

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Бушама Лазхар

**Моделирование и применение детектора на основе тонкого
сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$ для регистрации тепловых
нейтронов природного и искусственного происхождения**

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (НИЯУ МИФИ).

**Научный
руководитель**

кандидат физико-математических наук,
Национальный исследовательский ядерный университет
“МИФИ”, доцент
Дмитриева Анна Николаевна

**Официальные
оппоненты**

доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской акаде-
мии наук, главный научный сотрудник
Стожков Юрий Иванович

доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение “Ин-
ститут теоретической и экспериментальной физики имени
А.И. Алиханова” Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”, начальник лаборатории
Титаренко Юрий Ефимович

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский государ-
ственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-
исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Ско-
бельцына, заведующий лабораторией
Меркин Михаил Моисеевич

Защита состоится “07” апреля 2021 г. в 15 час 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 федерального государственного образовательного учреждения высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <https://ds.mephi.ru> федерального государственного образовательного учреждения высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”.

Автореферат разослан “___” _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



Сергей Евгеньевич Улин

Общая характеристика работы

Актуальность

Бурное развитие ядерных технологий в получении энергии, медицине, промышленности, науке и т.д. требует более качественного контроля за перемещением и применением ядерных материалов, поскольку их незаконное или неправильное использование может привести к угрозе жизни людей и окружающей среды. МАГАТЭ заявило, что первоочередной задачей является “разработка приборов и связанных с ними методов для обнаружения создания и деятельности связанных с ядерным топливным циклом, например, путем регистрации излучения”. Поэтому на сегодняшний день весьма актуальным является мониторинг малых потоков нейтронов за пределами защиты разных искусственных источников с целью обеспечения безопасности человека и окружающей среды. Не менее важен мониторинг естественного нейтронного фона как с целью обеспечения безопасности человека, так и с целью решения различных прикладных и фундаментальных задач по астрофизике, геофизике, климату и т.д.

Еще не так давно нейтронный детектор, основанный на гелии (^3He), был самым используемым детектором среди других для регистрации нейтронов, и в том числе для мониторинга нейтронов за длительные периоды, благодаря его привлекательным характеристикам. На сегодняшний день он является стандартом для калибровки других нейтронных детекторов. Но после 2001 г. гелий стал недоступен на рынке из-за кризиса его производства, вследствие этого стал приоритетным поиск альтернативного нейтронного детектора. Кроме того в настоящее время для всех детекторов нейтронов при регистрации малых потоков существует проблема фона заряженных частиц и гамма-квантов, которая может привести к неверному измерению скорости счета нейтронов. Для решения этой проблемы необходим нейтронный детектор с высоким отношением сигнала к шумам.

Относительно недавно группой из ИЯИ РАН под руководством Ю.В. Стенькина был предложен новый электрон-нейтронный детектор большого размера на основе специального неорганического сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})+^6\text{LiF}$ для изучения нейтронной компоненты в широких атмосферных ливнях (ШАЛ). Благодаря тонкому слою сцинтиллятора $\sim 30 \text{ мг/см}^2$ (мюоны и электроны теряют в нем всего лишь 0.06 МэВ), рекордному α/e -соотношению и рекордному световыходу, сигнал от захваченного нейтрона надежно выделяется на фоне меньших сигналов от электронов, мюонов и других заряженных частиц, а также гамма-квантов.

К настоящему времени на основе такого сцинтиллятора создан ряд установок – ПРИЗМА-32 и Нейтрон в экспериментальном комплексе (ЭК) НЕВОД (НИЯУ МИФИ, Россия), установки PRISMA-YGB и PRISMA-LHNASO (в процессе создания) в Тибете, Китай.

Данный детектор отлично подходит для одновременного измерения естественного нейтронного фона и поиска различных слабых и мощных источников нейтронов искусственного происхождения (мониторинг ядерных установок, перемещение радиоактивных материалов особенно через границу государства и т.п.). Для решения этой задачи необходимо создать математическую модель данного детектора для определения его эффективности и оптимизации применения для указанных выше целей.

Цели работы

Создание математической модели нейтронного детектора на базе тонкого сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$, оценка его чувствительности для мониторинга естественных и искусственных источников нейтронов и экспериментальная проверка.

Научная новизна

1. Впервые проведена калибровка нейтронной части программного пакета Geant4 по реакторному коду Serpent и выделены наилучшие модели описания взаимодействия и распространения нейтронов в веществе.
2. Впервые создана математическая модель нейтронного детектора на основе тонкого сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$ с учетом всей совокупности процессов регистрации нейтрона, начиная с его замедления и захвата, и заканчивая формированием сигнала ФЭУ.
3. Впервые на сцинтилляционных ($\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$) нейтронных детекторах измерены амплитуды суточных волн в различные сезоны в потоке нейтронов космических лучей и амплитуды форбуш-понижений за период 2015 – 2019 гг.

Достоверность

Достоверность результатов обеспечена использованием признанного в международном научном сообществе программного пакета Geant4, который был прокалиброван кодом Serpent (для оценки корректности описания физических процессов). Экспериментальная проверка модели нейтронного детектора осуществлялась с использованием паспортизированного источника нейтронов калифорний-252.

Оценка эффективности детектора для контроля перемещения радиоактивных материалов через границу государства проводилась согласно рекомендациям МАГАТЭ, лаборатории PNNL и института ANSI.

Оценка естественного нейтронного фона проводилась по данным четырех детекторов установки “Нейтрон”, данные о температуре получены с прецизионной и сертифицированной станции Vaisala и данные по выпавшим осадкам – из архива погоды метеостанции ВДНХ ВВЦ.

Характеристики Форбуш-эффектов, определенные по данным детекторов “Нейтрон” хорошо согласуются с характеристиками Форбуш-эффектов, полученными по экспериментальным данным Московского нейтронного монитора (МНМ) и мюонного годоскопа УРАГАН, расположенных близко друг к другу.

Практическая значимость

Проведенная калибровка нейтронной части программного обеспечения Geant4 и обоснование выбора моделей, наилучшим образом описывающих прохождение нейтронов через вещество, открывают путь для широкого использования Geant4 для моделирования различных экспериментов и детекторов, предназначенных для регистрации нейтронов в научных, промышленных, охранных и других целях.

Созданная математическая модель сцинтилляционного нейтронного детектора на основе $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$ позволяет разрабатывать рекомендации по размещению таких детекторов в местах расположения ядерных установок, на пунктах въезда в страну, на предприятиях по изготовлению и/или применению радиоактивных материалов, для увеличения эффективности их мониторинга, а также в установках для изучения нейтронной компоненты ШАЛ и в других экспериментальных комплексах.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно провел сопоставление нейтронной части программного пакета Geant4 и реакторного кода Serpent, разработал математическую модель детектора нейтронов на основе тонкого сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$, промоделировал его применение для мониторинга различных источников нейтронов. Автор внес определяющий вклад в анализ экспериментального материала (исключение периодов нестабильной работы установки, корректировка данных на барометрический эффект, подготовка сглаженных временных рядов и т.д.). Автором написан комплекс программ для обработки экспериментальных данных (расчет параметров ФЭ, реализация метода наложения эпох для поиска суточных циклов и т.д.). Автор принимал активное участие в подготовке статей, текстов докладов и их представлении на конференциях.

Автор защищает

1. Результаты совместного моделирования распространения и замедления нейтронов в разных средах (воздух, вода и бетон) на основе Geant4 и Serpent и выбор лучших моделей для описания распространения нейтронов в пакете Geant4.
2. Созданную математическую модель нейтронного детектора на основе тонкого сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$ в программном пакете Geant4.
3. Результаты экспериментальной калибровки модели детектора на стенде с использованием калифорния-252.
4. Результаты моделирования регистрации нейтронов от разных источников нейтронного излучения Cf-252, Pu-240 и AmBe.
5. Результаты исследования вариаций потока нейтронного фона, генерируемого космическими лучами.

