

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии  
Кафедра Физико-энергетические установки

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Изучение влияния параметров измерения на статистическую погрешность спектрометрических методов</b>

УДК 543.429.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Г	Еремеева Т.А.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ФЭУ ФТИ	Чурсин С.С.			

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Сечина А.А	К.Х.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ ФТИ	Долматов О.Ю.	к.ф.-м.н., доцент		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Общекультурные компетенции</b>	
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
Р11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
Р12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
	основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ФЭУ

16.05.2016 О. Ю. Долматов

---

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Г	Еремеевой Татьяне Андреевне

Тема работы:

Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	1333/С от 18.02.2016
--	----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	24.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– спектрометрические тракты на основе сцинтиллятора NaI и полупроводника из особо чистого германия;</li><li>– образцовые стандартные источники гамма-излучения.</li></ul>
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– анализ нормативно-правовых документов по вопросам организации и функционирования систем учета и контроля ядерных материалов на ядерном объекте;</li><li>– изучение статистических особенностей гамма-спектрометрических измерений;</li><li>– анализ спектральных характеристик ОСГИ на различных спектрометрических трактах;</li><li>– определение зависимости ПШПВ от энергии для германиевого детектора;</li><li>– определение влияния статистического набора на погрешность определения центроиды пика и площади пика.</li></ul>

<b>Перечень графического материала</b>	Биологическая защита сцинтилляционного детектора.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы:</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Сечина Ася Александровна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:</b>	
нет	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику:</b>	16.05.2016
--	------------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент каф. ФЭУ ФТИ	Чурсин С.С.			16.05.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А2Г	Еремеева Т.А.		16.05.2016

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А2Г	Еремеевой Татьяне Андреевне

<b>Институт</b>	<b>ФТИ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ФЭУ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	– стоимость материалов и оборудования; – квалификация исполнителей; – трудоёмкость работы.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	– оклады исполнителей
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	– отчисления во внебюджетные фонды

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	– формирование вариантов решения с учётом научного и технического уровня
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	– планирование работ; – формирование графика исследования.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	– обоснование эффективности проекта

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

<i>нет</i>
------------

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	28.04.2016
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Сечина А.А.	к.х.н.		28.04.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А2Г	Еремеева Т.А.		28.04.2015

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А2Г	Еремеевой Татьяне Андреевне

<b>Институт</b>	<b>ФТИ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ФЭУ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ.</li> </ul>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью;</li> <li>– предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	11.04.16
---	----------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент кафедры ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		11.04.16

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0А2Г	Еремеева Т.А.		11.04.16

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический  
 Направление подготовки (специальность) 14.03.02 Ядерные физика и технологии  
 Уровень образования высшее  
 Кафедра Физико-энергетические установки  
 Период выполнения (весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
---------------------

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	24.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
16.05.2016	<i>Выдача задания</i>	
19.05.2016	<i>Поиск и обзор литературы</i>	
23.05.2016	<i>Проведение измерений</i>	
11.06.2016	<i>Расчет и анализ полученных результатов</i>	
20.06.2016	<i>Сдача работы</i>	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ФЭУ ФТИ	Чурсин С.С.			16.05.2016

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	к.ф.-м.н., доцент		16.05.2016

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 82 страницы, 12 рисунков, 21 таблицу, 17 источников, 4 приложения.

Ключевые слова: ядерный материал, неразрушающий анализ, гамма-спектрометрия, германиевый детектор, сцинтилляционный детектор, статистическая погрешность, пик полного поглощения.

Основная цель работы – оценка влияния параметров измерения источников гамма-излучения на результаты обработки экспериментальных данных и статистическую погрешность измерения.

Объектом исследования в данной работе является статистическая погрешность измерений в гамма-спектрометрическом анализе ядерных материалов.

Предмет исследования – параметры измерения источников гамма-излучения, влияющие на результат статистической ошибки при проведении гамма-спектрометрических измерений.

В результате было оценено влияние параметров измерения ядерных материалов на статистическую погрешность гамма-спектрометрического метода. Установлено необходимое значение статистического набора для достижения погрешности менее 1 % для особо чистого германиевого и сцинтилляционных детекторов.

## Оглавление

Введение.....	13
1 Гамма-спектрометрический анализ ядерных материалов (ЯМ) .....	15
1.1 Взаимодействие гамма-излучения с веществом .....	15
1.2 Характеристические пики гамма-спектра .....	17
1.3 Гамма-спектрометры .....	19
2 Статистика спектрометрических измерений.....	24
2.1 Понятия и определения .....	24
2.2 Классификация погрешностей измерения.....	26
2.3 Основные законы распределения .....	27
3 Постановка эксперимента .....	31
3.1 Описание спектрометрического тракта .....	31
3.1 Программа экспериментов.....	32
3.2 Обработка результатов измерений.....	33
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	40
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения экспериментов с использованием SWOT-анализа.....	40
4.2 Планирование работ.....	41
4.2.1 Структура работ в рамках исследования.....	41
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	41
4.2.3 Разработка графика проведения исследования.....	42
4.3 Бюджет исследования.....	45
4.3.1 Расчет материальных затрат исследования.....	45
4.3.2 Основная заработная плата исполнителей работ.....	46
4.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) и накладные расходы .....	47
4.3.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	48
5 Социальная защита .....	49
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	49

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния.....	50
5.2.1 Требования к организации работ с использованием персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ).....	50
5.2.2 Технические мероприятия.....	51
5.2.3 Условия безопасной работы.....	52
5.3 Радиационная безопасность .....	55
5.4 Электробезопасность .....	58
5.5 Пожарная и взрывная безопасность .....	59
Заключение .....	61
Список публикаций студента.....	63
Список использованных источников .....	64
Приложение А .....	67
Приложение Б .....	73
Приложение В.....	79
Приложение Д.....	81

## **Введение**

Гамма-спектрометрический анализ является одним из наиболее точных способов обнаружения радионуклидов в различных образцах. Данный метод является одним из основных методов неразрушающего анализа и предоставляет уникальные возможности проведения разнообразных исследований во многих областях знаний.

