiPM и его усиление до уровня, необходимого для корректной оцифровки. Компаратор используется для подавления шумовых событий за счет установки порогового уровня. Оцифрованные сигналы поступают в ПЛИС, где реализуются алгоритмы (регистрации импульсов, определения амплитуды сигнала, формирования гистограммы распределения событий по каналам). Число каналов спектрометра составляет 1024, что обеспечивает достаточную дискретизацию энергетического спектра в диапазоне от 20 кэВ до 1.5 МэВ. Максимальная статистическая загрузка системы достигает 10^5событий в секунду, что позволяет проводить измерения с высокой скоростью накопления статистики.

3.3. Программное обеспечение

Для управления спектрометром и визуализации результатов разработано специализированное программное обеспечение (рис. 3). Программа обеспечивает отображение спектра в режиме реального времени, управление параметрами регистрации (усиление каскада, порог компаратора), настройку времени экспозиции и экспорт данных для последующей обработки. Интерфейс программного обеспечения ориентирован на использование в образовательной среде и не требует специальной подготовки пользователя. Передача данных осуществляется через интерфейс USB 2.0, что обеспечивает совместимость с широким спектром персональных компьютеров.

Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения для управления спектрометром, визуализации спектра и экспорта экспериментальных данных

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки работоспособности спектрометра были измерены спектры радионуклидных источников Am-241, Ba-133, Cs-137, Eu-152 и Na-22 (рис. 4). Измерения проводились при значениях усиления и порога регистрации, подобранных для соответствующего источника и исследуемого энергетического диапазона. В связи с этим абсолютные значения интенсивности и форма фоновой составляющей на различных спектрах не сопоставлялись напрямую. Полученные данные использовались прежде всего для демонстрации возможности регистрации характерных гамма-линий и оценки энергетического разрешения спектрометра.

Рис. 4. Спектры радионуклидных источников, зарегистрированные разработанным спектрометром

Обработка спектров включала сглаживание экспериментального распределения, поиск локальных максимумов, сопоставление зарегистрированных пиков с известными энергиями гамма-линий [6, 7] и определение полной ширины пика на половине высоты [4].

Относительное энергетическое разрешение рассчитывалось по формуле [1, 4]

$$R = \frac{\mathrm{FWHM}}{E} \bullet 100\%, \qquad (1)$$

где E — энергия фотопика, FWHM — полная ширина пика на половине высоты.

Результаты оценки энергетического разрешения по выбранным пикам приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оценки энергетического разрешения

Источник	Энергия линии, кэВ	FWHM, кэВ	R
Am-241	59.5409	22.02	36.4%
Ba-133	30.973	13.69	42.7%
Ba-133	80.9979	18.01	22.2%
Ba-133	356.0129	63.49	17.8%
Cs-137	661.657	67.18	10.19%
Eu-152	40.1186	15.86	39.5%
Eu-152	121.7817	20.19	22.3%
Eu-152	244.6974	30.38	12.9%
Na-22	511.0	86.32	16.9%
Na-22	1274.537	97.64	7.7%

Наиболее репрезентативной характеристикой для сравнения со сцинтилляционными спектрометрами NaI(Tl) является разрешение по линии 661.7 кэВ источника Cs-137. В проведенном измерении оно составило около 10.2%, что соответствует уровню, достаточному для учебной идентификации радионуклидов и демонстрации основных принципов гамма-спектрометрии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В НИЯУ МИФИ разработан компактный учебный спектрометр гамма-излучения на основе сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) и кремниевого фотоумножителя. Данный прибор обеспечивает основные функциональные возможности, необходимые для проведения учебных лабораторных работ по ядерной физике: регистрацию гамма-спектров,

идентификацию радионуклидов, определение энергетического разрешения, исследование процессов взаимодействия излучения с веществом.

По сравнению с промышленными спектрометрами прибор имеет более низкое энергетическое разрешение, что обусловлено использованием компактного сцинтилляционного кристалла и SiPM. Экспериментальные исследования с источниками Am-241, Ba-133, Cs-137, Eu-152 и Na-22 показали, что спектрометр регистрирует характерные особенности спектров в диапазоне от низких энергий до энергий порядка 1.3 МэВ. Для линии 661.7 кэВ источника Cs-137 получено относительное энергетическое разрешение около 10.2%. Данное значение является достаточным для учебных лабораторных работ, направленных на изучение принципов сцинтилляционной регистрации и гамма-спектрометрии.