Апробация работы

Результаты работы представлены на российских и международных конференциях: Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных “Ломоносов 2018” и “Ломоносов 2019”, XV Международной конференции “Безопасность АЭС и подготовка кадров” 2018, VIII Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий” МИФИ 2019, 11-й международной научно-технической конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР” МНТК 2019, the 2nd International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics (ISCRA-2019), Всероссийской конференции по космическим лучам 2020, The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2020).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы, включающего 141 источник. Общий объем работы составляет 122 страницы, содержит 57 рисунков и 13 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается важность и актуальность мониторинга источников нейтронов искусственного и естественного происхождения,

приведено описание различных используемых детекторов и методов. Рассматривается хронология создания сцинтилляционного детектора на основе тонкого сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$, его особенности и основные области применения. Сформулированы цель, научная новизна и актуальность данной работы, а также выносимые на защиту результаты.

В главе 1 приводится описание подхода и выбора программного пакета для моделирования отклика неэкранированного нейтронного детектора на основе сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$, а также калибровки кодов, применяемых при моделировании процессов замедления и распространения нейтронов в этом пакете.

Выбор подходящего кода для проведения любого моделирования играет ключевую роль в достижении результатов исследования. На сегодняшний день существует ряд кодов для моделирования переноса частиц через вещество, их применение зависит главным образом от задачи – типа и диапазона энергий моделируемых частиц, необходимых физических процессов и особенностей геометрии. Для выполнения данной работы, которая включает в себя создание математической модели нейтронного детектора а также исследование возможности применения детектора для мониторинга различных источников нейтронов, был выбран программный пакет Geant4. Выбор основан на накопленном опыте многих научных работ, в которых было доказано что Geant4 является подходящим кодом для моделирования интересующих нас физических процессов – сцинтилляции, транспорта оптических фотонов, распространения и замедления нейтронов. Для проверки описания физических процессов для нейтронов в качестве эталона был выбран реакторный код Serpent, имеющий общие с кодом Geant4 характеристики – их библиотеки сечений основаны на преобразованных файлах ядерных данных ENDF и содержат модели термализации тепловых нейтронов для большинства замедляющих элементов.

С целью проверки корректности описания физических процессов взаимодействия нейтронов с веществом в Geant4 проведено моделирование в обоих кодах распространения нейтронов в трех средах – в воде, в бетоне и в воздухе. Были использованы одинаковые геометрия и состав вещества. Заданная геометрия – это сфера с разными радиусами: 5 см, 10 см, 20 см и 40 см для воды и бетона, и 300 м, 500 м и 1000 м для воздуха.

Для более детального моделирования было использовано два типа источника нейтронов – точечный моноэнергетический источник с энергией, равной 2 МэВ, и источник спонтанного деления калифорний-252 с соответствующим спектром по энергии.

В обоих кодах был рассчитан поток нейтронов на поверхности каждой сферы, причем после пересечения границы сферы нейтрон останавливался и уничтожался. На рисунке 1 слева показаны спектры нейтронов полученные в бетоне, кривые приведены с соответствующими множителями. Справа

показано отклонение результатов расчета в Geant4 от расчетов в Serpent.

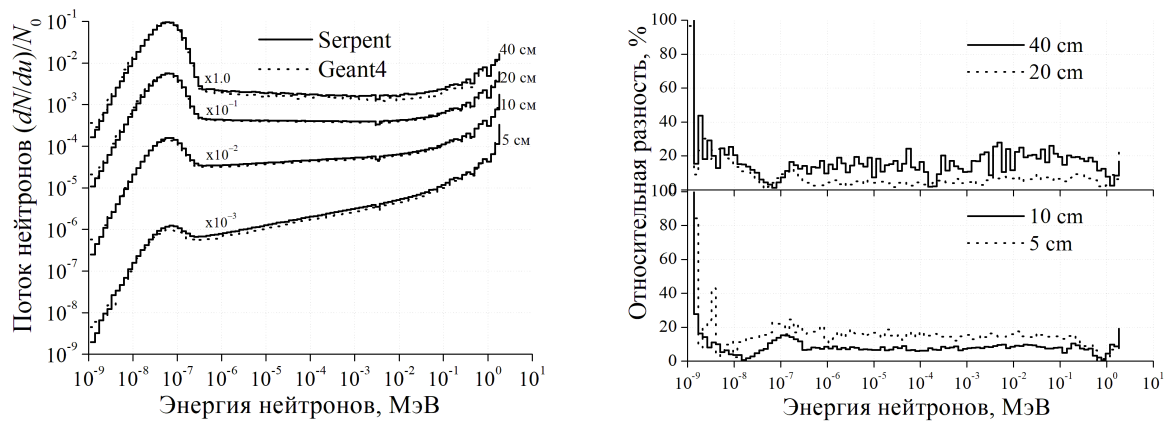


Рис. 1. Слева – сравнение рассчитанных в Geant4 и Serpent потоков нейтронов в бетоне, справа – отклонение результатов расчета в Geant4 от расчетов в Serpent.

Результаты сравнения распространения и замедления нейтронов в кодах Geant4 и Serpent в разных средах в случае использования моноэнергического источника с энергией 2 МэВ, показали топологическое совпадение. Такие же результаты были получены при использовании источника Cf-252. Проведенное сравнение потоков нейтронов, рассчитанных с помощью разных моделей описания физических процессов в Geant4, с полученными с помощью Serpent, позволило выбрать наиболее точные для поставленной задачи модели – QGSP_BERT_HP и QGSP_BIC_HP.

В главе 2 описывается конструкция нейтронного детектора на основе тонкого сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$ и процесс создания его модели в коде Geant4. Приводятся результаты проверки корректности работы разработанной модели.

На сегодняшний день данный детектор применяется для регистрации нейтронов, образовавшихся при прохождении широких атмосферных ливней, а также для мониторинга нейтронного фона вблизи поверхности Земли. Конструкция детектора представлена на рисунке 2 где: 1 – сцинтиллятор $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$, 2 – корпус, 3 – фотоумножитель ФЭУ-200, 4 – крышка и 5 – светособирающий конус.

Преимущество данного детектора – применение неорганического сцинтиллятора, представляющего собой гранулированный сплав кристаллов на основе порошка $\text{ZnS}(\text{Ag})$ с примесью лития, обогащенного до 90% ${}^6\text{Li}$, в виде тонкого слоя ($\sim 30 \text{ мг/см}^2$), что уменьшает его чувствительность к одиночным заряженным частицам и гамма-излучению. Принцип отклика в данном сцинтилляторе основан на методе регистрации заряженных частиц – трития

и альфа-частицы, образующихся при захвате нейтрона ${}^6\text{Li}$, в результате которого в сцинтилляторе образуется порядка ~ 160000 фотонов:

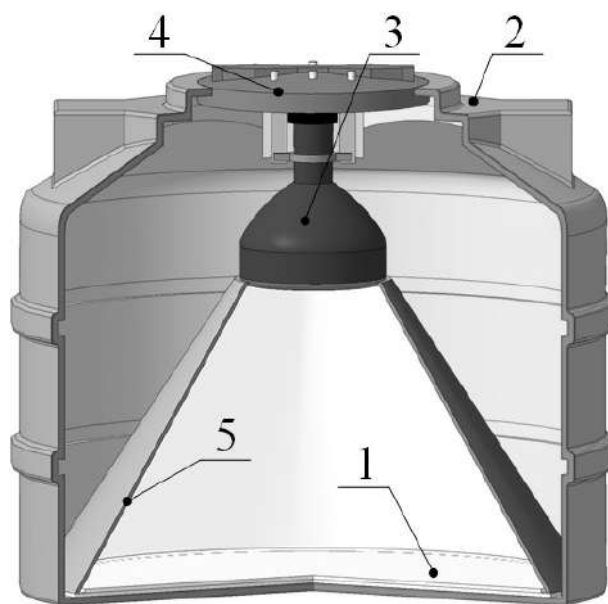
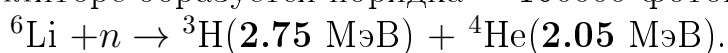


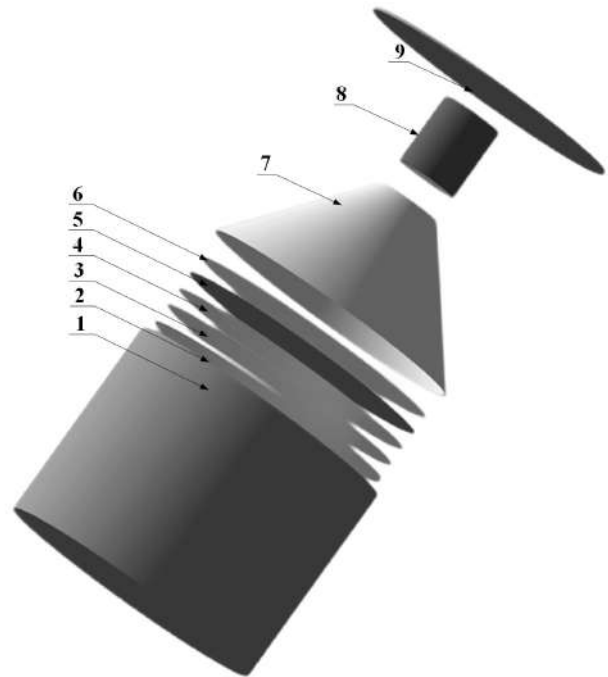
Рис. 2. Конструкция нейтронного детектора.

