

На правах рукописи

ГРОМУШКИН ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Автор:

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned to the right of the word 'Автор:'.

Москва - 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Научный руководитель:

Петрухин Анатолий Афанасьевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Научный консультант:

Стенькин Юрий Васильевич,
доктор физико-математических наук,
ИЯИ РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

Хренов Борис Аркадьевич, доктор
физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник, НИИЯФ МГУ

Янке Виктор Гугович, кандидат физико-
математических наук, заведующий
отделом, ИЗМИРАН

Ведущая организация: Физический институт им. Лебедева РАН

Защита состоится 17 декабря 2014 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 в НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru/>.

Автореферат разослан «_» _____ 2014 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

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



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Существует два метода исследования энергетического спектра и состава космических лучей (КЛ): “прямой”, в котором измеряется энергия и заряд первичных частиц за пределами атмосферы при помощи космических аппаратов или высотных аэростатов, и “косвенный” - регистрация ливней вторичных частиц, образующихся при вхождении в атмосферу первичных частиц благодаря многочисленным ядерным и электромагнитным взаимодействиям вторичных частиц ливня с ядрами и электронами атомов атмосферы.

Из проведенных прямых экспериментов получено, что интенсивность КЛ резко падает с ростом энергии по закону $I(>E) \sim E^{-1.7}$ до энергии $E \sim 10^{15}$ эВ, а измеренный энергетический спектр ШАЛ (широких атмосферных ливней) имеет характерный излом в области энергий $\sim 3 \times 10^{15}$ эВ и дальше изменяется по закону $I(>E) \sim E^{-2.1}$. Излом энергетического спектра ШАЛ с $\sim E^{-1.7}$ на $\sim E^{-2.1}$ получил название «колена» и наблюдается в разных компонентах ШАЛ. На сегодняшний день создано множество моделей физической интерпретации «колена». Все существующие модели можно условно разделить на две группы: «ядерно-физические» и «астрофизические», но ни одна из них не описывает всю совокупность имеющихся экспериментальных данных.

Возможности провести прямое изучение ПКЛ за пределами атмосферы в этом интересном диапазоне энергий (10^{15} – 10^{16} эВ) у исследователей не было и пока нет – слишком дорого и методически трудно. Поэтому поиск решения проблемы “колена” в последние 60 лет происходит на наземных установках для исследования ШАЛ. В этом случае измеряются разные параметры ШАЛ (число заряженных частиц, число мюонов, энергия ствола ливня на уровне наблюдения и другие характеристики), которые затем пересчитываются в энергию первичной частицы при известном значении ее массы и заряда, которые в свою очередь могут быть оценены по некоторым параметрам ШАЛ: отношению N_{μ}/N_e , высоте максимума развития ливня X_{max} и т. д. Однако результаты проведенных экспериментов не всегда согласуются, а часто и противоречат друг другу.

Поэтому требуется развитие новых методов исследования ШАЛ и создание установок на их основе. Особо важной представляется регистрация нейтронной компоненты ШАЛ, которая является единственной до настоящего времени практически не изученной компонентой. В то же время нейтронная компонента, которая образуется при взаимодействии адронной части ствола ливня с ядрами атомов атмосферы и поверхности Земли, несет важную информацию о развитии

ШАЛ. Создание установки для ее исследования позволяет получить данные, которые могут оказаться недостающим звеном для понимания процессов развития ШАЛ и более корректной интерпретации результатов их исследования с точки зрения оценки энергетического спектра и состава первичных космических лучей.

Цель работы

Разработка и создание Прототипа установки для Измерения Атмосферных нейтронов, состоящей из 32 эн-детекторов (ПРИЗМА-32).

Научная новизна

- Разработана простая конструкция детектора нового типа, способного регистрировать одновременно две компоненты ШАЛ: электромагнитную и нейтронную.
- Впервые создан полноценный прототип установки для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ.
- Впервые получены экспериментальные данные о временном распределении тепловых нейтронов ШАЛ за длительный период.
- Впервые измерена корреляция между электромагнитной и нейтронной компонентами ШАЛ.