Разработанный спектрометр может быть использован в школах, университетах и центрах популяризации науки для обучения основам ядерной физики и методов радиационных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knoll G.F.* Radiation Detection and Measurement. Hoboken: Wiley, 2010.
2. *Leo W.R.* Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Berlin: Springer, 1994.
3. Экспериментальные методы ядерной физики. Комплекс лабораторных работ: учебное пособие. Под ред. А.И. Болоздыни. Москва: НИЯУ МИФИ, 2023.
4. *Будыка А.К.* Спектрометрия ионизирующих излучений. Гамма-спектрометрия: учебное пособие для вузов. Москва: НИЯУ МИФИ, 2021.
5. *Болоздыня А.И., Ободовский И.М.* Детекторы ионизирующих частиц и излучений. Принципы и применения: учебное пособие. Долгопрудный: Интеллект, 2012.
6. National Nuclear Data Center. Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF). Brookhaven National Laboratory, USA.
7. *Bé M.-M. et al.* Table of Radionuclides. Monographie BIPM-5. Vol. 1–8. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures, 2004–2016.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Внешний вид разработанного учебного спектрометра гамма-излучения на основе сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) и кремниевого фотоумножителя

Рис. 2. Структурная схема электронной системы спектрометра: аналоговый тракт, компаратор, аналого-цифровой преобразователь и блок цифровой обработки на основе ПЛИС

Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения для управления спектрометром, визуализации спектра и экспорта экспериментальных данных

Рис. 4. Спектры радионуклидных источников, зарегистрированные разработанным спектрометром: **а** – Am-241, **б** – Ba-133, **в** – Cs-137, **г** – Eu-152, **д** – Na-22. Красными маркерами отмечены положения анализируемых фотопиков, пунктирными линиями – значения ширины пиков на половине высоты