Временной фактор играет важную роль в гамма-спектрометрическом анализе, так как зачастую для достоверной идентификации сложных неизвестных образцов необходимо проводить тщательный и долгий процесс измерения. Этот же фактор является ограничением набора большой статистики. Необходимость уменьшения времени измерения является актуальной проблемой в данной области анализа материалов. Изучение параметров измерений и выявление зависимости их влияния на точность и погрешность анализа позволит частично снизить время измерения материалов, а значит повысить производительность анализа.

Основной целью данной работы является изучение и выявление влияния параметров измерения источников гамма-излучения на результаты обработки экспериментальных данных и статистическую погрешность измерения.

Осуществлению цели способствовали постановка и решение следующих задач:

- изучение статистических особенностей при проведении гамма-спектрометрических анализов;
- оценка влияния статистического набора данных на погрешность определения площади пика и на точность определения энергии пика;
- выявление зависимости ПШПВ от площади пика;
- сравнение полученных результатов статистической погрешности для различных детекторов.

Объектом исследования в данной работе является статистическая погрешность измерений в гамма-спектрометрическом анализе ядерных материалов.

Предмет исследования – параметры измерения источников гамма-излучения, влияющие на результат статистической ошибки при проведении гамма-спектрометрических измерений. К таким параметрам относятся время набора спектра, результаты калибровки спектрометрического тракта, геометрия измерений, а также статистический набор данных и площадь пиков полного поглощения, ограничением для которых может служить количество отсчетов.

# **1 Гамма-спектрометрический анализ ядерных материалов (ЯМ)**

В результате распада большинства известных радионуклидов возникает гамма-излучение, важными особенностями которого являются дискретность и характеристический спектр. Основным способом регистрации данного излучения является гамма-спектрометрический анализ, представляющий уникальные возможности проведения разнообразных исследований во многих областях знаний.

## **1.1 Взаимодействие гамма-излучения с веществом**

Гамма-излучение находится в энергетическом диапазоне от 5 кэВ до 5 МэВ [1]. Данный вид излучения взаимодействует с веществом посредством трех основных процессов: фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электрон-позитронных пар.

Существует вероятность того, что гамма-квант взаимодействует со связанным электроном атома и потеряет всю свою энергию. Такой процесс характерен для фотоэлектрического поглощения гамма-квантов в веществе. В ходе данного взаимодействия часть энергии кванта пойдет на преодоление энергии связи электрона, другая часть высвобожденным электроном в виде кинетической энергии. То есть особенностью данного процесса является отдача гамма-квантом всей своей энергии. Событиям, приводящим к полному поглощению энергии гамма-квантов соответствует пик полного поглощения (ППП).

Вероятность взаимодействия гамма-кванта посредством фотоэффекта зависит от энергии гамма-кванта (вероятность увеличивается с уменьшением энергии кванта), энергии связи электрона (вероятность возрастает с увеличением энергии связи), атомного номера вещества (вероятность возрастает с увеличением атомного номера).

Гамма-квант может упруго рассеяться на свободном или слабо связанном электроне и передать ему часть своей энергии. Такой вид взаимодействия называется комптоновским рассеянием (Комптон-эффектом).

Квант в процессе взаимодействия не исчезает, т.к. согласно законам сохранения энергии и импульса электрон получает только часть энергии кванта. Поскольку энергия связи электрона мала по сравнению с энергией гамма-кванта, кинетическая энергия электрона близка с энергией, которую потерял гамма-квант. Направления разлета провзаимодействовавших электрона и гамма-кванта зависят от энергии, которая была передана электрону. Эта энергия имеет наименьшее значение в случае лобового столкновения, при котором гамма-квант рассеивается на  $180^\circ$ , а отрицательная частица движется в сторону падающего гамма-кванта [1]. В случае рассеяния на малые углы, рассеянный электрон получает очень небольшую энергию, диапазон которой лежит от нуля до максимального значения. Результатом Комpton-эффекта, произошедшего в детектирующей среде, является выходной импульс, пропорциональный энергии потерянной падающим гамма-квантом.

Поскольку ядро не оказывает значительного влияния на комптоновское рассеяние, вероятность взаимодействия почти не зависит от атомного номера, но зависит от плотности электронов, которая в свою очередь пропорциональна отношению зарядового номера элемента к его атомному номеру.

Имея энергию не менее 1,022 МэВ, при этом находясь под влиянием электромагнитного поля вблизи ядра, гамма-квант способен образовать электрон-позитронную пару. В случае если энергия кванта превышает значение 1,022 МэВ, избыточная энергия будет распределяться между отрицательным электроном и положительным позитроном в виде их кинетических энергий. Полученная пара электрон-позитрон быстро замедляется в поглотителе. После потери кинетической энергии позитрон соединяется с электроном в аннигиляционном процессе, результатом которого являются два освободившихся гамма-кванта, энергия каждого из которых составляет 511 кэВ. Далее эти гамма-кванты взаимодействуют с поглощающим материалом либо покидают его.

Результатами процесса взаимодействия является образование трех пиков в спектре:

1) процесс поглощения в детекторе обоих аннигиляционных квантов вносит вклад в ППП спектра;

2) при покидании объема детектора одним из аннигиляционных гамма-квантов, взаимодействие вносит вклад в пик одиночного вылета, который будет расположен на 0,511 МэВ ниже ППП;

3) при покидании объема детектора обоими аннигиляционными гамма-квантами, взаимодействие вносит вклад в пик двойного вылета, который будет расположен на 1,022 МэВ ниже ППП.

Вероятность образования пар изменяется примерно как квадрат атомного номера элемента, становясь значимой для элементов, которые имеют высокие значения атомного номера.

## 1.2 Характеристические пики гамма-спектра

Спектр излучения представляет собой гистограмму с зарегистрированными импульсами, амплитуды которых пропорциональны энергии, потерянной гамма-квантами в объеме детектора (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Общий вид гамма-спектра

Можно выделить спектральные характеристики, которые встречаются в большинстве спектров:

1) ППП, который является наиболее информативной частью спектра, так как по его положению на энергетической шкале (центроида пика) происходит идентификация неизвестных компонентов пробы, по его площади определяется количественный состав пробы.