Достоверность

Для проверки достоверности полученных результатов экспериментальные данные установки ПРИЗМА-32 были сопоставлены с данными других установок, входящих в состав экспериментального комплекса НЕВОД (СКТ и ЧДВ). Проведенный анализ показал хорошее согласие данных, полученных при регистрации высокоэнергетических ШАЛ разными установками.

Практическая значимость

Созданная установка позволила впервые получить данные о нейтронной компоненте ШАЛ. Опыт создания этой установки для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ уже используется при развертывании крупномасштабных установок с использованием детекторов подобного типа (проект Установки для Регистрации Атмосферных Нейтронов (УРАН) и проект установки PRISMA-LHAASO). Разработанные детекторы и методы регистрации нейтронов могут использоваться в прикладных задачах, например: для изучения долговременных вариаций потока тепловых нейтронов и в системах контроля радиационной обстановки.

Личный вклад

Автор внес весомый вклад в разработку и создание установки нового типа для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ: участвовал в создании стендов технологической линии по сборке элементов детектора и разработке для них программного обеспечения, принимал участие в подготовке и проведении эксперимента, внес существенный вклад в обработку и анализ экспериментальных данных, полученных на установке. Автор является ответственным исполнителем совместного проекта НИЯУ МИФИ и ИЯИ РАН по созданию установки нового типа для исследования ШАЛ.

Автор защищает

1. Разработанную конструкцию эн-детектора и его характеристики.
2. Установку ПРИЗМА-32 для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ, состоящую из 32 эн-детекторов.
3. Методы калибровки и тестирования эн-детекторов.
4. Результаты исследования фона тепловых нейтронов вблизи поверхности Земли.
5. Измеренную корреляцию между электромагнитной и нейтронной компонентами ШАЛ.

Апробация

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: 30-й, 31-й, 32-й и 33-й Всероссийских конференциях по космическим лучам, 22-м и 23-м Европейских симпозиумах по космическим лучам, 31-й Международной конференции по космическим лучам, научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН 2013, Международной конференции “Instrumentation for Colliding Beam Physics 2014”, Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики, Научных сессиях НИЯУ МИФИ, 18-й международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов”, 7-й Курчатовской молодежной научной школе; опубликованы в трудах этих конференций, а также в 10 статьях в рецензируемых российских и зарубежных журналах, входящих в WoS и Scopus: «Известия РАН. Серия физическая», «Краткие сообщения по физике», «Journal of Physics: Conference Series», «Astrophysics and Space Sciences Transactions» и Journal of Instrumentation (*JINST*).

Автору присуждена медаль Российской академии наук для молодых ученых России 2013 г. в области ядерной физики за цикл работ «Установка для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ».

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 121 страница, 98 рисунков, 2 таблицы, 55 наименований цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко описано состояние работ по изучению спектра и состава космических лучей. Приведен краткий обзор известных результатов исследования нейтронов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ). Отмечено, что наиболее полным исследованием возможности регистрации нейтронов ШАЛ являются работы Ю.В. Стенькина (ИЯИ РАН), в которых на примере нескольких макетов продемонстрирована регистрация нейтронной компоненты, а также приведено сопоставление данных, полученных как на нейтронных мониторах, так и на сцинтилляционных детекторах. Сформулированы цель работы и выносимые на защиту результаты.

В главе 1 приводится описание результатов разработки и создания детектора, способного регистрировать две компоненты ШАЛ: электромагнитную через групповое прохождение заряженных частиц и нейтронную (эн-детектор), для установки ПРИЗМА-32 с подробным перечислением основных узлов и конструктивных решений. Описываются разработанные методы регистрации тепловых нейтронов и основные результаты тестирования эн-детекторов.