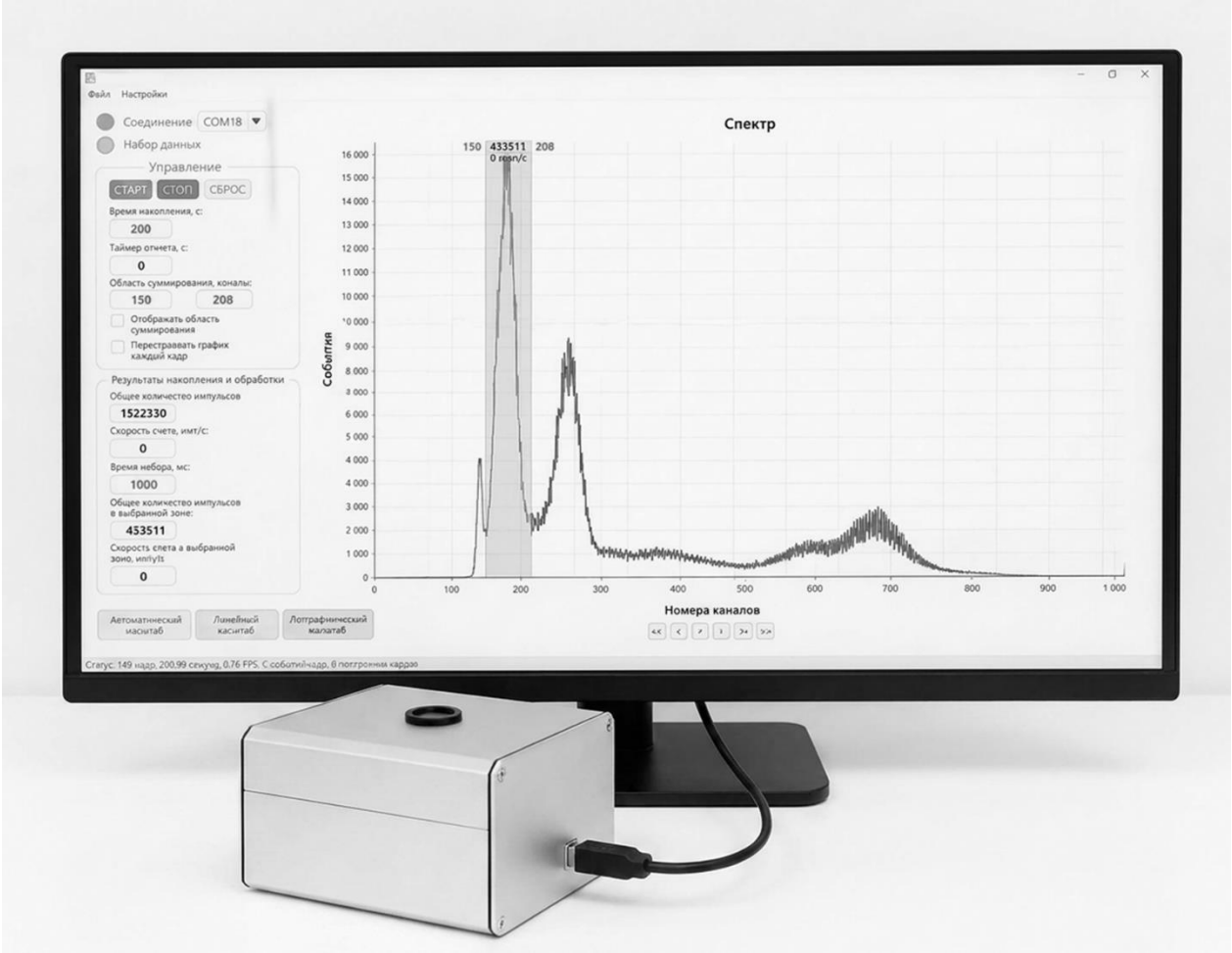

Файл
Настройки
Соединение
COM18
Набор данных
Управление
СТАРТ
СТОП
СБРОС
Время накопления, с:
200
Таймер отчета, с:
0
Область суммирования, каналы:
150
208
Отображать область суммирования
Перестраивать график каждый кадр
Результаты накопления и обработки
Общее количество импульсов
1522330
Скорость счета, имп/с:
0
Время набора, мс:
1000
Общее количество импульсов в выбранной зоне:
453511
Скорость счета в выбранной зоне, имп/с
0
Спектр
150 433511 208
0 имп/с
События
Номера каналов
Автоматический масштаб
Линейный масштаб
Логарифмический масштаб

Рис. 1.

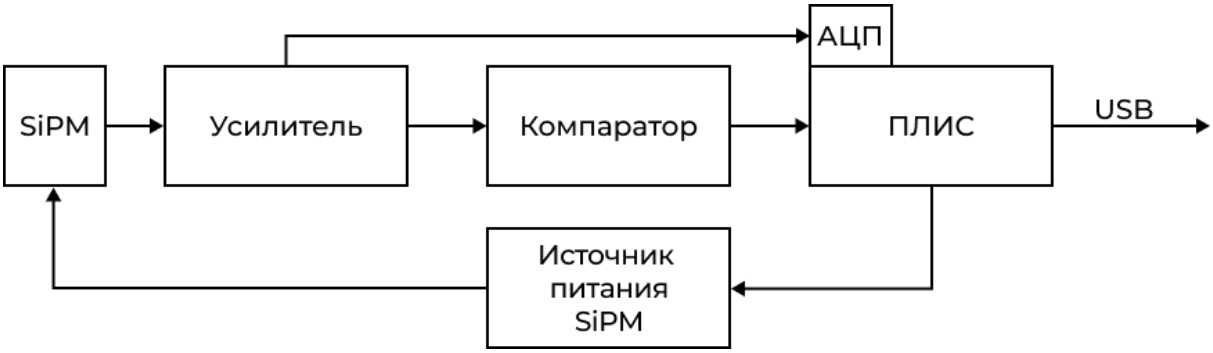

АЦП
SiPM
Усилитель
Компаратор
ПЛИС
USB
Источник
питания
SiPM

Рис. 2.