2) Континуум комптоновского фона возникает в случае взаимодействий, которые происходят только с частичной потерей энергии гамма-кванта в объеме детектора.

3) Комптоновский край в спектре представлен широким ассиметричным пиком, который является следствием лобового столкновения электрона и гамма-кванта, при котором гамма-квант рассеивается назад на  $180^\circ$ , а электрон движется вперед.

4) Наличие «комптоновской долины» вызвано многократным комптоновским рассеянием или взаимодействием с полной потерей энергии гамма-квантами, подвергшихся рассеянию на малые углы перед их попаданием в детектор.

5) Пик обратного рассеяния является результатом комптоновского рассеяния гамма-квантов в одном из материалов, окружающих детектор.

6) Появление области избыточных энергий может быть вызвано наличием в естественном фоне гамма-квантов высоких энергий, а также наложениями импульсов в случае высокой скорости счета.

7) Причиной подъема в области низких энергий может стать низкоамплитудный электронный шум в детектирующей системе, возникающий обычно при наличии высокой частоты следования импульсов (проявляется как высокая скорость счета).

Гамма-спектрометрический анализ зачастую сопровождается рядом проблем, например таких как:

– высокая случайная погрешность, причиной которой является низкая активность определяемой пробы. Погрешность можно устранить путем увеличения длительности измерений, а также за счет снижения фона;

– систематическая ошибка, причиной которой является неверный расчет эффективности. Данная погрешность может быть устранена путем подбора подходящих стандартных образцов для калибровки;

– систематическая ошибка, вызванная случайным суммированием импульсов в случае измерения проб, имеющих высокую активность.

Избавиться от данной ошибки можно путем изменения геометрии измерений (увеличение расстояния «источник-детектор»);

– каскадное испускание гамма-квантов некоторыми радионуклидами ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ) приводит к суммированию импульсов и, соответственно, к систематическому занижению результата;

– наложение пиков от гамма-линий различных радионуклидов, следствием чего может явиться неверная идентификация нуклидов [2].

### 1.3 Гамма-спектрометры

Для регистрации гамма-квантов и их энергий используется множество различных типов детекторов. В неразрушающем анализе (НРА) ЯМ обычно необходимо измерять количество излучения, выходящего из образца, а также его энергетический спектр. Исходя из этого, для целей НРА наиболее приемлемыми являются детекторы, выходной сигнал которых пропорционален энергии, потерянной гамма-квантом в чувствительном объеме детектора [1].

Основными характеристиками гамма-спектрометра являются разрешающая способность и эффективность. При этом стоит отличать разрешающую способность от разрешения: первое характеризует способность детектирующей системы различать два гамма-кванта, имеющих близкие значения энергий, второе является мерой способности детектора различать два пика с близкими значениями энергий. Параметр, который используется для указания энергетического разрешения детектора, называется полная ширина пика на половине его высоты (ПШПВ).

Эффективность детектора, регистрирующего ионизирующее излучение, определяется отношением полного числа зарегистрированных фотонов в пике полного поглощения к полному числу зарегистрированных фотонов, испущенных источником. Эффективность регистрации полной энергии (то есть события с полным поглощением энергии) представляет собой произведение (1.1):

$$\varepsilon_{\text{полн}} = \varepsilon_{\text{геом}} \cdot \varepsilon_{\text{геом}} \cdot \varepsilon_{\text{обр}} \cdot \varepsilon_{\text{собст}}, \quad (1.1)$$

где  $\varepsilon_{\text{геом}}$  – геометрическая эффективность, которая определяется как доля испущенных гамма-квантов, попадающих в детектор;

$\varepsilon_{\text{погл}}$  – эффективность поглощения, учитывающая влияние материалов, частично поглощающих входящее излучение до его взаимодействия с детектором;

$\varepsilon_{\text{обр}}$  – эффективность образца, которая определяется как доля испущенных гамма-квантов, реально покинувших материал образца;

$\varepsilon_{\text{собст}}$  – собственная эффективность является вероятностью того, что гамма-квант, попадающий в детектор, провзаимодействует и даст импульс в пик полного поглощения.

Наиболее распространенными типами детекторов для регистрации гамма-излучения являются сцинтилляционный и полупроводниковый.

Принцип работы сцинтилляционных детекторов основан на измерении интенсивности световых вспышек, возникающих в люминесцирующих веществах при прохождении через них ионизирующих излучений.

На рисунке 1.2 представлена схема сцинтилляционного детектора. Ионизирующее излучение, выходящее из источника 1, поступает в сцинтиллятор 2 и создает в нем сцинтилляционные вспышки. Часть фотонов, испускаемых сцинтиллятором, попадает на катод фотоэлектронного умножителя 3 (ФЭУ). Под воздействием фотонов с катода вырываются фотоэлектроны, которые, пройдя фокусирующую диафрагму 4, электрическим полем последовательно направляются на электроды умножителя (диноды или эмиттеры) 5 и собираются на аноде (коллекторе) 6. Для питания ФЭУ используется источник стабилизированного напряжения ( $\sim 1000\text{--}2200\text{ В}$ ) и набор сопротивлений  $R_1\text{--}R_6$ , являющийся делителем напряжения 7. Далее через анод проходит ток и на сопротивлении 8 появится импульс напряжения, который, пройдя усилитель 9, поступает на пересчетный прибор 10 и передается на устройство для обработки результатов измерений 11 (например, пересчетное устройство) [3].