В программном пакете (ПП) Geant4 была создана модель детектора (см. рисунок 3): задана геометрия с учетом размеров и состава материалов детектора, прописаны оптические свойства материалов и поверхностей, для сцинтиллятора заданы требуемые параметры. Также было подключено описание всех необходимых физических процессов для первичных и вторичных частиц. Был создан генератор частиц, позволяющий запускать первичные частицы со спектром, близким к реальному. Визуализация созданной геометрической модели детектора тепловых нейтронов в ПП Geant4 представлена на рисунке 3, где: 1 – корпус, 2, 3 и 6 – полиэтиленовый слой, 4 – белая бумага, 5 – сцинтиллятор $\text{ZnS}(\text{Ag}) + {}^6\text{LiF}$, 7 – светособирающий конус, 8 – фотоумножитель ФЭУ-200 и 9 – крышка.

Промоделирован отклик фотоумножителя ФЭУ-200: разыгран фотоэффект на фотокатоде с учетом его квантовой эффективности, для зарегистрированных фотоэлектронов разыграна амплитуда отклика ФЭУ-200.

Проведена проверка разработанной модели детектора с использованием экспериментальных данных, полученных на стенде с применением источника нейтронов Cf-252. Перед началом эксперимента было проведено моделирование различных параметров эксперимента, в том числе рассмотрена разная толщина замедлителя, окружающего источник Cf-252, для обеспечения максимального числа регистрируемых тепловых нейтронов. Выбрано ее оптимальное значение, которое затем использовалось в эксперименте.

Рис. 3. Геометрическая модель детектора тепловых нейтронов в коде Geant4.



На рисунке 4 представлена схема экспериментального стенда, состоящего из нейтронного детектора, источника нейтронов – калифорния-252 и необходимой электроники – источника питания (HV), интегратора усилителя, аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Источник нейтронов располагался внутри замедляющего контейнера и был размещен на глубине 10 см от верхней поверхности контейнера.

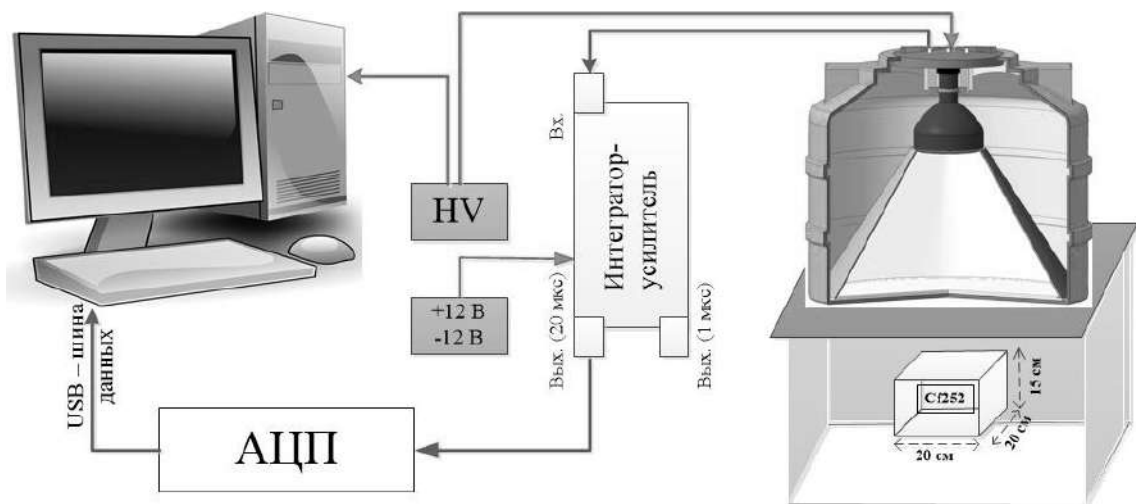


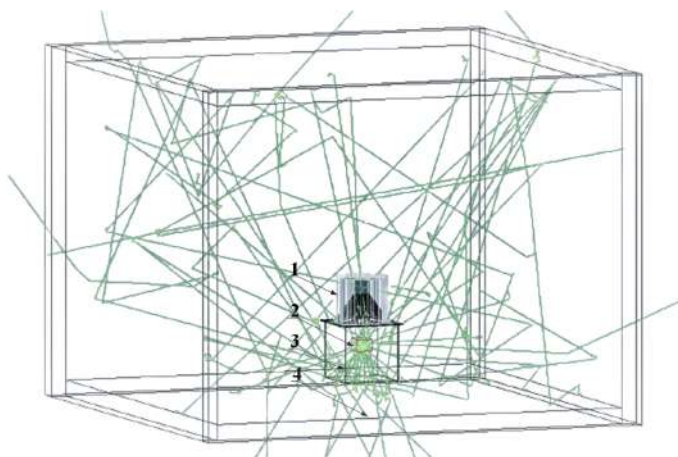
Рис. 4. Схема экспериментального стенда для калибровки модели нейтронного детектора.

На экспериментальном стенде измерена скорость счета нейтронов детектором при расположении источника Cf-252 на разных расстояниях от детектора. Естественный фон, регистрируемый стендом в течение суток до измерения указанной зависимости, составил 0.431 ± 0.004 н/с.

Модель экспериментального стенда, созданная в Geant4 (см. рисунок 5),

состоит из: нейтронного детектора, контейнера источника Cf-252, стола, на котором размещен детектор, и помещения.

Рис. 5. Визуализация распространения нейтронов Cf-252 в модели стенда:
1) нейтронный детектор,
2) контейнер источника Cf-252,
3) стол, 4) стены помещения.



В модели стенда была промоделирована скорость счета нейтронов с учетом условий проведения эксперимента. На рисунке 6 изображены скорости счета, полученные в эксперименте и в моделировании для разных расстояний от источника до детектора без и с учетом порога по числу фотоэлектронов (а) и отношение промоделированных данных к экспериментальным (б).

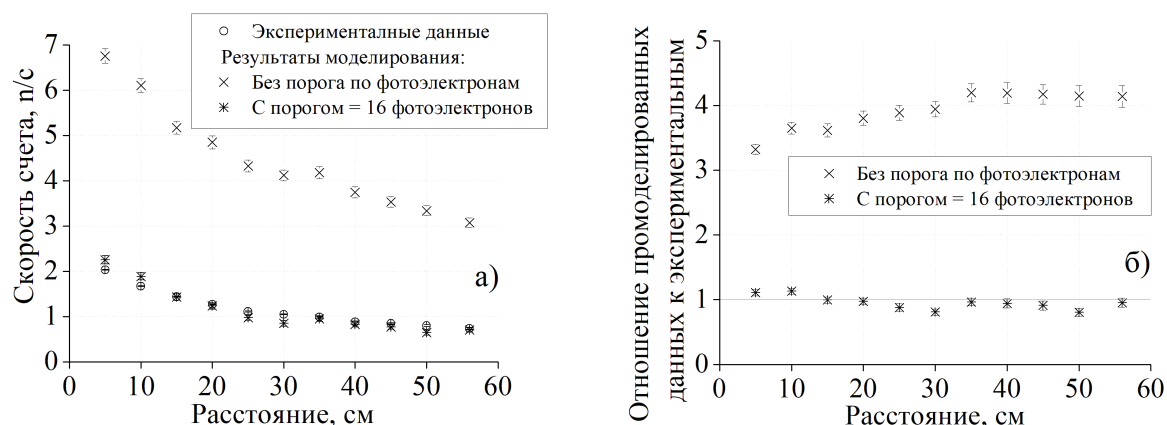


Рис. 6. а) Скорости счета нейтронов в эксперименте и моделировании без и с учетом порога по числу фотоэлектронов, б) отношение промоделированных данных к экспериментальным.