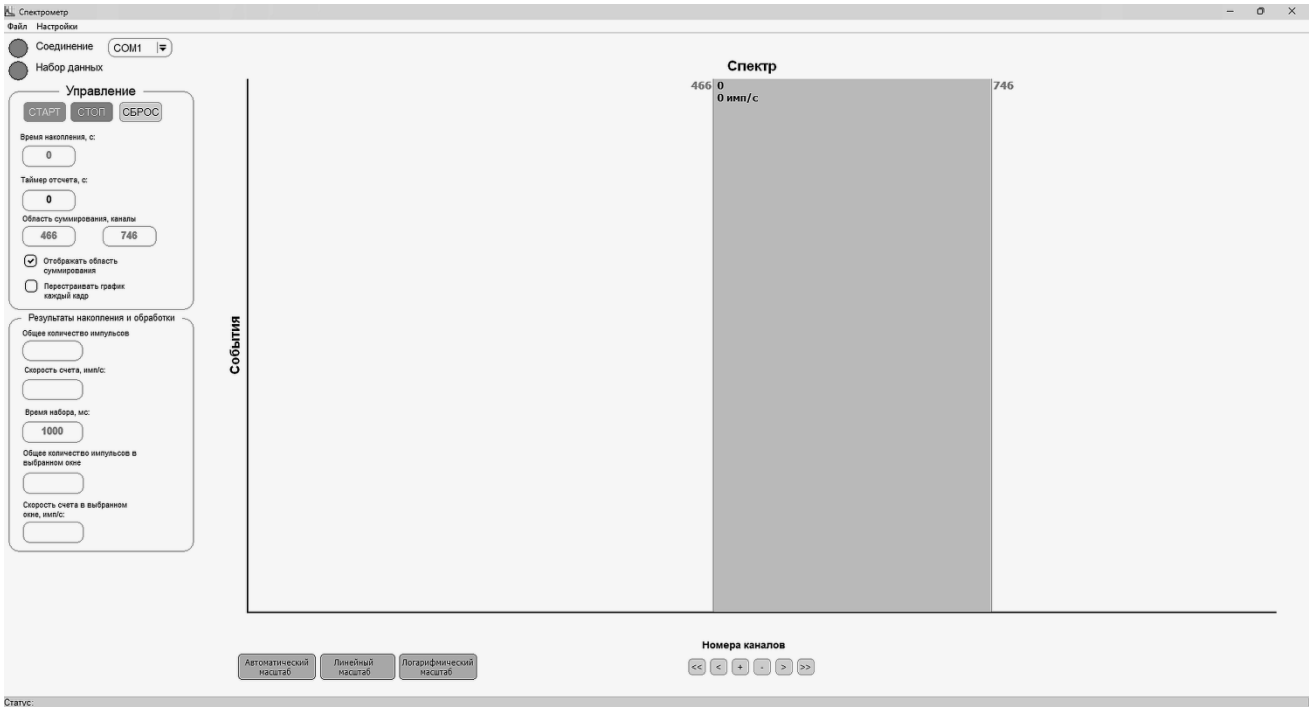
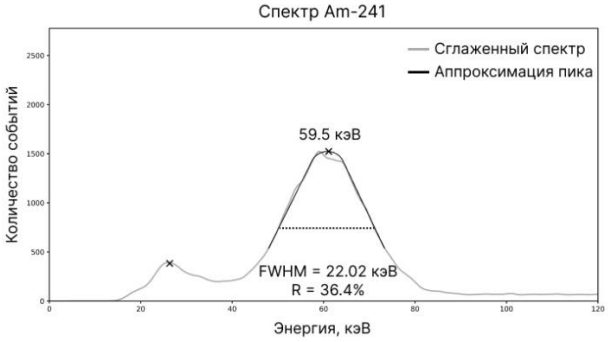
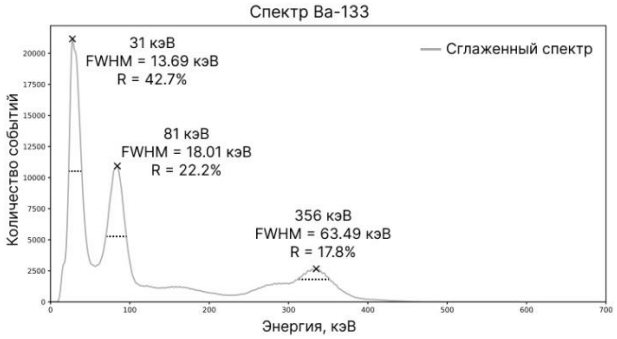