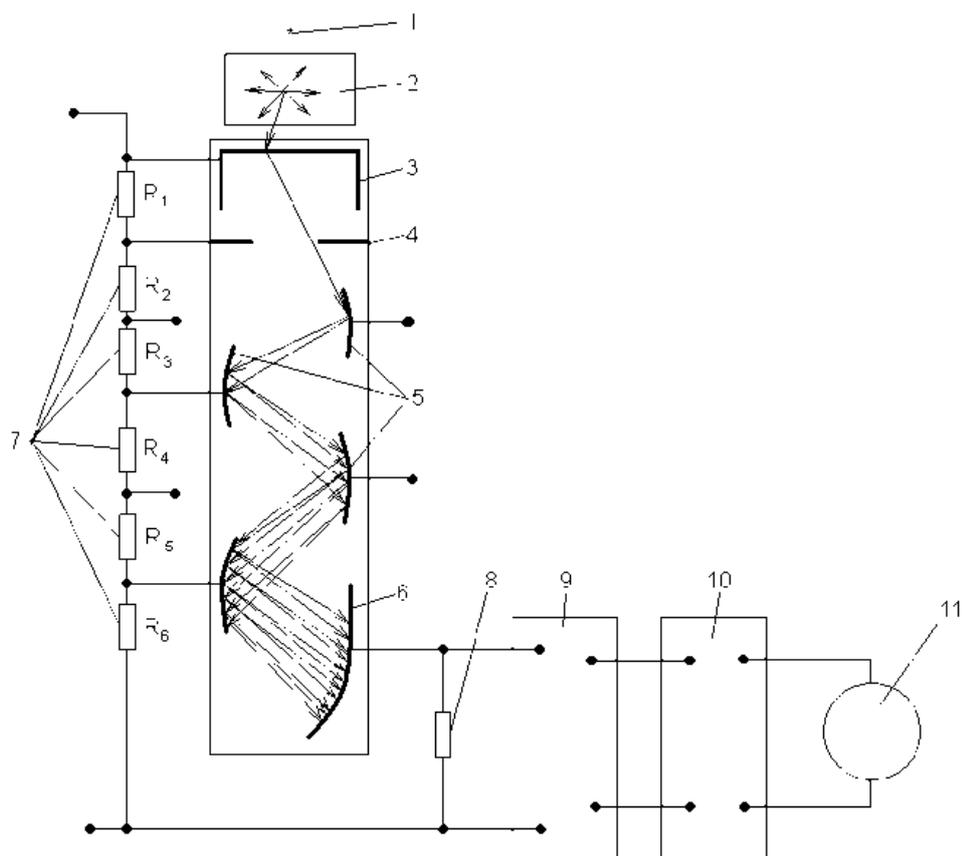


Рисунок 1.2 – Схема сцинтилляционного детектора:

- 1 – источник ионизирующего излучения; 2 – сцинтилляционный детектор;  
 3 – фотокатод ФЭУ; 4 – диафрагма; 5 – диноды; 6 – анод; 7 – делитель напряжения;  
 8 – сопротивление, на котором регистрируется скачек напряжения; 9 – усилитель;  
 10 – пересчетный прибор; 11 – устройство обработки результатов измерений

К преимуществам сцинтилляционного метода регистрации излучений можно отнести:

- высокую эффективность регистрации проникающих излучений;
- малое время высвечивания сцинтилляторов, что позволяет обеспечить высокую временную разрешающую способность сцинтилляционных детекторов, т.е. малое мертвое время;
- относительно невысокая их стоимость.

Основными недостатками являются чувствительность к изменению температуры окружающей среды, а также относительно низкая разрешающая способность.

Принцип работы полупроводниковых детекторов основан на образовании носителей заряда (электронов и «дырок») при прохождении ионизирующего излучения через чувствительный объем детектора (рисунок 1.3).

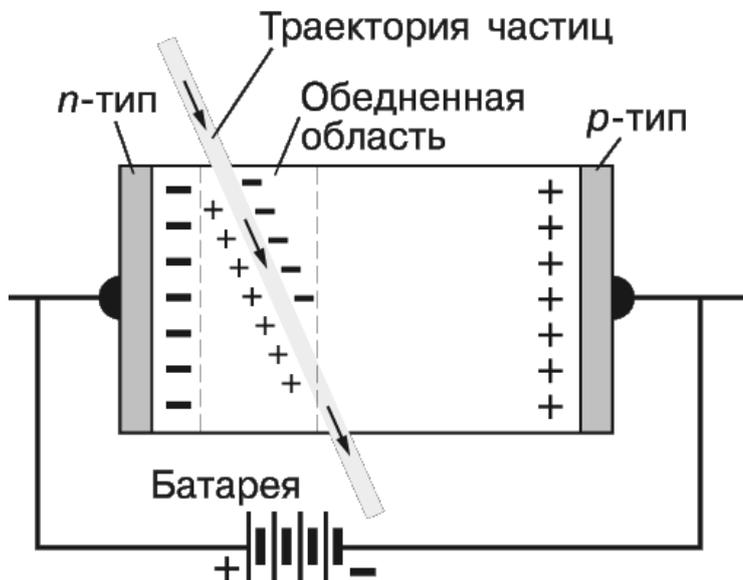


Рисунок 1.3 – Принцип работы полупроводникового детектора

В обычном состоянии в обедненной чувствительной области полупроводника отсутствуют свободные носители заряда. Фотон, попав в данную область, вызовет ионизацию, что приведет к появлению электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Образовавшиеся электронно-дырочные пары под действием приложенного напряжения собираются на электродах, создавая импульс тока, амплитуда которого пропорциональна энергии зарегистрированного фотона.

Ширина пика полного поглощения в гамма-спектрометрии определяется статистическим разбросом числа носителей заряда (электронно-дырочных пар или фотоэлектронов), образующихся при взаимодействии гамма-кванта с объемом детектора. Чем больше образуется носителей заряда, тем меньше относительная ширина пика. Поэтому полупроводниковые детекторы имеют в десятки раз лучшее разрешение, чем сцинтилляционные. При этом эффективность данного типа гамма-спектрометров обычно ниже, чем у сцинтилляционных.

Германиевые детекторы имеют относительно небольшую ширину запрещенной зоны носителей заряда. Поэтому для уменьшения теплового образования носителей заряда они должны охлаждаться до приемлемого для выполнения измерений уровня. Иначе ток утечки будет вызывать шум, который снизит энергетическое разрешение детектора. Жидкий азот, имеющий температуру  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , является обычным средством охлаждения для таких детекторов.