Сравнение результатов моделирования и эксперимента дает совпадение в пределах 9% по всем расстояниям с учетом порога по числу фотоэлектронов. Полученное совпадение приводит к утверждению корректности работы модели нейтронного детектора.

В главе 3 приводится проверка возможности применения рассматриваемого детектора для мониторинга состояния и/или перемещения источников нейтронного излучения. Для этого было проведено моделирование отклика

детектора для разных типов источников – слабых (Cf-252, AmBe и Pu-240) и мощного (Cf-252) с интенсивностями 1230 н/с и $2.4 \cdot 10^7$ н/с, соответственно. Моделирование отклика детектора в случае перемещающихся радиоактивных материалов (РМ) через границу государства проведено в соответствии с реальными условиями и рекомендациями разных организаций и лабораторий.

Модель (рисунок 7), созданная в ПП Geant4 для мониторинга перечисленных выше источников, состоит из окружающей среды (цилиндрической формы), основной объём которой заполнен воздухом, нижняя часть толщиной 2 м заполнена грунтом, 100 нейтронных детекторов расположены по радиусу от центра с шагом 2 м прямо на грунте, в центре модели размещен источник нейтронов.

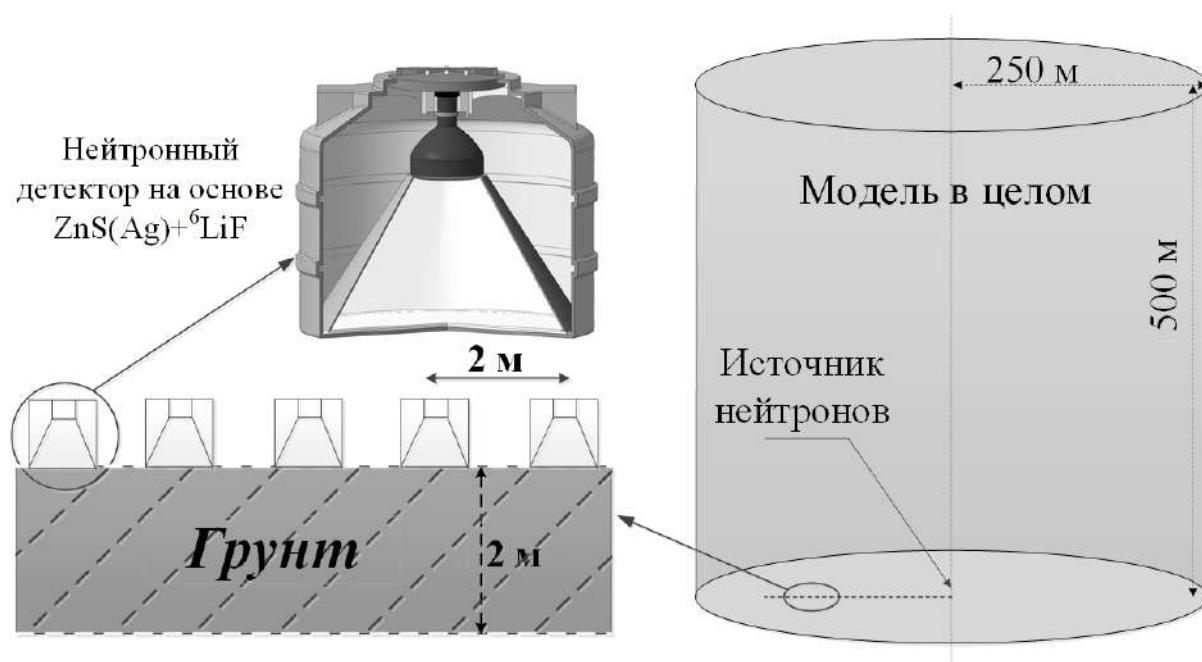


Рис. 7. Модель для моделирования мониторинга нейтронов.

Результаты моделирования отклика детектора при мониторинге слабых источников без замедлителя и с замедлителем вокруг них показаны на рисунке 8 (без вклада фоновых событий). Результаты моделирования отклика детектора при мониторинге слабых источников без замедлителя но с замедлителем вокруг детектора показаны на рисунке 9 (без вклада фоновых событий). Результаты моделирования отклика детектора при мониторинге мощного источника, окруженного защитой, (без вклада фоновых событий) показаны на рисунке 10.

Результаты моделирования отклика детектора при мониторинге различных источников, дают следующие выводы:

- отклик на источники без замедлителя на расстоянии 2 м примерно в 3 раза больше фонового значения (0.431 ± 0.004 н/с) и сравним со значением фона на расстоянии 4 м, при добавлении замедлителя к источникам, отклик снизился примерно в 2 раза;

- при добавлении замедлителя вокруг детектора (5 см полиэтилена) отклик на расстоянии 2 м становится примерно в 8 раз больше фона и сопоставим с фоном на расстоянии 6 м;
- в случае сильного источника с защитой на расстоянии 2 м детектор зарегистрировал превышение над величиной нейтронного фона примерно в 150 раз, при расстоянии 12 м – поток нейтронов превышает фон в два раза.

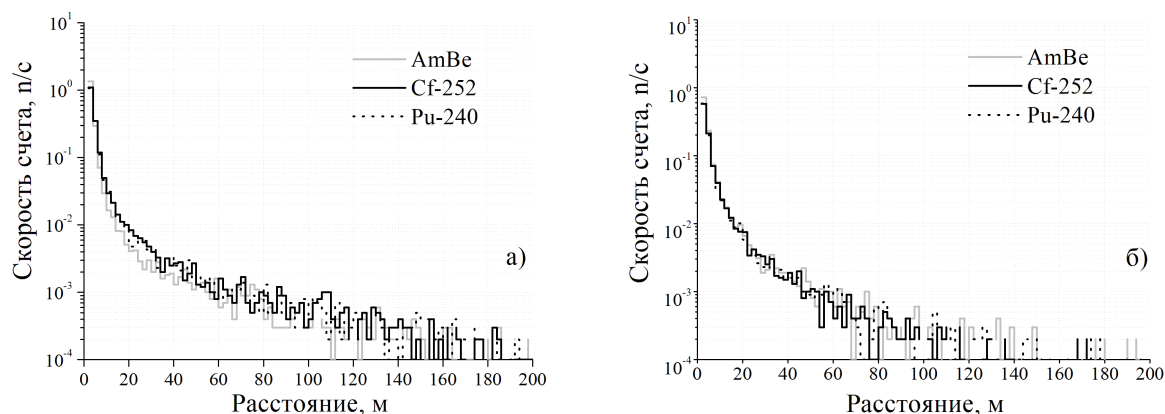


Рис. 8. Зависимость скорости счета нейтронов от расстояния от слабых источников без замедлителя (а) и с замедлителем (б) до детектора. Без вклада фоновых событий.

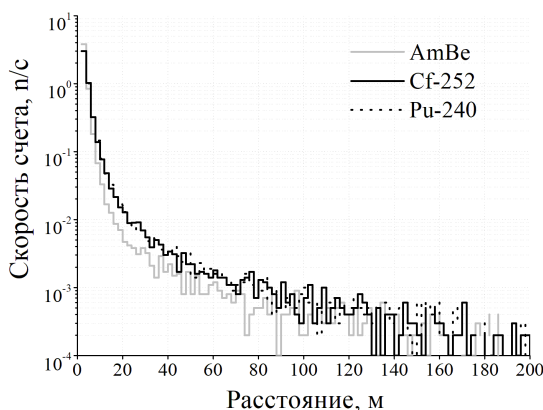


Рис. 9. Зависимость скорости счета нейтронов от расстояния от источника без замедлителя до детектора с добавленным замедлителем. Без вклада фоновых событий.

