

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий
Кафедра №40 (Физика элементарных частиц)

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

«Измерение естественной радиоактивности материалов на германиевом
детекторе»

Студентка: гр. Б23-102

_____ Карпова Е.В.
(дата, подпись)

Научный руководитель:

_____ Мачулин И.Н.
(дата, подпись)

Москва — 2026

РЕФЕРАТ

Отчет 18 с., 9 рис., 8 табл., 5 источник.

ГЕРМАНИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР, КАЛИБРОВКА, ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ, ИЗОТОПНЫЙ АНАЛИЗ, СПЕКТРОМЕТРИЯ, АКТИВНОСТЬ ОБРАЗЦОВ, МЕТОД ФЕЛЬДМАНА-КУЗИНА, СТЕКЛО ФЭУ, ПЛАСТИК, ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТ, ОКСИД ТИТАНА

Объектом исследования является естественная радиоактивность различных материалов.

Цель работы — измерение удельной активности естественных радионуклидов в материалах, изучение их изотопного состава и сравнение полученных значений с установленными нормами радиационной безопасности.

В процессе работы проводились измерения гамма-спектров образцов на германиевом детекторе GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System. Обработка спектров включала идентификацию энергетических пиков, вычитание фона, расчёт чистого сигнала с использованием метода Фельдмана-Кузина для корректной оценки статистических ошибок при малых значениях сигнала.

В результате исследования определена удельная активность каждого исследованного образца, идентифицированы изотопы цепочек Th-232, U-238, U-235, а также K-40 и Cs-137.

Область применения результатов: экспериментальная ядерная физика, низкофоновые эксперименты, производство и контроль качества фотоэлектронных умножителей, спектрометрия гамма-излучения.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Теоретическая часть	6
1.1 Германиевые детекторы	6
1.1.1 Принцип работы HPGe-детекторов	6
1.1.2 Германиевый детектор GMX Series GAMMA-X	
HPGe Coaxial Photon Detector System	6
1.2 Исследование естественной радиоактивности материалов	8
1.2.1 Цели и задачи исследования	8
1.2.2 Метод Фельдмана-Кузина	8
2 Экспериментальная часть	10
2.1 Исследование образца пластика	10
2.2 Исследование образца термоэластопласта TPE-S (пена)	12
2.3 Исследование образца стекла ФЭУ-49	15
2.4 Исследование образца металлического динода ФЭУ-49	18
Заключение	21
Список использованных источников	23

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем отчёте о НИР использованы ссылки на следующие стандарты.

ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка.

ГОСТ 7.1-2003 Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 7.32-2017 Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обозначения единства измерений (ГСИ). Единицы величин.

СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная ядерная физика — фундаментальный раздел современной физики, изучающий свойства и взаимодействия атомных ядер и элементарных частиц. Одним из ключевых инструментов в этой области являются германиевые детекторы на основе гиперчистого германия (HPGe), обеспечивающие высокое энергетическое разрешение при регистрации гамма-излучения.

В низкофоновых экспериментах крайне важно использовать материалы с минимальным содержанием естественных радиоактивных изотопов, так как собственный фон детектора и окружающих конструкций может маскировать редкие события. Поэтому измерение радиоактивности материалов, применяемых при создании детекторов и их компонентов, является необходимым этапом подготовки эксперимента.

В данной работе исследовались материалы, входящие в состав фотоэлектронного умножителя ФЭУ-49, а также термоэластопласт (пена) эксперимента iDream.

Цель работы — измерение удельной активности естественных радионуклидов в указанных материалах, идентификация присутствующих изотопов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести теоретический анализ принципов работы германиевых детекторов и их применения в низкофоновых экспериментах.
2. Выполнить энергетическую калибровку германиевого детектора GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System с использованием набора радиоактивных источников.
3. Провести гамма-спектрометрические измерения исследуемых образцов.
4. Обработать полученные спектры с вычитанием фона контейнера и помещения.
5. Используя метод Фельдмана-Кузина, рассчитать чистый сигнал и его асимметричные статистические ошибки для каждого идентифицированного пика.
6. Определить активность и удельную активность каждого образца, идентифицировать присутствующие радиоактивные изотопы.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Германиевые детекторы

1.1.1 Принцип работы HPGe-детекторов

Германиевые детекторы на основе гиперчистого германия (HPGe) работают по принципу полупроводникового детектора. При попадании гамма-кванта в объём германия происходит фотоэффект, комптоновское рассеяние или образование электрон-позитронных пар, в зависимости от энергии фотона. Образовавшиеся электронно-дырочные пары разделяются электрическим полем, создаваемым приложенным высоким напряжением (2000-4000 В).