К недостаткам полупроводниковых особо чистых германиевых детекторов можно отнести необходимость их охлаждения, невозможность создания детекторов большого объема, а также их высокую стоимость.

## **2 Статистика спектрометрических измерений**

Любую физическую величину в эксперименте можно определить приближенно, указав некоторый интервал ее возможных значений. При более тщательном проведении эксперимента, а также при использовании более совершенных приборов данный интервал значений уменьшается. Неопределенность значений может быть вызвана различными причинами, но ее наличие требует подвергнуть результаты эксперимента статистической обработке с целью дальнейшего правильного определения средних значений, указания интервалов, в которых можно с определенной вероятностью обнаружить данное значение при проведении измерений и т.д.

Необходимость статистического подхода в микромире вытекает из статистичности самих явлений микромира [4]. Разброс показаний приборов при проведении измерений величин, которые характеризуют явления микромира, обусловлен флуктуациями самой измеряемой величины. Однако, усовершенствование измерительного оборудования не позволит совсем исключить разброс данных величин.

### **2.1 Понятия и определения**

Случайным событием в теории вероятности является событие, имеющее несколько исходов. Если под событием имеется в виду переменная числовая величина, то ее называют случайной, при этом данные величины подчиняются статистическим законам.

Непрерывная случайная величина может принимать любые значения внутри некоторой области, в то время как дискретная – точные определенные значения, которые будут отличаться друг от друга на некоторую величину.

В случае если появление какой-либо случайной величины не влияет на вероятность появления другой, то подобные величины являются независимыми. Если имеется жесткая связь одной величины от другой, то есть одна случайная величина полностью определяет значение другой, то такая зависимость называется функциональной. В случае отсутствия жесткой связи между

случайными величинами каждому значению одной случайной величины будет соответствовать набор значений другой. Тогда связь проявляется в среднем и называется корреляционной.

Частота появления отдельных значений измеряемой величины следует некоторому распределению (закону распределения) случайной величины. Если рассматривается дискретная величина, то каждому ее значению  $x_i$  соответствует вероятность  $p(x_i)$ . При этом множество значений вероятности  $p(x_i)$  называется дискретным распределением вероятностей случайной величины.

В случае непрерывной случайной величины  $p(x)$  имеет смысл плотности вероятностей величины  $x$ , то есть той вероятности, которая приходится на единичный интервал величины  $x$ .

Дискретное распределение вероятностей случайной величины полностью задается множеством значений вероятности, или функцией распределения  $p(x_i)$ . Непрерывное распределение полностью задается его плотностью  $p(x)$ . То есть знание функции распределения позволяет определить все свойства распределения. Зачастую для выделения основных важных свойств распределения используются такие характеристики, как среднее значение и дисперсия.

Средним значением, или математическим ожиданием случайной величины, называется величина, которая описывается формулой (2.1) для дискретного распределения, формулой (2.2) – для непрерывного:

$$\mu \equiv M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx, \quad (2.1)$$

$$\mu \equiv M(x_i) = \sum_{i=0}^{\infty} x_i p(x_i). \quad (2.2)$$

В качестве меры разброса случайной величины относительно ее среднего используется дисперсия. Под дисперсией случайной величины понимается среднее значение квадрата отклонений случайной величины от ее среднего. Дисперсию обозначают  $D(x)$  или  $\sigma^2(x)$ . Положительное значение корня квадратного из дисперсии называют стандартным или

среднеквадратическим отклонением. Для дискретной и непрерывной случайной величины дисперсия определяется по формуле (2.3):

$$D(x_i) = D(x) = \overline{x^2} - \mu^2. \quad (2.3)$$

Кроме дисперсии или стандартного отклонения флуктуации случайной величины характеризуются также относительным среднеквадратическим отклонением  $\delta$ , которое определяется по формуле (2.4):

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu}. \quad (2.4)$$

## 2.2 Классификация погрешностей измерения

Численное значение физической величины получается в результате ее измерения, то есть сравнения с другой величиной того же рода, принятой за единицу [5]. Проводя достаточно точные измерения величины, некоторые из полученных результатов могут отличаться друг от друга, а значит, содержать ошибки. Ошибкой измерения принято считать разность  $x - a$ , где  $x$  – результат измерения,  $a$  – истинное значение измеряемой величины.

Оценка истинного значения  $a$  является важной задачей при обработке результатов эксперимента. При этом данная задача сводится к вычислению приближенного значения  $a$  с максимально меньшей ошибкой. В связи с этим необходимо знать основные типы ошибок и их свойства.

Выделяют три основные группы ошибок:

- грубые;
- систематические;
- случайные.

Причиной возникновения грубых ошибок чаще всего являются нарушения основных условий измерения или невнимательности экспериментатора. В случае обнаружения ошибки данного типа следует отбросить данный результат измерения и по возможности повторить измерение. В процессе проведения эксперимента необходимо анализировать полученные результаты, чтобы вовремя исключить грубые ошибки.

Появление систематических ошибок может быть следствием различных факторов. К ним могут относиться неправильная регулировка прибора, изменение внешних условий проведения эксперимента и пр. Выявить подобные ошибки можно путем специальных исследований (измерить одну и ту же величину несколькими методами или используя один и тот же прибор провести измерения известных эталонных величин). После обнаружения данных ошибок и расчета их величин они могут быть устранены путем введения поправок в результаты измерения.

### 2.3 Основные законы распределения

Распределения, как и случайные величины, можно разделить на дискретные и непрерывные. К первым относятся биномиальное распределение и распределение Пуассона, ко вторым – распределение Гаусса (нормальное).