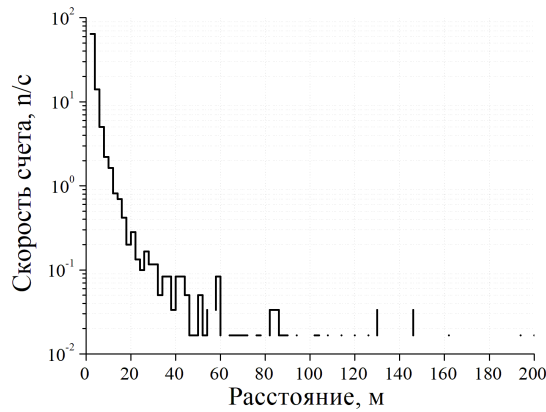


Рис. 10. Отклик нейтронного детектора при мониторинге мощного облучателя на основе калифорния-252. Без вклада фоновых событий.

Отклик детектора можно увеличить разными способами: добавить замедлитель нейтронов в конструкцию детектора (например, полиэтилен), увеличить размер сцинтиллятора, увеличить время экспозиции (мониторинга).

Проведена оценка эффективности детектора для регистрации нейтронов от перемещающихся через границу государства РМ двумя способами. Первый – по динамическим условиям в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, которые определяют чувствительность детектора следующим образом: детектор должен обнаружить прохождение источника Cf-252 интенсивностью 20000 п/с со скоростью 8 км/ч (для грузовика) и на расстояние 2 м. Второй способ по стационарным условиям, предложенный институтом ANSI и лабораторией PNNL, представляет собой упрощение первого способа следующим образом: детектор должен дать отклик больше порога в 2.5 импульса/с при мониторинге неподвижного источника Cf-252 массой 1 нг, находящегося на расстоянии 2 м от поверхности детектора. Детектор и источник находятся выше грунта на высоте 1.5 м.

Использование источника Cf-252 для проведения теста превышения порога объясняется незначительным отличием спектра нейтронов Cf-252 от спектра Pu-240 и Pu-239, за счет чего Cf-252 является идеальным кандидатом в качестве суррогата металла плутония.

Моделирование мониторинга РМ в стационарных условиях было проведено для разных условий защиты источника Cf-252, а также были рассмотрены случаи расположения детектора в горизонтальном положении (ГП) на высоте 1.5 м от грунта и в вертикальном положении (ВП) прямо на грунте. Результаты моделирования отклика детектора (без вклада фоновых событий) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты моделирования для проверки превышения порога мониторинга источника калифорний-252 в стационарных условиях.

Без вклада фоновых событий

Защита источника Cf-252	Скорость счета (п/с), (ВП)	Скорость счета (п/с), (ГП)
Полиэтилен (4 см)	7.25 ± 0.01	8.37 ± 0.01
Сталь (1 см) и Свинец (0.5 см)	4.43 ± 0.01	3.09 ± 0.01
Свинец (0.5 см) и Полиэтилен (2.5 см)	5.87 ± 0.01	5.77 ± 0.01

Стоит отметить, что в порог 2.5 имп/с входят и гамма-кванты, и нейтронный фон, при моделировании мониторинга РМ были рассчитаны только нейтроны от источника. т.е. применение указанной пороговой величины в 2.5 имп/с для данных моделирования является даже более жестким требованием, чем требуется ANSI и PNNL.

На рисунках 11 и 12 показаны результаты моделирования чувствительности детектора в динамических условиях.

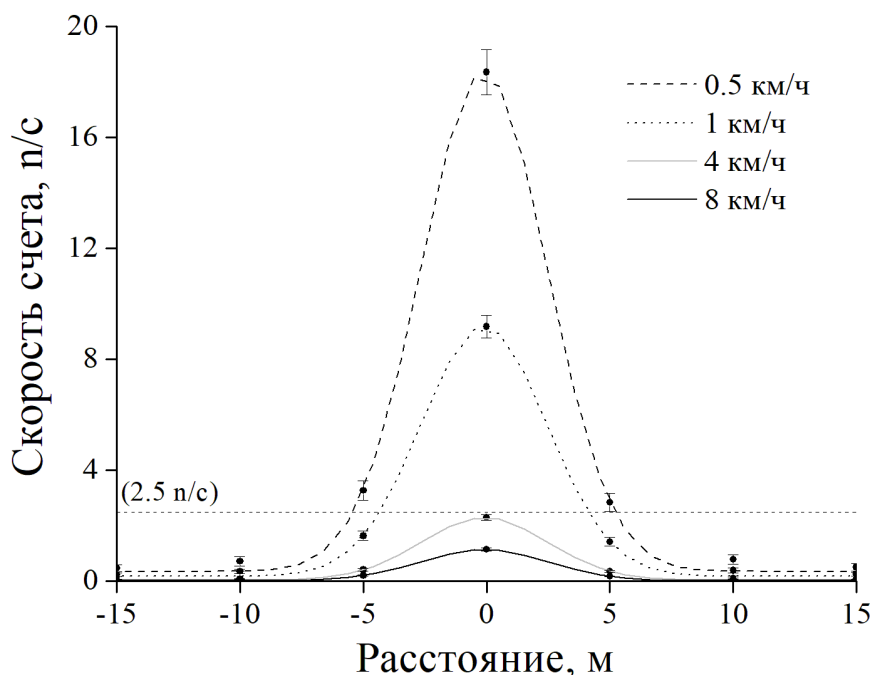


Рис. 11. Распределение скорости счета по пройденному расстоянию для разных скоростей источника (ВП детектора).

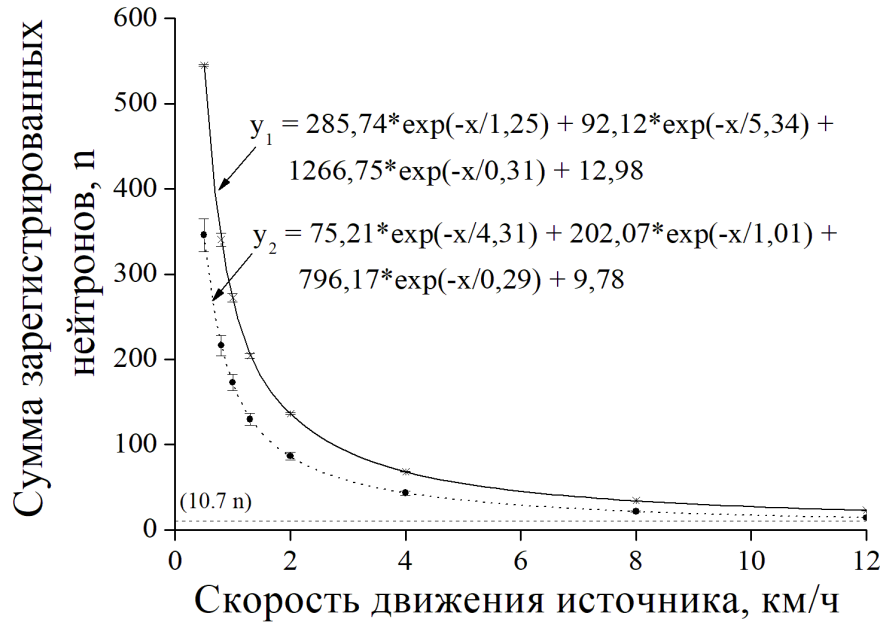


Рис. 12. Распределение суммы зарегистрированных нейтронов для общего пройденного расстояния по скорости источника при ВП (y_1) и ГП (y_2) детектора.

Моделирование мониторинга РМ по стационарным условиям дало скорость счета выше требуемого порога для разных защит источника Cf-252 и возможных положений детектора.

Моделирование перемещения источника по динамическим условиям дало для всех задаваемых скоростей источника, счет нейтронов выше выбранного порога в 10.7 n, соответствующего числу зарегистрированных нейтронов в случае скорости счета 2.5 импульс/с и скорости источника 8 км·ч⁻¹. Отличие результатов моделирования для вертикального и горизонтального расположений детекторов объясняется влиянием процесса отражения нейтронов от грунта, а также конструкцией детектора.