Основные преимущества HPGe-детекторов:

- Высокое энергетическое разрешение (в 30-50 раз лучше, чем у детекторов на основе NaI(Tl))
- Хорошая линейность отклика в широком диапазоне энергий (50 кэВ – 10 МэВ)
- Возможность работы при криогенных температурах (77-90 К)

1.1.2 Германиевый детектор GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System

В данной работе использовался германиевый детектор серии GMX GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System. Данная система представляет собой спектрометрический комплекс для регистрации гамма-излучения с высоким энергетическим разрешением.

Основные характеристики системы:

- Тип детектора: HPGe (высокоочищенный германий)
- Энергетический диапазон: от 3 кэВ до 10 МэВ
- Рабочее напряжение: 3000-4000 В

Принцип работы системы. Работа детекторной системы GMX GAMMA-X основана на следующих физических процессах:

Поглощение гамма-квантов. Гамма-квант, проникая в кристалл гиперчистого германия, взаимодействует с веществом посредством одного из трёх основных процессов:

- Фотоэффект: полное поглощение гамма-кванта с передачей всей энергии электрону (доминирует при энергиях ниже 200 кэВ)
- Комптоновское рассеяние: рассеяние гамма-кванта на свободном электроны с передачей части энергии

- Образование пар: рождение электрон-позитронной пары (энергетический порог 1.022 МэВ)

Система охлаждения. Для работы HPGe-детектора необходима криогенная температура (77-90 К) по следующим причинам:

- Снижение тепловых шумов, обусловленных тепловой генерацией носителей заряда
- Увеличение времени жизни носителей заряда
- Улучшение энергетического разрешения

1.2 Исследование естественной радиоактивности материалов

1.2.1 Цели и задачи исследования

Естественная радиоактивность материалов обусловлена присутствием в них природных радионуклидов, в первую очередь изотопов урана (U-238), тория (Th-232) и калия-40 (K-40). Эти изотопы входят в состав различных минералов и могут накапливаться в материалах в процессе их производства.

В данной работе исследовались следующие материалы:

- Стекло фотоэлектронного умножителя ФЭУ-49
- Металлический динод ФЭУ-49
- Пластик (полистирол)
- Термоэластопласт ТРЕ-S (пена)

Основными задачами исследования являлись:

1. Проведение гамма-спектрометрических измерений каждого образца на германиевом детекторе.
2. Идентификация гамма-линий, соответствующих различным радиоактивным изотопам.
3. Расчёт чистого сигнала (с вычетом фона контейнера и помещения) с использованием метода Фельдмана-Кузина.
4. Определение активности и удельной активности каждого образца.

1.2.2 Метод Фельдмана-Кузина

При обработке гамма-спектров, особенно в области малых значений сигнала, возникает проблема корректной оценки статистических ошибок. Классический подход, основанный на предположении о нормальном распределении ошибок, неприменим для случаев, когда количество отсчётов в пике сравнимо с уровнем фона или незначительно превышает его.

Метод Фельдмана-Кузина (Feldman-Cousins) позволяет построить доверительные интервалы для сигнала при наличии фона, сохраняя корректное покрытие вероятности. Основные особенности метода:

- Метод не требует предположения о нормальности распределения.
- Использует отношение правдоподобия для ранжирования возможных значений сигнала.

- Даёт асимметричные доверительные интервалы, что особенно важно при малых сигналах.

В данной работе метод Фельдмана-Кузина применялся для расчёта чистого сигнала по формуле:

$$S = \max(0, N_{\text{peak}} - N_{\text{bg}})$$

где N_{peak} — сумма отсчётов в области пика (эффект + фон), N_{bg} — сумма отсчётов в области фона (с учётом масштабирования по времени). Доверительные интервалы для сигнала рассчитывались с уровнем достоверности 68%, что соответствует одному стандартному отклонению в гауссовом приближении.

Преимущество метода Фельдмана-Кузина особенно ярко проявляется при анализе слабых пиков, когда отношение сигнал/фон мало.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Исследование образца пластика

Образец пластика представляет собой полистирол (Polystyrene) размерами 50×50×50 мм. Масса образца составляет 133.3 г. Время измерения гамма-спектра — 10000 секунд. Вычитание фона производилось с использованием фона помещения.

Результаты измерений представлены в таблице 2.1.