Пусть некоторое событие может иметь только два исхода: благоприятный и неблагоприятный. Вероятность исхода первого равна  $\Theta$ , тогда вероятность второго  $1 - \Theta$ . Если событие происходит  $N$  раз, то вероятность  $p(x)$ , того, что благоприятный исход повторится  $x$  раз, а неблагоприятный  $(N - x)$  раз, равна произведению числа способов, которыми можно выбрать  $x$  из  $N$ , на вероятность того, что сначала  $x$  раз подряд повторится благоприятный исход, а затем  $(N - x)$  раз – неблагоприятный [4]. В этом случае полная вероятность  $x$  описывается формулой (2.5):

$$p(x) = \frac{N!}{x!(N-x)!} \Theta^x (1 - \Theta)^{N-x}. \quad (2.5)$$

Множество вероятностей (2.5) называется биномиальным распределением (распределением Бернулли). График представлен на рисунке 2.1. При большом числе испытаний данное распределение стремится к нормальному распределению.

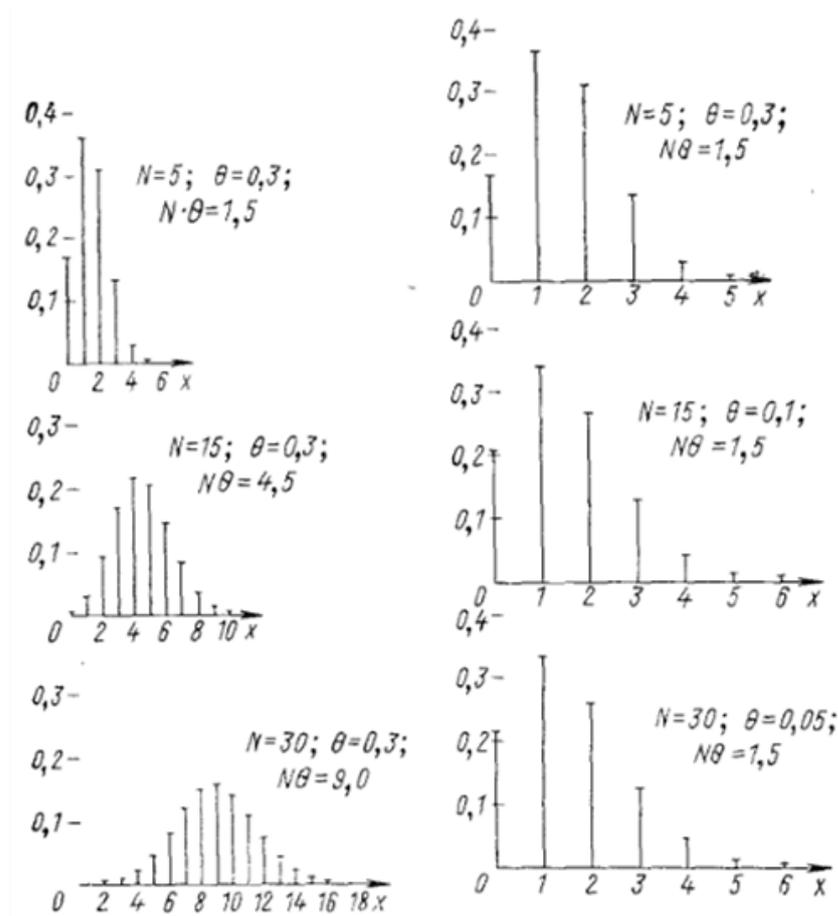


Рисунок 2.1 – Биноминальное распределение при различных значениях параметров  $N$  и  $\theta$

Для описания случайной величины, которая представляет собой число событий произошедших независимо друг от друга с некой средней интенсивностью за фиксированное время, используется распределение Пуассона.

Для получения распределения Пуассона необходимо рассмотреть вероятность того, что за данный промежуток времени произойдет  $k$  событий при условии выполнения следующих предположений:

1) осуществление или неосуществление события в момент  $t$ , не зависит от событий, которые предшествуют моменту  $t$ ;

2) вероятность отдельного события за малый интервал времени  $\delta t$  возрастает пропорционально длительности этого интервала, т.е. вероятность отдельного события за промежуток времени  $(t, t + \delta t)$  равна  $n\delta t + o(\delta t)$ , где  $o(\delta t)$  – величина более высокого порядка малости по сравнению с  $\delta t$ , которой обычно в дальнейшем пренебрегают,  $n$  – коэффициент пропорциональности;

3) вероятность двух или большего числа событий за тот же промежуток времени  $(t, t + \delta t)$  равна нулю.

Далее, исходя из этих предположений, составляются дифференциальные уравнения, решением которых является уравнение распределения Пуассона (2.6):

$$p_k(\mu) = \exp(-\mu) \frac{\mu^k}{k!}, \quad (2.6)$$

где  $\mu = nt$ .

Данный тип распределения характеризуется только одним параметром  $\mu$ , принимающим любые положительные значения, в то время как  $k$  может принимать только целочисленные положительные значения. Из рисунка 2.2 видно, что распределение Пуассона асимметрично.

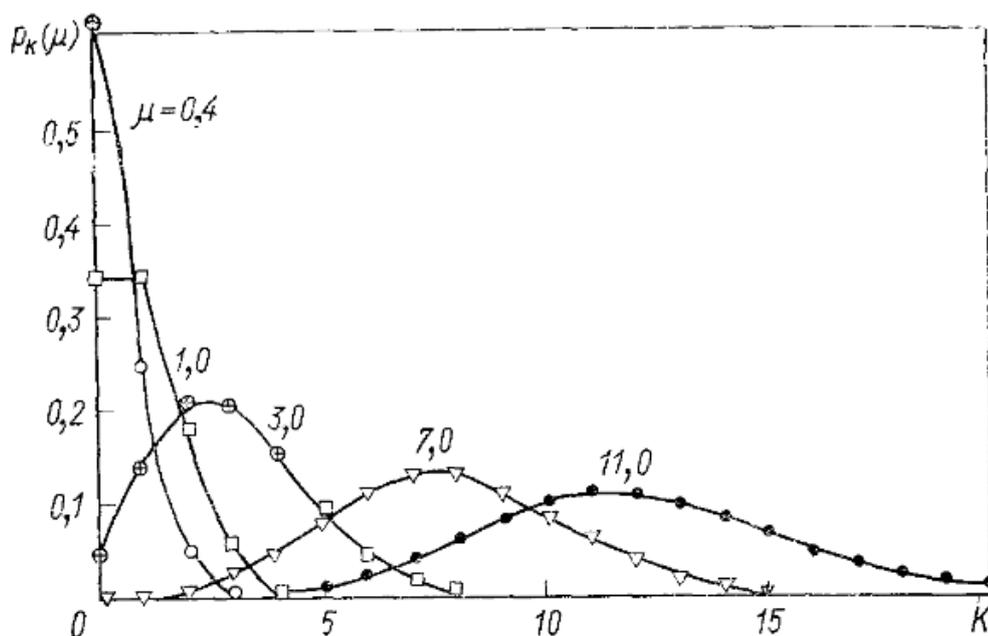


Рисунок 2.2 – Распределение Пуассона при различных значениях параметра  $\mu$

Наиболее важным распределением, которое чаще всего встречается в статистике, является распределение Гаусса (нормальное распределение). Данное распределение имеет вид (2.7):