В разработанных детекторах для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ используется специализированный неорганический сцинтиллятор (светосостав СЛ6-5) на основе сернистого цинка (ZnS), активированного серебром с добавлением LiF, обогащенного до 90% ${}^6\text{Li}$. Используется реакция: ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \alpha + 4,78 \text{ МэВ}$,

где образовавшиеся α -частица и ядро трития вызывают свечение ZnS(Ag) в видимом диапазоне волн. Сернистый цинк, активированный серебром – уникальный сцинтиллятор, который является одним из наиболее эффективных и лучших сцинтилляторов для регистрации тяжелых частиц; он дает в 2 раза больше света, чем NaI, а α -частица и тритон от захвата нейтрона на ${}^6\text{Li}$ дают в нем больше света, чем релятивистские электрон или мюон в пластике толщиной 3 см. За один акт захвата нейтрона ZnS(Ag) испускает ~ 160000 фотонов.

Сцинтиллятор для разрабатываемого детектора представляет собой гранулы сплава смеси сцинтиллятора ZnS(Ag) и ${}^6\text{LiF}$ в виде белого порошка. Эффективность регистрации тепловых нейтронов таким сцинтиллятором составляет ~ 20%. Для удобства использования порошок равномерно размещается на листе бумаги формата А4 (или менее)

толщиной в одну гранулу (со средней толщиной $\sim 30 \text{ мг/см}^2$) и ламинируется полиэтиленовой пленкой.

Для создания установки по регистрации нейтронной компоненты ШАЛ была разработана оригинальная конструкция корпуса для эн-детекторов, основным требованием к которой являлась доступность основных конструктивных элементов.

Проведенное методом Монте-Карло моделирование при различных коэффициентах отражения света от внутренней поверхности и разных формах детектора, показало преимущества использования конической геометрии. В результате был разработан детектор, схема которого представлена на рисунке 1, где 1 - светозащитный корпус; 2 - крышка с подвеской; 3 - ФЭУ-200; 4 - сцинтиллятор; 5 - светоотражающий конус.

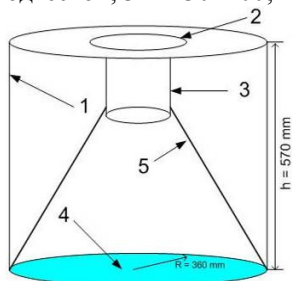


Рисунок 1. Конструкция эн-детектора.

В качестве корпуса детектора использована промышленная светонепроницаемая полиэтиленовая бочка черного цвета (АТV-200, высота 570, диаметр 740 мм, диаметр горловины 350 мм) с установленным в ней диффузно-отражающим конусом с высоким коэффициентом отражения, в основании которого расположен сцинтиллятор. В верхнюю часть конуса устанавливается ФЭУ, который закреплен на съемной крышке бочки. Эффективная площадь сцинтиллятора в таком детекторе составляет $\sim 0.36 \text{ м}^2$.

Для регистрации тепловых нейтронов сцинтиллятором $\text{ZnS(Ag)} + {}^6\text{LiF}$ была разработана методика отбора нейтронов. На рис. 2 представлены формы сигналов, со временем интегрирования 5 мкс, от захвата теплового нейтрона (а) и прохождения заряженной частицы (частицы) (б). Отличие в форме сигналов связано с тем, что тяжелые частицы (тритон и альфа-частица) возбуждают не только быструю, но медленные компоненты сцинтиллятора, а электроны и мюоны в основном быструю.

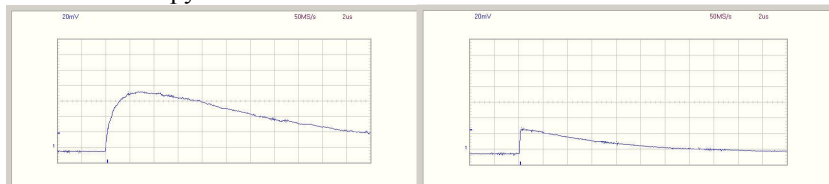


Рисунок 2. Осциллограммы сигнала с эн-детектора от зарегистрированного теплового нейтрона и релятивистской заряженной частицы.