Таблица 1: Результаты анализа образца пластика

Изотоп	Цепочка	Энергия, кэВ	Активность, Вq	Удельная активность, Вq/kg
Pb-212	Th-232	238.6	0.07 +0.05 -0.04	0.5 +0.4 -0.3
Ac-228	Th-232	840.0	0.26 +0.19 -0.16	2.0 +1.4 -1.2
Ac-228	Th-232	911.2	0.08 +0.07 -0.05	0.6 +0.5 -0.4
Ac-228	Th-232	969.0	0.11 +0.10 -0.07	0.8 +0.8 -0.6
Ac-228	Th-232	1588.0	0.19 +0.52 -0.19	1.4 +3.9 -1.4
Tl-208	Th-232	2614.5	0.11 +0.05 -0.05	0.8 +0.4 -0.3
Bi-214	U-238	1120.0	0.29 +0.21 -0.18	2.2 +1.6 -1.3
Bi-214	U-238	1238.1	0.19 +0.46 -0.19	1.4 +3.4 -1.4
Bi-214	U-238	1729.6	0.71 +0.79 -0.51	5.3 +5.9 -3.9
Bi-214	U-238	2204.0	1.58 +0.67 -0.47	11.8 +5.0 -3.5
Pb-211	U-235	405.0	0.93 +0.62 -0.55	7.0 +4.7 -4.1

На рисунках представлены графики зависимости активности от энергии для изотопов цепочек тория-232 и урана-238 в образце пластика.

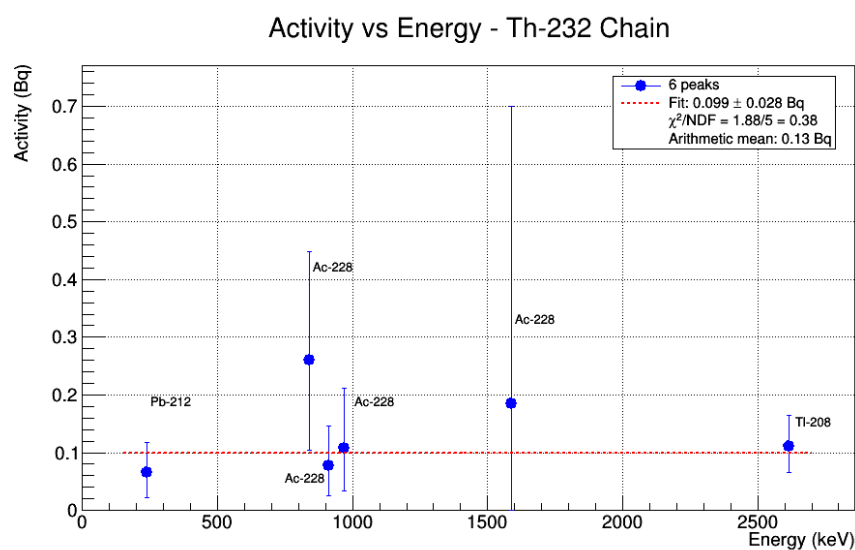


Рис. 1: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки Th-232 в образце пластика

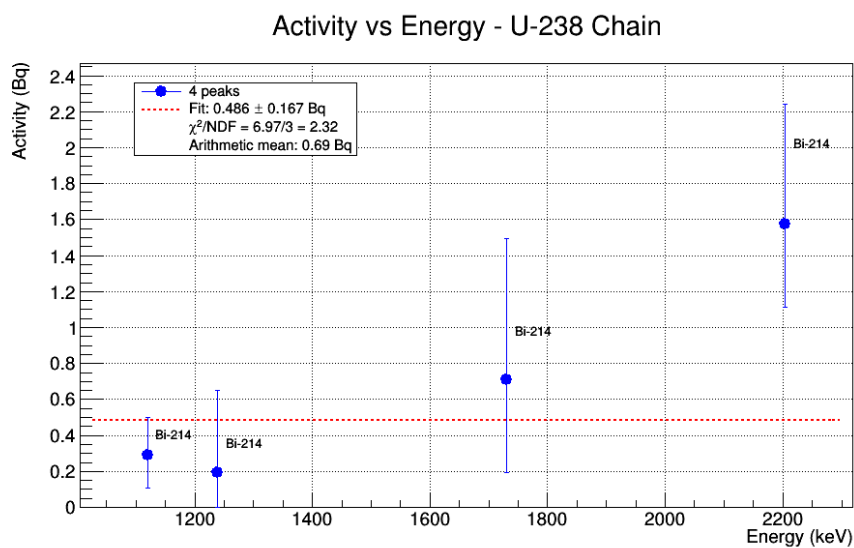


Рис. 2: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки U-238 в образце пластика

По результатам анализа всех идентифицированных пиков были получены следующие суммарные показатели для образца пластика:

Таблица 2: Суммарные результаты анализа образца пластика

Параметр	Значение
Суммарная активность	4.51 Bq
Суммарная удельная активность	33.83 Bq/kg
Количество обнаруженных изотопов	11

2.2 Исследование образца термоэластопласта TPE-S (пена)

Образец термоэластопласта TPE-S (пена) имеет цилиндрическую форму с диаметром 75 мм и высотой 75 мм. Масса образца составляет 52.1 г, объём — 331.34 см³, плотность — 0.16 г/см³. Время измерения гамма-спектра — 10000 секунд.