$$p(x) = \left( \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right) \exp \left( -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right). \quad (2.7)$$

Распределение Гаусса зависит от двух параметров  $\mu$  и  $\sigma$ . График распределения имеет симметричную форму и представлен на рисунке 2.3.

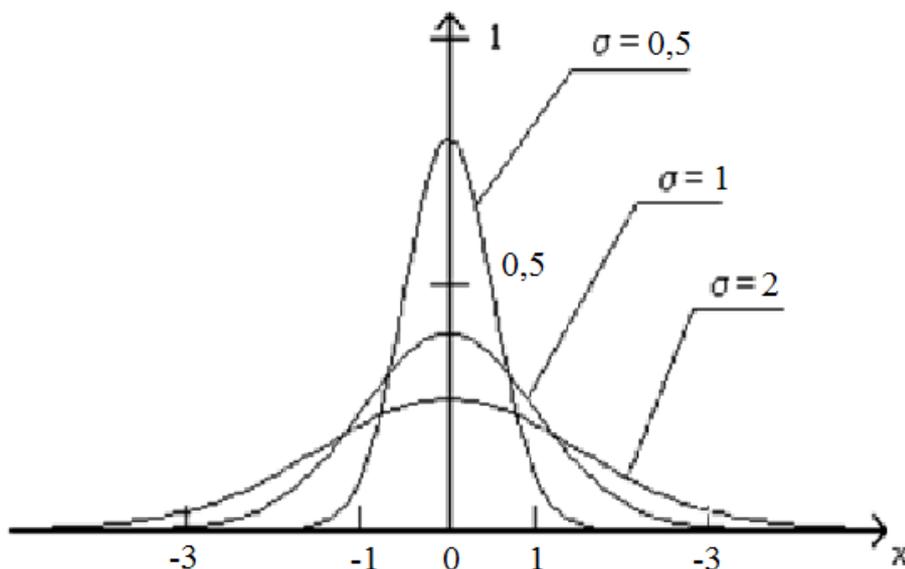


Рисунок 2.3 – Распределение Гаусса при различных значениях параметра  $\sigma$

В гамма-спектрометрии пики полного поглощения описываются кривой Гаусса. При проведении анализа очень важно достоверно определить положение центроиды пика, которая является его осью симметрии. Особенно актуальной эта задача является при проведении анализа сложных по составу проб. Центроида, полученная с помощью подгонки функции Гаусса к верхней части пика, достаточно точно определяет его положение [3]. Нужно обратить внимание, что пики полного поглощения повторяют форму гауссиана не точно. В случае использования германиевых детекторов отклонение заметить трудно, но при использовании низкоэнергетических спектрометров эти отклонения становятся видны в виде избыточного числа отсчетов на низкоэнергетической стороне пика. Иногда подобная картина может наблюдаться и в высокоэнергетической части спектра.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Проведение оценки коммерческой ценности исследования представляет собой важную составляющую проекта. Благодаря процедуре оценки можно судить о востребованности данного исследования на том или ином рынке, его цене, сроках внедрения и т.д. Исходя из этого, цель написания данного раздела – попытка оценить и обосновать конкурентоспособность рассматриваемого проекта, который отвечал бы современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения экспериментов с использованием SWOT-анализа**

SWOT-анализ – простой и качественный инструмент для оценки конкурентоспособности проекта. Он представляет собой комплексный метод, суть которого заключается в анализе внешней и внутренней среды научно-исследовательского проекта. Аббревиатура SWOT обязана своим происхождением четырем англоязычным словам: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы). На основе анализа этих четырех критериев составляется общий анализ проекта.

Первый этап SWOT-анализа заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде [5].

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. В рамках данного этапа строится интерактивная матрица проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT.

Последний этап заключается в составлении итоговой матрицы SWOT-анализа проекта, представленной в Приложении В.

## 4.2 Планирование работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения исследований.

В таблице 4.1 представлен перечень этапов, работ и распределение исполнителей по данным видам работ

Таблица 4.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор направления исследования	1	Формулировка темы ВКР	Руководитель
Подготовительный этап	2	Составление и утверждение задания	Руководитель
	3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Обзор материалов по теме	Студент
	5	Изучение принципов работы детекторов	Студент
	6	Проведение серий экспериментов	Руководитель, студент
		Анализ полученных результатов	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	8	Обоснование применимости на практике полученных результатов	Руководитель, студент
Оформление ВКР	9	Составление и оформление ВКР	Студент

### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Зачастую основная часть стоимости проекта образуется за счет трудовых затрат, поэтому важным является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к.

зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется формула (4.1):

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{\min\ i} + 2t_{\max\ i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -той работы, чел.-дн.;

$t_{\min\ i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\max\ i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Расчет продолжительности работы проводится с использованием формулы (4.2):

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

#### 4.2.3 Разработка графика проведения исследования

Для удобства и наглядности график проведения исследования представлен в форме диаграммы Ганта. График представляет собой протяженные во времени отрезки, характеризующиеся датами начала и окончания выполнения данных работ.