Для тестирования детекторов разработан метод отбора тепловых нейтронов с использованием FADC, с полной оцифровкой импульсов. Метод основан на сравнении заряда q , собранного от “быстрой компоненты”, с зарядом q_{\max} , собранным за время достижения максимальной величины проинтегрированного импульса ($\tau = 5$ мкс). Для нейтрона их соотношение всегда меньше 1, так как импульс от продуктов захвата нейтрона нарастает несколько мкс за счет более интенсивного высвечивания медленных компонент сцинтиллятора. Для легких релятивистских заряженных частиц оно близко или равно 1. Поэтому для выделения нейтронов ставится верхний предел соотношения $q/q_{\max}=0.85$. Для реализации метода был разработан и создан стенд, основанный на сравнении заряда от “быстрой” и “медленной” компонент. Проведены методические эксперименты:

- Экранировка детектора кадмием показала, что вклад заряженных частиц в регистрацию тепловых нейтронов с использованием методики отбора по амплитуде (а также нейтронов с энергией выше 0.4 эВ и собственного альфа-фона) составляет $< 10\%$ (с учетом неполной экранировки).
- Оценка эффективности регистрации тепловых нейтронов сцинтиллятором $ZnS(Ag)+^6LiF$ показала, что вероятность зарегистрировать тепловой нейтрон данным сцинтиллятором составляет 20 - 25%.

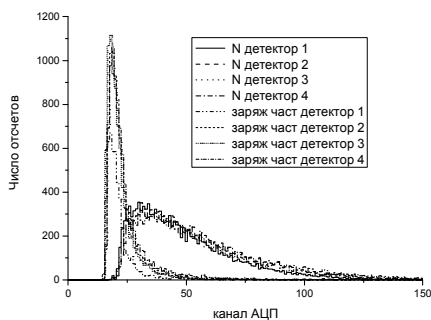


Рисунок 3. Спектры сигналов от тепловых нейтронов и заряженных частиц для четырех детекторов

С использованием разработанных методов проведено тестирование каждого эн-детектора, в ходе которого проверялся темновой ток ФЭУ, подбирался коэффициент усиления ФЭУ и набирался спектр сигналов от заряженных частиц и тепловых нейтронов (рисунок 3). Как видно из рисунка, спектры от прохождения “заряженных частиц” и захвата тепловых нейтронов хорошо разделяются, а максимумы спектров от тепловых нейтронов совпадают.

Проведено тестирование эн-детектора на координатно-трековом детекторе, который входит в состав экспериментального комплекса НЕВОД и позволяет определять координату прохождения заряженной частицы (мюона) с точностью до одного сантиметра. Эн-детектор был

установлен поперек координатного детектора. В результате получено пространственное распределение зарегистрированных частиц в эн-детекторе. В результате проведенного анализа двумерных координатных матриц зарегистрированных заряженных частиц сцинтиллятором ZnS(Ag) получено, что средний отклик на прохождение одного мюона составляет порядка 0.3 мВ, а эффективность его регистрации составляет порядка 7.5%.

Вторая глава посвящена разработке и созданию установки для регистрации атмосферных нейтронов ШАЛ (ПРИЗМА-32). Описывается структура установки и ее основные элементы, схемы триггирования и on-line программы обработки данных. Приводятся примеры регистрации событий.

Созданная установка состоит из 32 эн-детекторов для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ, разбитых на два кластера по 16 детекторов. Установка расположена на четвертом этаже экспериментального комплекса НЕВОД вокруг бассейна черенковского водного детектора. Общая площадь установки составляет порядка 500 м², детекторы располагаются с шагом 2.5 м и 5 м (рисунок 4).



Рисунок 4. Схема установки (детекторы 1-16 первый кластер, детекторы 17-32 второй кластер).

Детекторы 1, 2, 4, 5 имеют конструкцию, представляющую собой пирамидальный ШАЛовский детектор размером $1*1 \text{ м}^2$ (эти детекторы использовались в опытном образце создаваемой установки), площадь сцинтиллятора в них составляет 0.75 м^2 , все остальные детекторы имеют конструкцию на основе светонепроницаемой бочки объемом 200 литров, с площадью сцинтиллятора 0.36 м^2 .