Результаты измерений представлены в таблице

Таблица 3: Результаты анализа образца термоэластопласта TPE-S

Изотоп	Цепочка	Энергия, кэВ	Активность, Вq
Pb-212	Th-232	238.6	0.24 +0.08 -0.08
Pb-214	U-238	295.0	0.01 +0.17 -0.01
Pb-211	U-235	405.0	0.37 +0.90 -0.37
Pb-211	U-235	427.0	1.14 +1.29 -0.86
Tl-208	Th-232	583.2	0.51 +0.15 -0.14
Tl-208	Th-232	860.0	0.31 +0.74 -0.31
Ac-228	Th-232	911.2	0.37 +0.15 -0.13
Ta-182	Other	1121.3	0.14 +0.11 -0.09
Bi-214	U-238	1238.1	0.14 +0.62 -0.14
Co-60	Other	1333.7	0.03 +0.02 -0.02

По результатам анализа всех идентифицированных пиков были получены следующие суммарные показатели для образца термоэластопласта:

Таблица 4: Суммарные результаты анализа образца TPE-S

Параметр	Значение
Суммарная активность	1.36 Вq
Удельная активность	26.1 Вq/kg
Количество обнаруженных изотопов	10

На рисунке представлен график зависимости активности от энергии для изотопов цепочки Th-232, U-235, U-238 в образце термоэластопласта.

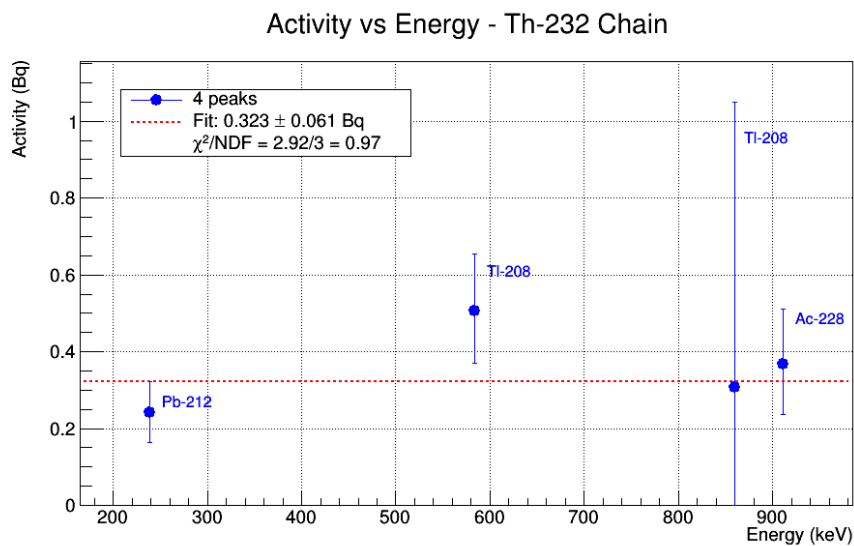


Рис. 3: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки Th-232 в образце TPE-S

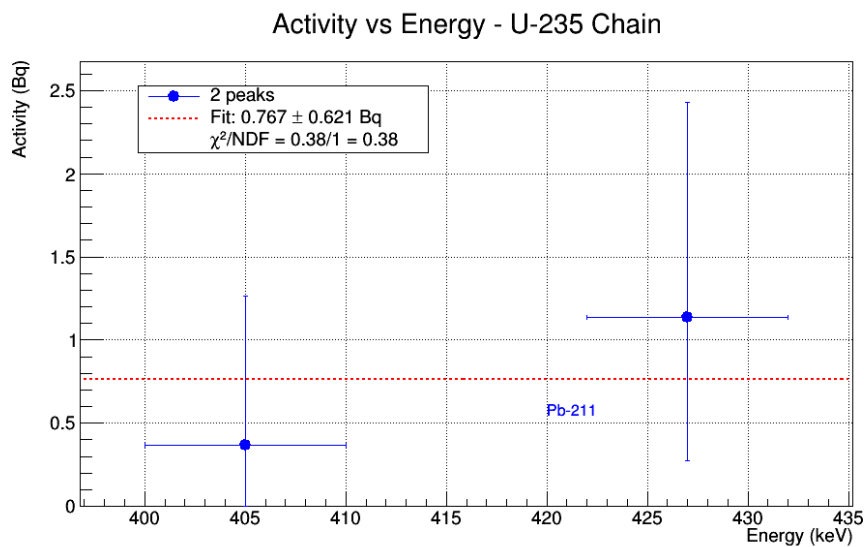


Рис. 4: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки U-235 в образце TPE-S