Длительность каждого из этапов работ следует перевести в календарные дни, используя формулу (4.3):

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле (4.4):

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})} = \frac{366}{366 - 119} = 1,48, \quad (4.4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Все рассчитанные значения представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Временные показатели выполнения выпускной квалификационной работы

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\text{min}}$ , чел-дни	$t_{\text{max}}$ , чел-дни	$t_{\text{ож.}}$ , чел-дни			
Формулировка темы ВКР	1	3	1,8	Руководитель	1,8	3
Составление и утверждение задания	1	3	1,8	Руководитель	0,9	1
Календарное планирование работ по теме	1	2	1,4	Руководитель	1,4	2
Обзор материалов по теме	9	15	11,4	Студент	11,4	17
Изучение принципов работы детекторов	7	10	8,2	Студент	8,2	12
Проведение серий экспериментов	55	60	57	Руководитель, студент	28,5	42
Анализ полученных результатов	11	14	12,2	Руководитель, студент	6,1	9
Обоснование применимости на практике полученных результатов	7	10	8,2	Руководитель, студент	4,1	6
Составление и оформление ВКР	20	25	22	Студент	22	33

На основе данных из таблицы 4.2 был построен календарный план-график, представленный в таблице 4.3. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках ВКР с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. Каждому исполнителю работ соответствует своя штриховка.

Таблица 4.3 – Календарный план-график ВКР в виде диаграммы Ганта

№ работ	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				февр.		март			апрель			май			июнь			
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Формулировка темы ВКР	Руководитель	3	■														
2	Составление и утверждение задания	Руководитель	1	■														
3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	2	■														
4	Обзор материалов по теме	Студент	17		■													
5	Изучение принципов работы детекторов	Студент	12			■												
6	Проведение серий экспериментов	Руководитель, студент	42				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7	Анализ полученных результатов	Руководитель, студент	9										■	■				
8	Обоснование применимости на практике полученных результатов	Руководитель, студент	6										■	■				
9	Составление и оформление ВКР	Студент	33														■	■
				■	руководитель													
				■	студент													

### 4.3 Бюджет исследования

Основными видами расходов, связанных с выполнением выпускной квалификационной работы, являются материальные затраты, основная заработная плата исполнителей, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления), накладные расходы.

#### 4.3.1 Расчет материальных затрат исследования

В качестве материалов, стоимость которых включается в бюджет исследования, могут быть оценены:

- сырье и материалы, которые приобретаются со стороны и являются необходимыми для разработки проекта;
- материалы для контроля над технологическим процессом;
- запасные части для ремонта оборудования;
- износ спецодежды;
- материалы, которые используются в дальнейшем в качестве исследований (испытаний) и для эксплуатации;
- канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п.

Расчет материальных затрат осуществляется по формуле (4.5):

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх } i}, \quad (4.5)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх } i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента ( $k_T$ ), отражает соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение. Транспортные расходы

принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Материальные затраты ВКР

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Халат	шт.	4	456	1824
Жидкий азот	литр	60	30	1800
Канцелярские товары:	шт.			
– блокнот		1	120	120
– шариковая ручка		2	20	40
– карандаш		1	22	22
Итого				3806

#### 4.3.2 Основная заработная плата исполнителей работ

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением исследования.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.6)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года (для 6-дневной недели при отпуске в 48 рабочих дней  $M=10,4$  месяца);

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Значения действительного годового фонда рабочего времени для каждого исполнителя представлены в таблице 4.5.

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{ТС}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.7)$$

где  $Z_{\text{ТС}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 для города Томска.

Полученные расчетные значения основной заработной платы приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.5 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней	119	119
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	62
– невыходы по болезни	6	6
Действительный годовой фонд рабочего времени, раб.дн.	193	176

Таблица 4.6 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Должность	$k_T$	$Z_{тс}$ , руб.	$Z_M$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	Ассистент	1,3	14584,32	18959,616	1021,658	42,8	43727
Студент	УВП 1	1,3	6976,22	9069,086	535,9	80,3	43033
Итого							86760

### 4.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) и накладные расходы

По установленным законодательством Российской Федерации нормам обязательными отчислениями являются отчисления органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников [6].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из формулы (4.8):

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{осн}, \quad (4.8)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1

ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды для руководителя проекта составляют 11850 рублей, для студента – 11662 рубля.

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по формуле (4.9):

$$Z_{\text{накл}} = (Z_{\text{М}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot k_{\text{нр}} \quad (4.9)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы ( $k_{\text{нр}} = 16\%$ ).

#### **4.3.4 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта**

Рассчитанная величина затрат является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Расчет бюджета затрат выпускной квалификационной работы

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты НИИ	3806
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	86760
Отчисления во внебюджетные фонды	23512
Накладные расходы	18252,48
Бюджет затрат НИИ	132330,48

Бюджет выпускной квалификационной работы составляет 132330,48 рублей.

## Список публикаций студента

1. Features of radioactive waste management at nuclear power plant [текст] / Tatiana Yeremeyeva, Boris Stepanov // Young Scholars Interdisciplinary Forum “Addressing Emerging Nonproliferation Challenges” / International Conference “XXI Century: Nuclear Technologies and Nonproliferation Problems”, Astana, Kazakhstan, 2015. – Астана, 2015. – С. 35.

2. Еремеева Т. А. Влияние статистического набора данных на погрешность определения площади пика в гамма-спектрометрии [текст] / Т. А. Еремеева, С. С. Чурсин // Материалы XXI всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность» / Томский политехнический университет, Томск. – Томск, 2015. – 2 Т. – С. 268-269.

3. Еремеева Т. А. Определение статистической погрешности для полупроводникового и сцинтилляционного гамма-спектрометров [текст] / Т. А. Еремеева, С. С. Чурсин // Материалы XI (XLIII) Международной научно-практической конференции «Образование, наука, инновации: вклад молодых исследователей» / Кемеровский государственный университет. – Кемерово, 2016. – С. 768-769.

4. Еремеева Т. А. Определение допуска по энергии для ОЧГ спектрометра в зависимости от статистического набора данных [текст] / Т. А. Еремеева, С. С. Чурсин // Сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине». – Томск, 2016. – С.190-191.