Схема подключения одного кластера показана на рисунке 5. ФЭУ питается от высоковольтного источника питания, сбор информации осуществляется с двух динодов делителя ФЭУ 12-го и 7-го (7-й динод позволяет расширить диапазон измеряемых энергий от заряженной компоненты ШАЛ). Аналоговый сигнал с 12-го динода поступает на дискриминатор-интегратор-усилитель (ДИУ), который питается от низковольтного источника. ДИУ при превышении порога вырабатывает триггерный импульс, который поступает на триггерный блок, выдающий сигнал для запуска всех АЦП, а интегрированный аналоговый сигнал идет на вход быстрого АЦП, соединенного с компьютером. Аналоговый сигнал с 7-го динода поступает на предусилитель и далее на АЦП, который также соединен с компьютером. В установке используются 4-канальные, 10-битные АЦП, позволяющие обрабатывать сигналы до одного вольта с шагом 1.95 мВ .

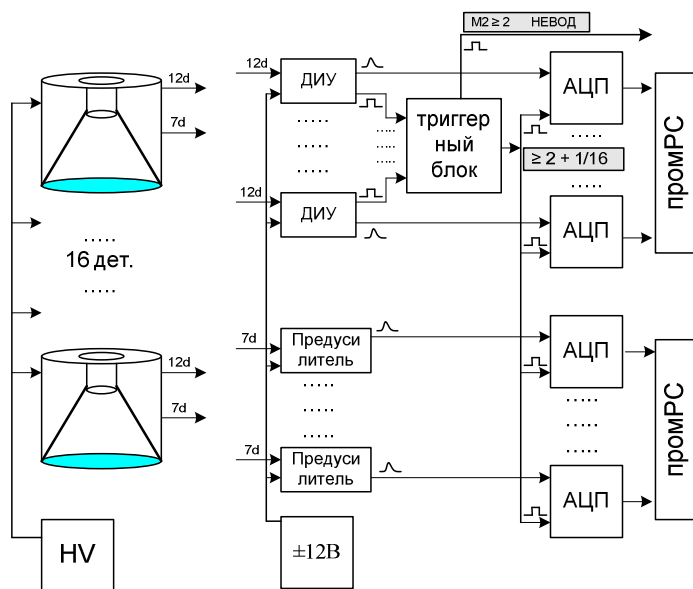


Рисунок 5. Схема подключения детекторов.

Благодаря низкому темпу счета эн-детекторов ($\sim 1 \text{ с}^{-1}$ на уровне моря) и их небольшому количеству в одном кластере, используется довольно простая система триггирования: каждое шестнадцатое срабатывание любого детектора или одновременное срабатывание детекторов не менее двух. Данное решение позволяет минимизировать загрузку системы и достичь “живого” времени работы каждого кластера на уровне 95%.

Установка ПРИЗМА-32 может одновременно регистрировать две основные компоненты широких атмосферных ливней: нейтронную и электромагнитную. В случае прохождения ШАЛ через детектор, вначале (в пределах $\sim 1 \text{ мкс}$) обрабатывается информация от электромагнитной компоненты, а затем в течение 20 мс от запаздывающих тепловых нейтронов, сопровождающих ливень. Пример полной осциллограммы при регистрации ШАЛ (20000 мкс) представлен на рисунке 6.

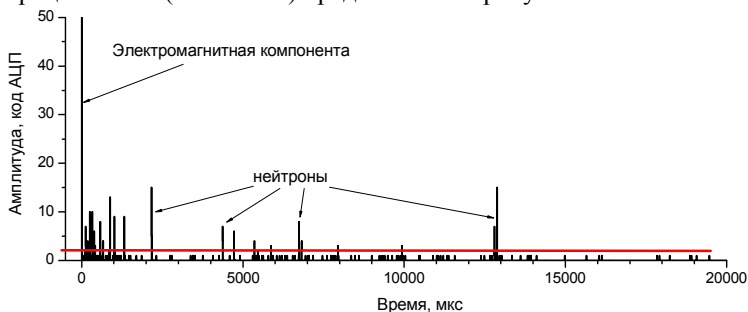


Рисунок 6. Осциллограмма зарегистрированного ШАЛ.