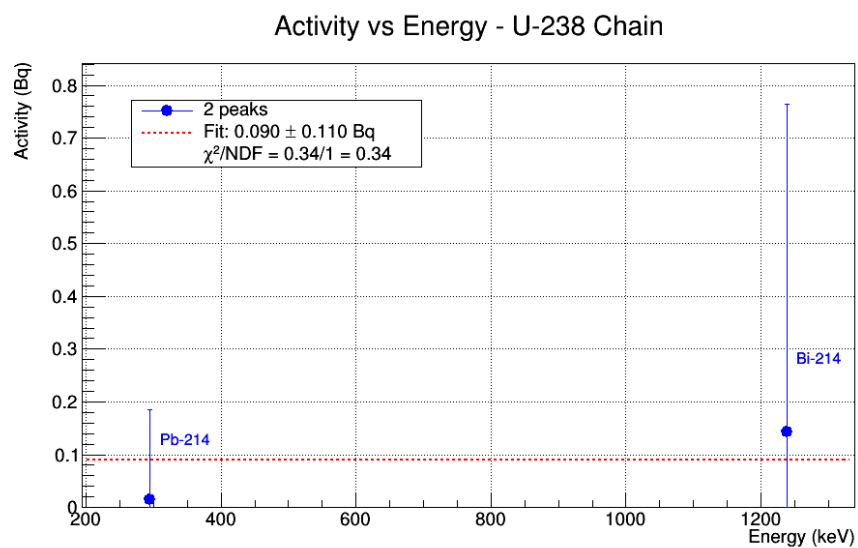


Рис. 5: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки U-238 в образце TPE-S

2.3 Исследование образца стекла ФЭУ-49

Образец стекла фотоэлектронного умножителя ФЭУ-49. Масса образца составляет 717.6 г. Время измерения гамма-спектра — 10000 секунд.

Результаты измерений представлены в таблице.

Таблица 5: Результаты анализа образца стекла ФЭУ-49

Изотоп	Цепочка	Энергия, кэВ	Активность, Вq
Pb-212	Th-232	238.6	0.34 +0.15 -0.15
Pb-214	U-238	295.0	2.88 +0.41 -0.40
Ac-228	Th-232	340.0	1.33 +0.39 -0.37
Pb-214	U-238	352.0	2.93 +0.26 -0.25
Pb-211	U-235	405.0	3.70 +1.73 -1.62
Pb-211	U-235	427.0	2.95 +2.37 -2.01
Tl-208	Th-232	583.2	1.08 +0.22 -0.21
Bi-214	U-238	609.3	2.89 +0.28 -0.27
Cs-137	Other	661.7	0.09 +0.07 -0.05
Pb-211	U-235	832.0	2.31 +1.54 -1.33
Ac-228	Th-232	840.0	1.87 +0.54 -0.48
Ac-228	Th-232	911.2	0.58 +0.27 -0.25
Ac-228	Th-232	969.0	1.33 +0.40 -0.37
Ta-182	Other	1121.3	1.50 +0.26 -0.24
Bi-214	U-238	1238.1	2.57 +1.16 -1.04
K-40	Other	1461.0	4.37 +1.16 -1.08
Bi-214	U-238	1729.6	3.97 +1.68 -1.42
Bi-214	U-238	1765.0	2.44 +0.66 -0.60

По результатам анализа всех идентифицированных пиков были получены следующие суммарные показатели для образца стекла ФЭУ-49:

Таблица 6: Суммарные результаты анализа образца стекла ФЭУ-49

Параметр	Значение
Суммарная активность	12.98 Вq
Суммарная удельная активность	75.6 Вq/kg
Количество обнаруженных изотопов	18

На рисунках представлены графики зависимости активности от энергии для изотопов цепочек Th-232 и U-238 в образце стекла ФЭУ-49.

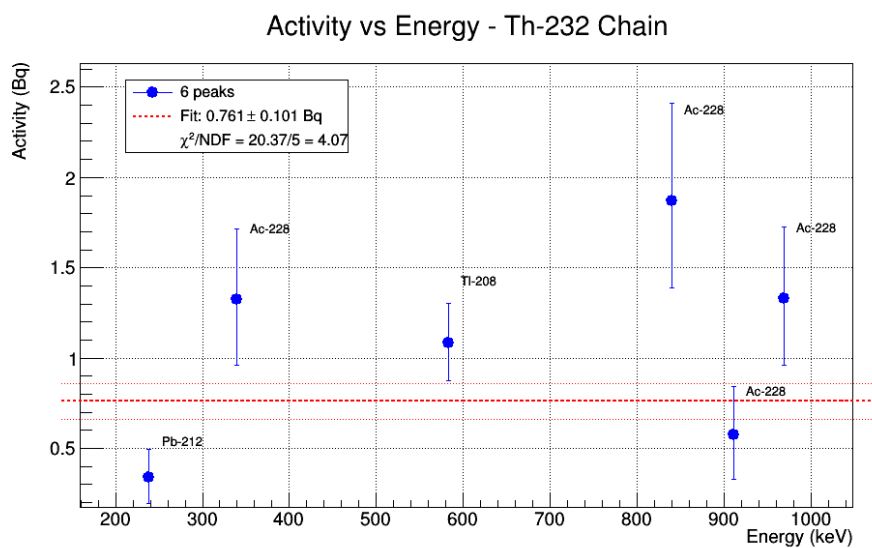


Рис. 6: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки Th-232 в образце стекла ФЭУ-49