В главе 4 излагается описание результатов исследования вариаций нейтронного фона вблизи поверхности Земли с использованием экспериментальных данных установки “Нейтрон” за длительный период с мая 2015 г. по февраль 2019 г. Приведены результаты влияния метеопараметров – давления и температуры атмосферы вокруг детектора, высоты снежного покрова и количества осадков, а также результаты изучения форбуш-эффектов.

С 2010 года в ЭК НЕВОД в непрерывном режиме функционирует установка “Нейтрон”, предназначенная для регистрации потока тепловых нейтронов на поверхности Земли. Она состоит из четырёх одинаковых сцинтилляционных детекторов на основе ZnS(Ag)+⁶LiF, размещенных внутри здания НЕВОД на различных высотах от -3 м до 10.5 м от поверхности грунта и под

разной толщиной поглотителя.

Одним из основных метеопараметров, оказывающих влияние на поток нейтронов, является давление, поэтому перед исследованием влияния других параметров на концентрацию нейтронов необходимо ввести корректировку в текущую скорость счета. До введения поправки на давление (барометрический эффект), скорость счета нейтронов довольно сильно антикоррелирует с давлением, но после ее введения корреляция практически исчезает. Соответствующий вклад атмосферного давления в вариации потока нейтронов составляет порядка 0.85 %/мбар.

Поиск суточной волны, показывающей влияние температуры на скорость счета в течение суток (день/ночь), проводился методом наложением эпох за период, равный 24 часам (см. рисунок 13). По амплитуде более чувствительным оказался второй детектор, слабее всего экранированный веществом здания (2.16% против 0.40%, 0.34% и 0.97% для 1-го, 3-го и 4-го детектора, соответственно). Отличие откликов детекторов по большей части объясняется местом расположения каждого детектора внутри здания (разной экранировкой детекторов веществом здания).

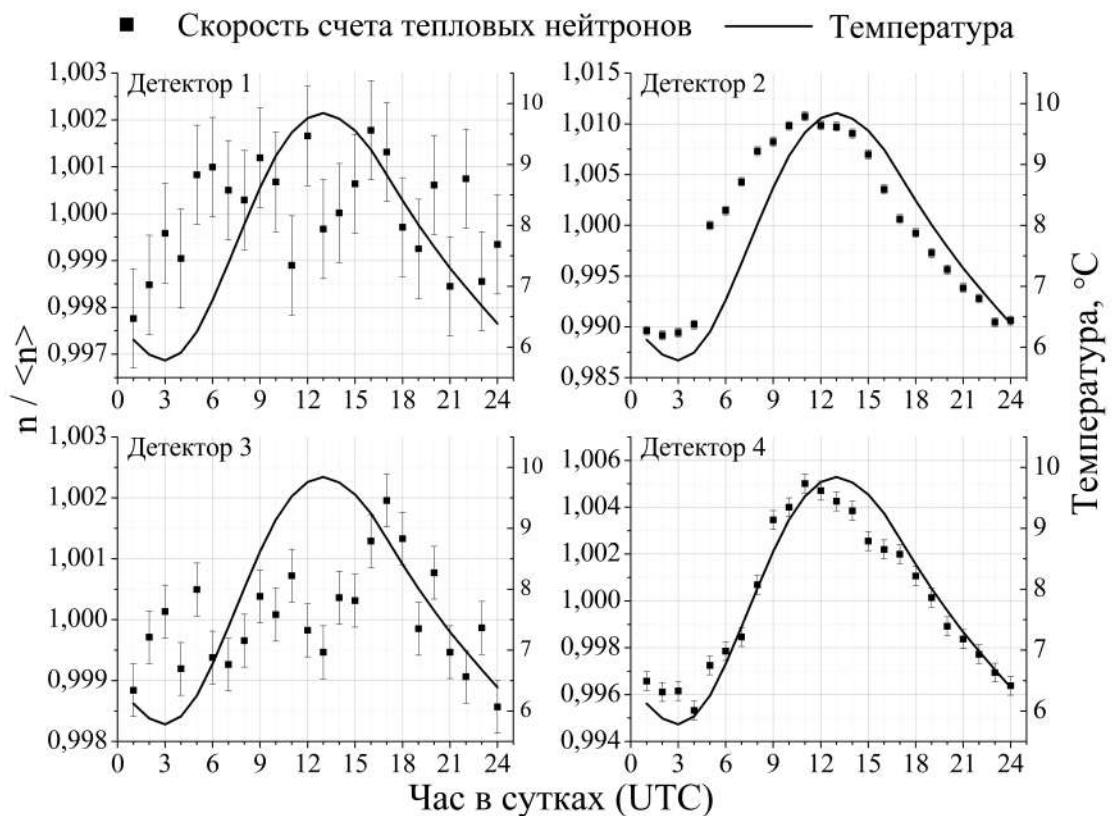


Рис. 13. Суточная волна скорости счета и температуры.

Поскольку второй детектор является более чувствительным, для него была рассмотрена сезонная зависимость скорости счета от температуры (см. рисунок 14). Для этого были построены суточные волны, рассчитанные для

каждого сезона, которые были выбраны следующим образом: лето – июнь, июль и август, осень – сентябрь, октябрь и ноябрь, зима – декабрь, январь и февраль, весна – март, апрель и май .

Рассмотрение соотношения амплитуда скорости счета – среднее значение температуры – амплитуда температуры для всех сезонов, дало следующие комбинации: летом (3.5%, 19.1°C, 6°C), весной (2.6%, 7.9°C, 5.2°C), осенью (1.5%, 6.3°C, 3.1°C), зимой (1.3%, -4.6°C, 1.5°C).

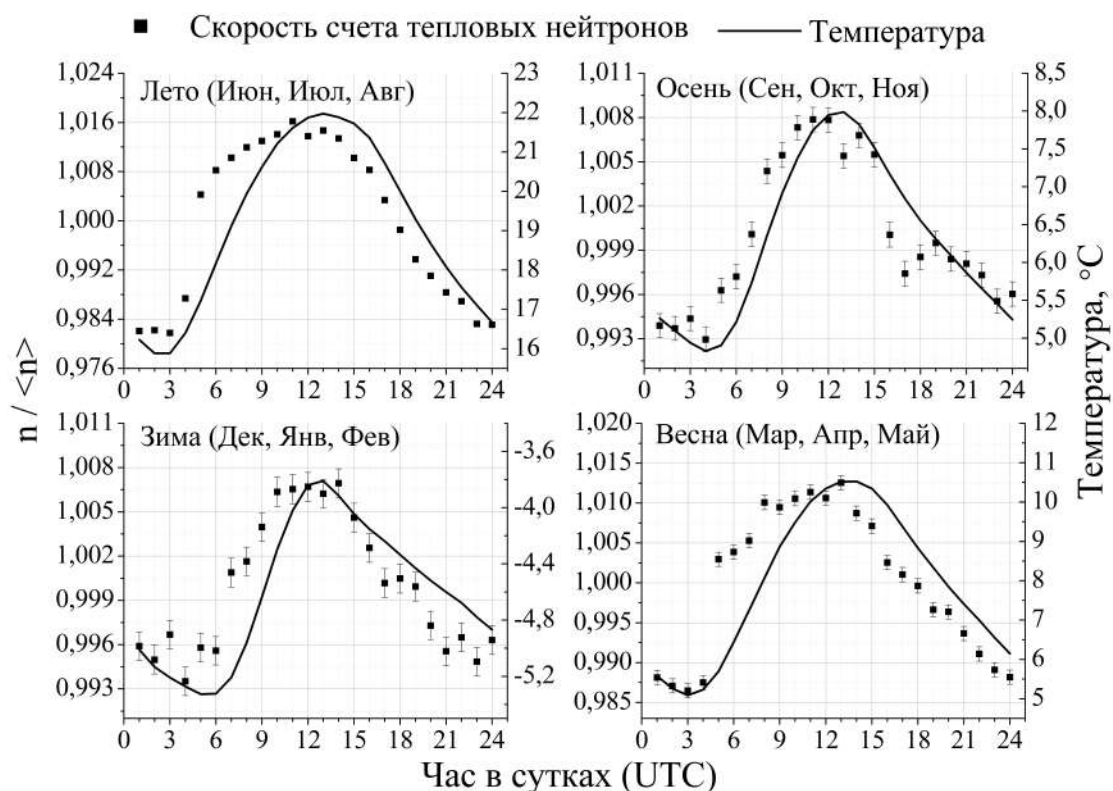


Рис. 14. Суточная волна скорости счета и температуры для каждого сезона года – лето, осень, зима и весна.