Спектрометр
Файл Настройки
Соединение
COM1
Набор данных
Управление
СТАРТ
СТОП
СБРОС
Время накопления, с:
0
Таймер отсчета, с:
0
Область суммирования, каналы
466
746
Отображать область суммирования
Перестраивать график каждый кадр
Результаты накопления и обработки
Общее количество импульсов
Скорость счета, имп/с:
Время набора, мс:
1000
Общее количество импульсов в выбранном окне
Скорость счета в выбранном окне, имп/с:
Спектр
466
0
0 имп/с
746
События
Номера каналов
Автоматический масштаб
Линейный масштаб
Логарифмический масштаб
<< < + - > >>
Статус:

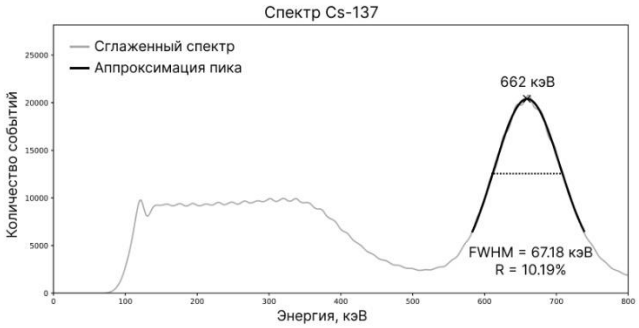
Рис. 3.


Спектр Am-241
Сглаженный спектр
Аппроксимация пика
59.5 кэВ
FWHM = 22.02 кэВ
R = 36.4%
Количество событий
Энергия, кэВ

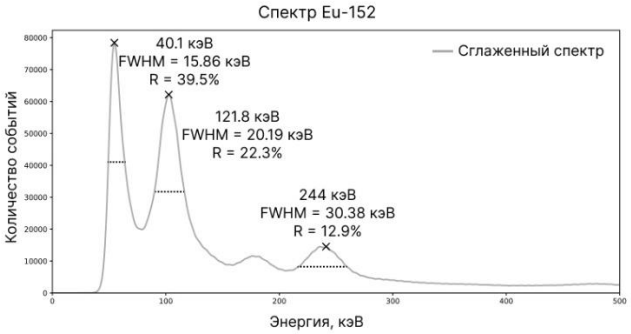
(а)


Спектр Ba-133
Сглаженный спектр
31 кэВ
FWHM = 13.69 кэВ
R = 42.7%
81 кэВ
FWHM = 18.01 кэВ
R = 22.2%
356 кэВ
FWHM = 63.49 кэВ
R = 17.8%
Количество событий
Энергия, кэВ

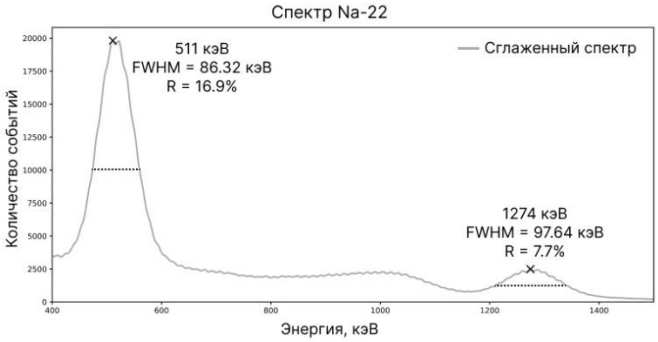
(б)


Спектр Cs-137
Сглаженный спектр
Аппроксимация пика
662 кэВ
FWHM = 67.18 кэВ
R = 10.19%
Количество событий
Энергия, кэВ

(в)


Спектр Eu-152
Сглаженный спектр
40.1 кэВ
FWHM = 15.86 кэВ
R = 39.5%
121.8 кэВ
FWHM = 20.19 кэВ
R = 22.3%
244 кэВ
FWHM = 30.38 кэВ
R = 12.9%
Количество событий
Энергия, кэВ

(г)


Спектр Na-22
Сглаженный спектр
511 кэВ
FWHM = 86.32 кэВ
R = 16.9%
1274 кэВ
FWHM = 97.64 кэВ
R = 7.7%
Количество событий
Энергия, кэВ

(д)

Рис. 4.