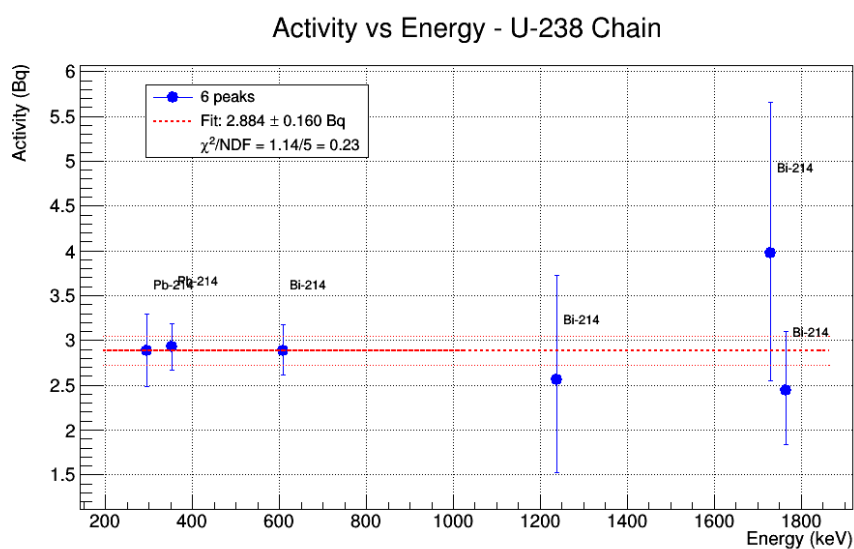


Рис. 7: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки U-238 в образце стекла ФЭУ-49

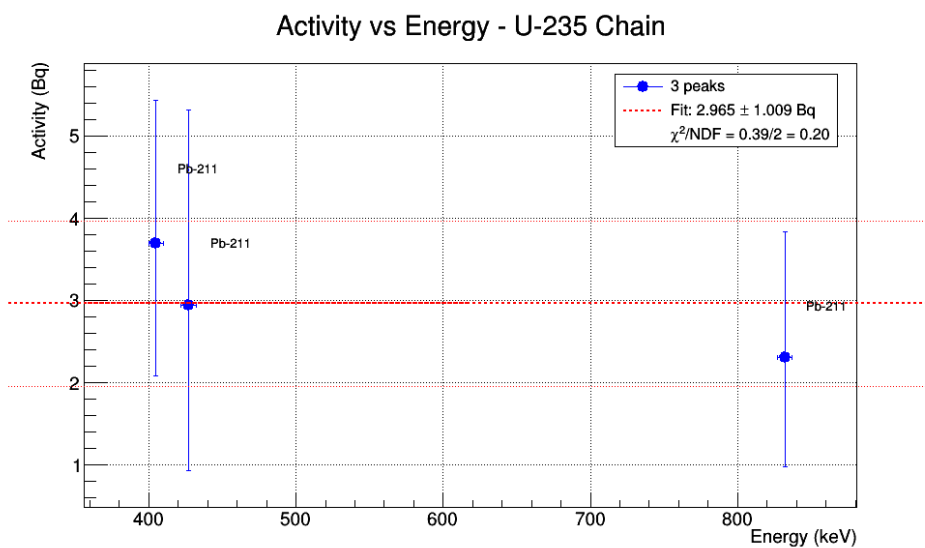


Рис. 8: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки U-235 в образце стекла ФЭУ-49

2.4 Исследование образца металлического динода ФЭУ-49

Образец металлического динода фотоэлектронного умножителя ФЭУ-49. Масса образца составляет 38.4 г. Время измерения гамма-спектра — 10000 секунд.