Таким образом, уменьшение амплитуд суточной волны для зимнего и осеннего сезона объясняется уменьшением амплитуд колебаний температуры, а также общим снижением температуры и большим количеством осадков, в частности снега.

Изучение влияния снежного покрова проведено для четырёх зим изучаемого периода. Явный эффект влияния снежного покрова наблюдался зимой 2017/2018 гг. (см. рисунок 15), в течение которой скорость счета снижалась на 20%. Для остальных детекторов эффект был слабее (5%, 10% и 10% для 1-го, 3-го и 4-го детектора соответственно). Наблюдалось также уменьшение скорости счета нейтронов после выпавших дождей, особенно если до этого была сухая погода.

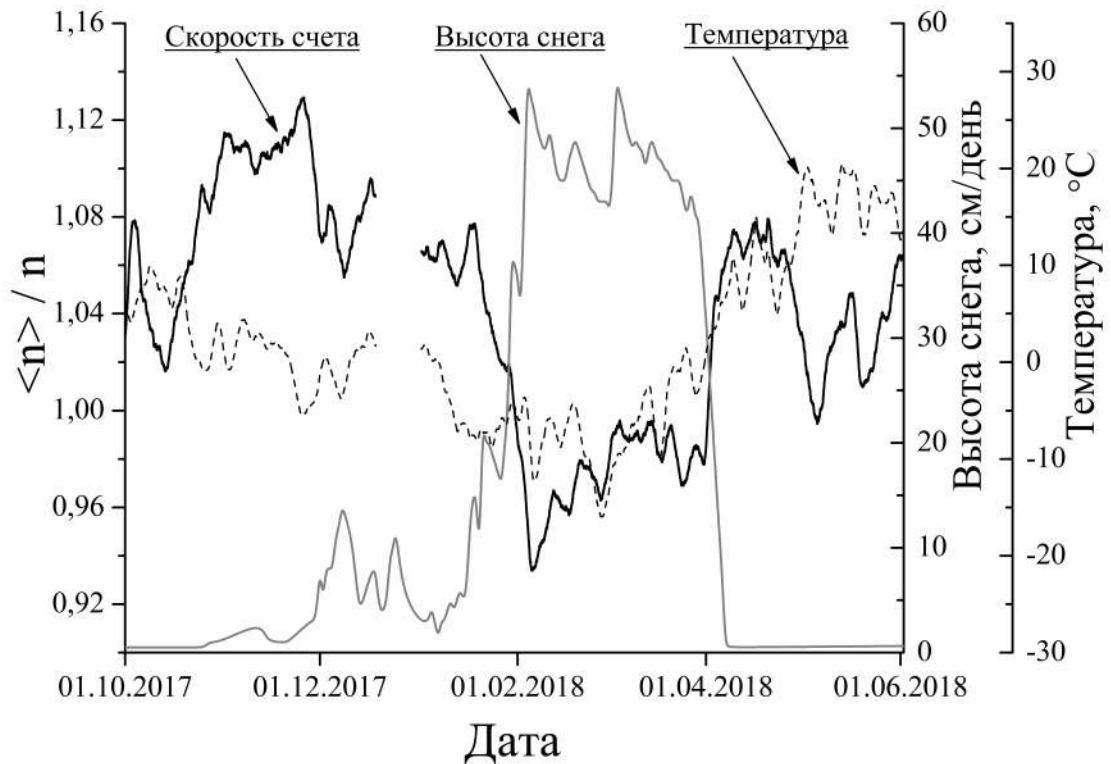


Рис. 15. Зависимость нормированной скорости счета 2-го детектора, высоты снежного покрова и температуры от времени для зимы 2017-2018 гг.

Было проведено изучение отклика четырех детекторов установки “Нейтрон” на Форбуш-эффекты (ФЭ) в течение указанного выше периода. Всего было обнаружено 20 ФЭ. Для определения амплитуды каждого ФЭ была использована методика, основанная на последовательных усреднениях скорости счета до и после ФЭ, переборе полученных комбинаций с последующим усреднением.

Проведено сравнение с результатами исследования ФЭ по данным двух других установок: Московского нейтронного монитора (МНМ) и мюонного годоскопа (МГ) УРАГАН (НИЯУ МИФИ, Москва), расположенных близко к друг другу. Результаты сравнений приведены на рисунках 16–18.

Сравнение форбуш-эффекта 22 июня 2015 г., зарегистрированного разными установками (см. рисунок 16), показывает хорошее согласие по форме и амплитуде между данными установок. Сравнение исследований ФЭ (см. рисунок 17 и 18) показало, что амплитуды падения для установки “Нейтрон” сопоставимы с амплитудами МНМ (в среднем меньше примерно на 30%), и примерно в полтора раза больше чем для МГ УРАГАН.

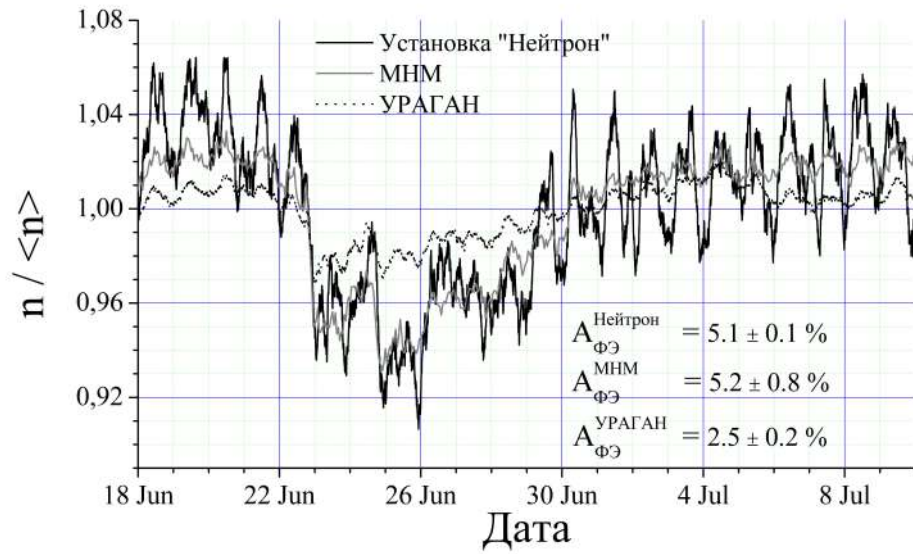


Рис. 16. Форбуш-эффект 22.06.2015 г. по данным второго детектора установки “Нейтрон”, МНМ и УРАГАН.

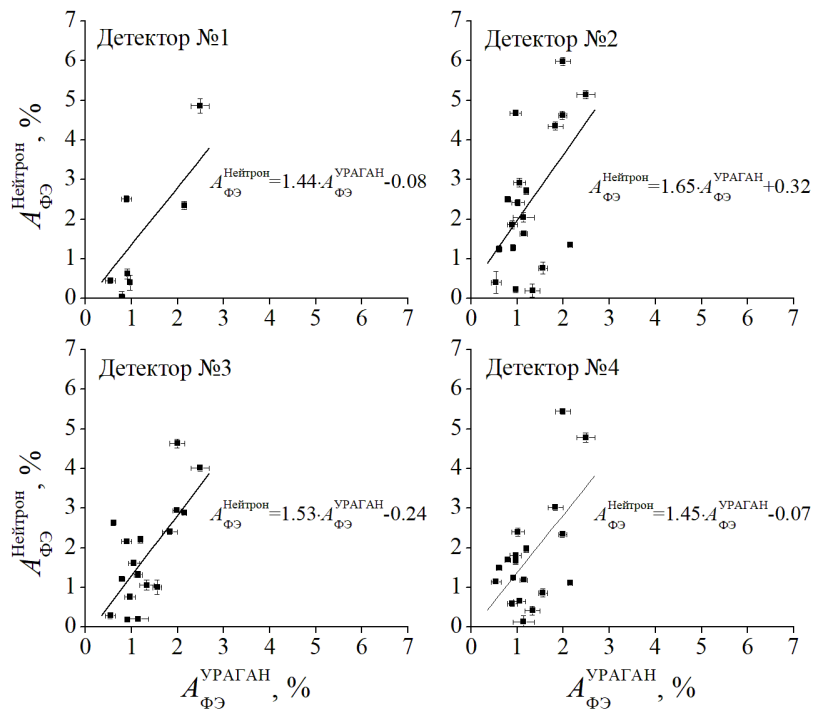


Рис. 17. Сравнение по амплитуде форбуш-эффектов, зарегистрированных МГ УРАГАН и четырьмя детекторами установки “Нейтрон” за период с мая 2015 г. по февраль 2019 г.