Результаты измерений представлены в таблице

Таблица 7: Результаты анализа образца металлического динода ФЭУ-49

Изотоп	Цепочка	Энергия, кэВ	Активность, Вq
Pb-212	Th-232	238.6	0.04 +0.03 -0.03
Tl-208	Th-232	583.2	0.17 +0.06 -0.05
Ac-228	Th-232	840.0	0.03 +0.13 -0.03
Tl-208	Th-232	860.0	0.13 +0.34 -0.13
Ac-228	Th-232	911.2	0.21 +0.08 -0.06
Ac-228	Th-232	969.0	0.14 +0.10 -0.08
Ac-228	Th-232	1588.0	0.58 +0.44 -0.36
Pb-214	U-238	352.0	0.03 +0.04 -0.02
Bi-214	U-238	609.3	0.01 +0.05 -0.01
Bi-214	U-238	1121.3	0.16 +0.06 -0.05
Bi-214	U-238	1238.1	0.30 +0.26 -0.20
Bi-214	U-238	1729.6	0.61 +0.50 -0.39
Pb-211	U-235	405.0	0.97 +0.45 -0.42
Pb-211	U-235	832.0	0.18 +0.44 -0.18
Cs-137	Other	661.7	0.02 +0.02 -0.01
Ta-182	Other	1121.3	0.16 +0.06 -0.05
K-40	Other	1461.0	0.52 +0.31 -0.28

По результатам анализа всех идентифицированных пиков были получены следующие суммарные показатели для образца алюминия:

Таблица 8: Суммарные результаты анализа образца динода ФЭУ-49

Параметр	Значение
Суммарная активность (все обнаруженные изотопы)	1.68 Вq
Суммарная удельная активность	43.75 Вq/kg
Количество обнаруженных изотопов	17

На рисунках представлены графики зависимости активности от энергии для изотопов цепочек Th-232, U-238 и U-235 в образце металлического динода ФЭУ-49.

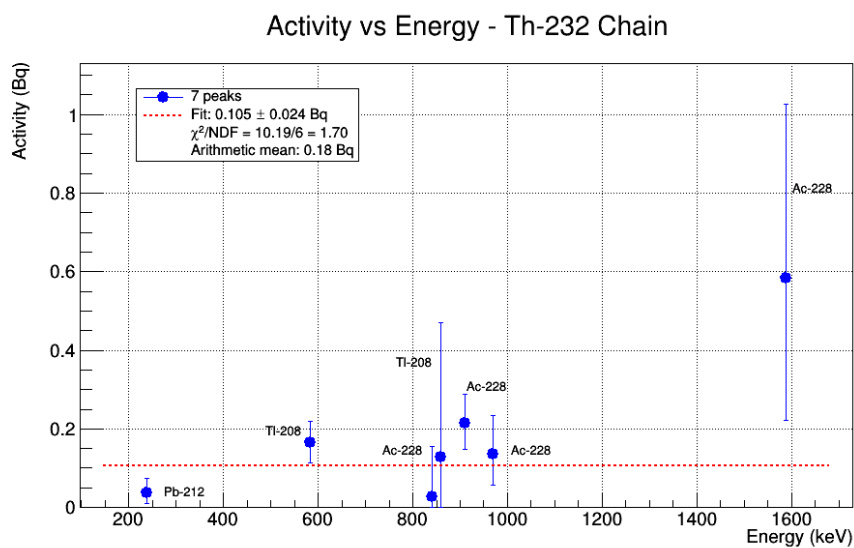


Рис. 9: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки Th-232 в образце металлического динода ФЭУ-49

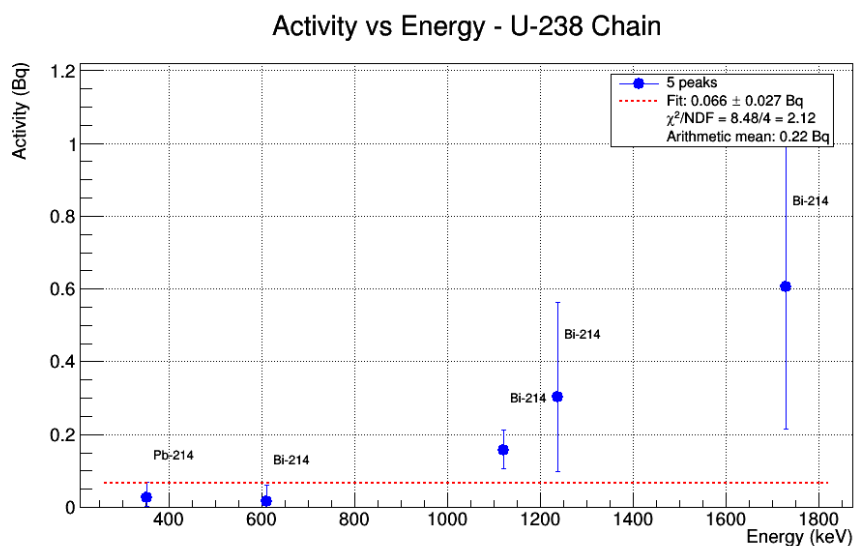


Рис. 10: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки U-238 в образце металлического динода ФЭУ-49