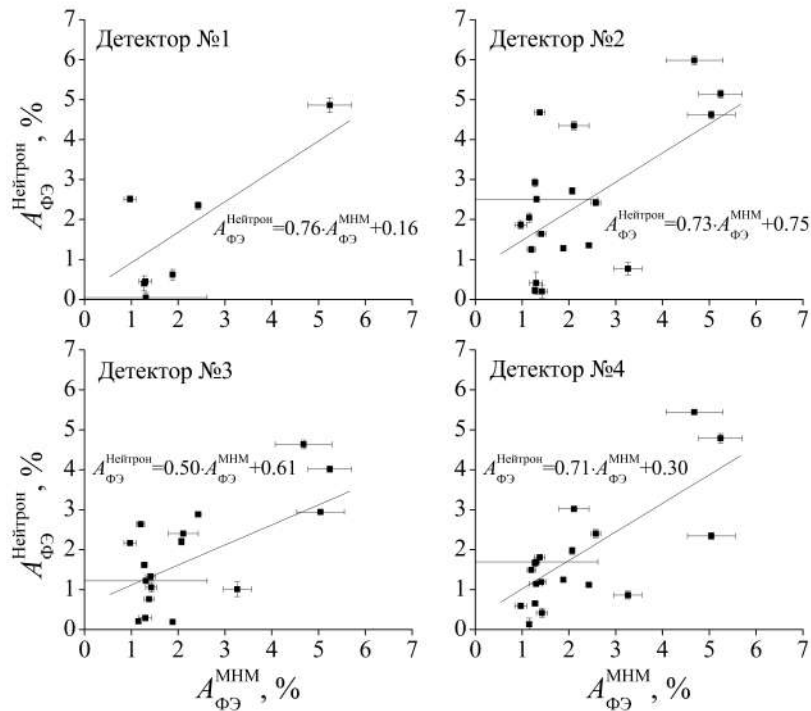


Рис. 18. Сравнение по амплитуде форбуш-эффектов, зарегистрированных МММ и четырьмя детекторами установки “Нейтрон” за период с мая 2015 г. по февраль 2019 г.

По результатам изучения по данным установки “Нейтрон” атмосферных и внеатмосферных эффектов, влияющих на фоновый поток нейтронов под и над грунтом, можно сделать следующие выводы:

- Исследование влияния метеорологических параметров на вариации скорости счета нейтронных детекторов установки “Нейтрон” показало явное влияние конструкции здания и места расположения детекторов внутри него на способность каждого детектора чувствовать изменения метеорологических параметров – второй детектор (слабоэкранированный) оказался более чувствительным в отличие от трех других.
- Установка “Нейтрон” дает возможность исследовать форбуш-эффекты с помощью нейтронных детекторов, находящихся под разными бетонными экранами и на разных высотах от поверхности грунта и под разной толщиной поглотителя.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы:

1. Проведено сравнение результатов моделирования распространения нейтронов в кодах Geant4 и Serpent (эталон) в разных средах – воде, бетоне

и воздухе с использованием двух типов источников нейтронов – точечного моноэнергетического источника с энергией 2 МэВ и калифорния-252. По результатам сравнения были выбраны модели для описания взаимодействия нейтронной компоненты с веществом – QGSP_BERT_HP и QGSP_BIC_HP, которые обеспечивают точность 5% для энергий меньше 0.1 эВ и порядка 10% для надтепловых и быстрых нейтронов.

2. В программном пакете Geant4 разработана математическая модель нейтронного детектора на основе тонкого сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})+^6\text{LiF}$, в которой учтены размеры и состав детектора, описаны основные свойства элементов и подключены все необходимые физические процессы взаимодействия первичных и вторичных частиц с веществом.
3. Проведенная проверка разработанной модели детектора с использованием экспериментальных данных, полученных на стенде с применением источника нейтронов калифорний-252, показала хорошее согласие в пределах 9% для разных расстояний от детектора, что подтверждает корректность созданной модели.
4. Смоделировано применение нейтронного детектора для мониторинга разных источников нейтронов (Cf-252, Pu-240 и AmBe):
 - Отклик детектора при моделировании мониторинга слабых источников (1230 п/с) дал величину в 3 раза больше фона (0.431 ± 0.004 п/с) на расстоянии 2 м и становится сравнимым с ним на расстоянии 4 м. При добавлении замедлителя вокруг источника отклик снижается в два раза.
 - Отклик детектора при моделировании мониторинга мощных защищенных источников ($2.4 \cdot 10^7$ п/с) дал величину в 150 раз выше фона на расстоянии 2 м, но всего лишь в два раза больше на расстоянии 12 м.
5. Оценена эффективность детектора для мониторинга радиоактивных материалов в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, института ANSI и лаборатории PNNL. Отклик детектора при моделировании мониторинга перемещения РМ через границу государства оказался выше порога 2.5 имп/с, требуемого рекомендациями ANSI и PNNL.
6. На установке Нейтрон, состоящей из четырех сцинтилляционных детекторов $\text{ZnS}(\text{Ag})+^6\text{LiF}$, в период с мая 2015 г. по февраль 2019 г. проведены исследования естественного нейтронного фона, создаваемого космическими лучами, и получены следующие результаты:
 - измерена величина суточной волны в скорости счета нейтронов в атмосфере по данным детектора нейтронов, слабоэкранированно-

го веществом здания – 2.16% и ее зависимость от сезона: 2.6% – весной, 3.5% – летом, 1.5% – осенью и 1.3% – зимой;

- продемонстрировано влияние снежного покрова на уменьшение скорости счета атмосферных нейтронов, которое может достигать 20% (в зимний период 2017/2018 гг.), таким образом суммарное влияние метеопараметров может достигать 30%;
- доказана способность данного нейтронного детектора исследовать форбуш-эффекты под разной толщиной поглотителя и получены амплитуды падений ФЭ, зарегистрированных в 2015–2019 гг.

Таким образом, в диссертационной работе решена научная задача, имеющая важное значение для ядерной физики и физики космических лучей – создана математическая модель нейтронного детектора на базе тонкого сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$ и получены оценки его чувствительности для различных применений, которые проверены экспериментально.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Л. Бушама**, Д.М. Громушкин, А.Н. Дмитриева. Изучение свойств нейтронного детектора на основе $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$ для контроля радиационной обстановки вблизи ядерных объектов. Ученые Записки Физического Факультета МГУ. № 4, 1840202 (2018).
2. **L. Bouchama**, A.N. Dmitrieva, Z.T. Izhbulyakova, and D.M. Gromushkin. Geant4 and Serpent codes simulation of the response of the detector based on $\text{ZnS}(\text{Ag})+{}^6\text{LiF}$ for registration of neutrons generated by EAS and by various nuclear objects. Physics of Atomic Nuclei. V. 82, № 6. P. 710-715, (2019).
3. D.M. Gromushkin, F.A. Bogdanov, **L. Bouchama**, A.V. Bulan, Z.T. Izhbulyakova, S.S. Khokhlov, Yu.V. Stenkin and K.O. Yurin. Study of EAS registered by the PRISMA-32 array and the CHERENKOV water calorimeter NEVOD. Physics of Atomic Nuclei. V. 82, № 6. P. 822-826, (2019).