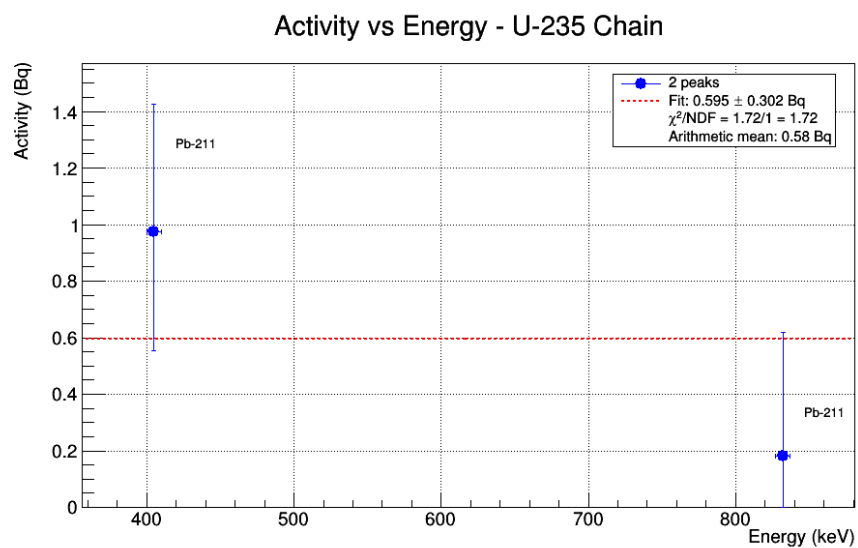


Рис. 11: Зависимость активности от энергии для изотопов цепочки U-235 в образце металлического динода ФЭУ-49

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения научно-исследовательской работы проведено комплексное исследование естественной радиоактивности материалов. Работа включала теоретический анализ, экспериментальные измерения на германиевом детекторе GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System и обработку полученных данных с использованием метода Фельдмана-Кузина.

Основные результаты работы

1. Теоретическая часть

- Изучены принципы работы германиевых детекторов на основе гиперчистого германия (HPGe) и их применение в низкофоновых экспериментах.
- Исследованы конструктивные особенности детектора GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System, используемого в работе.
- Изучен метод Фельдмана-Кузина для корректной оценки статистических ошибок при малых значениях сигнала.

2. Экспериментальная часть

- Проведены измерения гамма-спектров четырех типов образцов: пластик, термоэластопласт (пена), стекло ФЭУ-49, металлический динод ФЭУ-49.
- Для каждого образца выполнена идентификация радиоактивных изотопов, принадлежащих цепочкам Th-232, U-238, U-235, а также отдельных изотопов (K-40, Cs-137, Co-60, Ta-182).
- Рассчитаны активности и удельные активности каждого образца.

3. Результаты измерений

- Пластик: суммарная активность — 4.51 Вq, удельная активность — 33.83 Вq/kg, обнаружено 11 изотопов.
- Термоэластопласт (пена): суммарная активность — 1.36 Вq, удельная активность — 26.1 Вq/kg, обнаружено 5 изотопов.
- Стекло ФЭУ-49: суммарная активность — 12.98 Вq, удельная активность — 75.6 Вq/kg, обнаружено 18 изотопов.
- Металлический динод ФЭУ-49: суммарная активность — 1.68 Вq, удельная активность — 43.75 Вq/kg, обнаружено 17 изотопов.

Общие выводы

1. Разработанная методика калибровки и обработки данных с использованием метода Фельдмана-Кузина позволяет корректно определять удельную активность материалов даже при малых значениях сигнала.
2. Присутствие Cs-137 в образцах (на уровне 0.02–0.12 Вq/kg) связано с глобальными радиоактивными выпадениями после испытаний ядерного оружия и аварии на Чернобыльской АЭС.
3. Полученные результаты могут быть использованы при выборе материалов для создания детекторов и вспомогательного оборудования в экспериментах.

Практическая значимость работы

Разработанная методика обработки спектров может быть применена в учебных и исследовательских лабораториях для контроля радиоактивной чистоты материалов. Полученные данные о радиоактивности компонентов ФЭУ-49 позволяют оценить их вклад в общий фон детектора при планировании низкофоновых экспериментов.

Работа имеет завершённый характер, все поставленные цели достигнуты, задачи выполнены.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ORTEC. GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System: User's Manual. Revision 3.1. Oak Ridge: Advanced Measurement Technology, Inc., 2020. 145 p.
2. Schkade U.-K., Heckel A., Wershofen H. Gamma spectrometric determination of the activities of natural radionuclides (-СПЕКТ/NATRAD): Technical Report BfS-SW-02/09. Berlin: Federal Office for Radiation Protection (BfS) and Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 2009. 67 p.
3. Radiopurity.org. Database of Radioactive Impurities in Materials. URL: <https://www.radiopurity.org/> (дата обращения: 20.05.2025).
4. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47. Введ. 2009-09-01. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
5. ГОСТ 7.32-2017. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. Введ. 2018-07-01. М.: Стандартинформ, 2018. 31 с.