Для первичной обработки информации, получаемой с установки ПРИЗМА-32, используется специализированная он-лайн программа, которая при срабатывании триггера опрашивает все каналы АЦП и проводит предварительный анализ данных.

Для контроля за работой установки и своевременного выявления неисправностей проводится постоянная статистическая обработка, на основании которой осуществляется подстройка коэффициентов усиления всех детекторов. Один раз в месяц проводится полный анализ работы установки, при котором создается паспорт работы установки, отображающий основные параметры ее работы.

Распределение амплитуд зарегистрированных сигналов для каждого эн-детектора установки приведено на рисунке 7. На основании анализа этих спектров энерговыделений можно определять отклонение коэффициентов усиления каждого эн-детектора. С использованием этих распределений проводилась конечная подстройка усиления ФЭУ после подключения детекторов в установку.

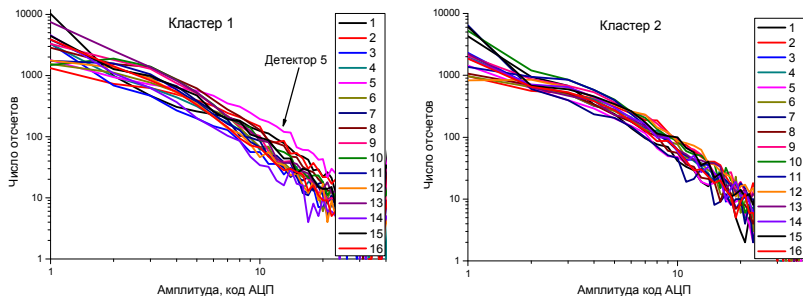


Рисунок 7. Распределение амплитуд для каждого эн-детектора установки за месяц работы (кластер 1-слева, кластер 2-справа).

Оценивалось мертвое время, которое показывает, сколько времени тратится на считывание и обработку информации с АЦП. Суммарное мертвое время двух кластеров составляет ~ 9%.

В третьей главе приведены результаты исследования фона тепловых нейтронов вблизи поверхности Земли и результаты оценки влияния на него метеопараметров (давления, температуры и толщины снежного покрова).

В процессе создания установки для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ проведено изучение фона тепловых нейтронов вблизи поверхности Земли, которое затем переросло в отдельную ветвь исследований. Фоновый поток нейтронов состоит из двух составляющих: вторичных нейтронов, создаваемых космическими лучами (убывает с увеличением толщины поглотителя над детектором) и нейтронов от естественной радиоактивности, образуемых, в основном, в (α, n) -реакциях (становятся преобладающими на больших глубинах под землей). Изучение вариаций фонового потока тепловых нейтронов открытыми нейтронными детекторами в последнее время вызывает растущий интерес среди исследователей, занимающихся подземной физикой, физикой гроз и т.д.

Для решения данной задачи была создана установка «Нейтрон», состоящая из четырех эн-детекторов, расположенных на разных высотах относительно грунта и под разной толщиной поглотителя: первый детектор расположен в подвале здания (на уровне - 3 м); второй - находится в галерее (переход между зданиями) на уровне второго этажа (4.5 м); третий - в холле на втором этаже (3.5 м); четвертый - на третьем этаже (8 м).

Для изучения фона тепловых нейтронов на установке «Нейтрон» каждые пять минут сохраняется информация о темпе счета тепловых

нейтронов и коротких импульсов (не прошедших отбор по форме сигнала), показания датчиков давления, температуры и влажности.

Наибольшее влияние на вариации фоновых потоков тепловых нейтронов оказывает атмосферное давление, поэтому для корректного анализа полученных данных и наблюдения более тонких эффектов необходимо вводить поправку на барометрический коэффициент. Как известно, характерная величина барометрического коэффициента для адронов космических лучей составляет примерно – 1%/мм рт. ст. Соответственно зарегистрированные тепловые нейтроны, рожденные от адронной компоненты, должны иметь такой же коэффициент (по аналогии с нейтронным монитором). Однако детекторы установки “Нейтрон” чувствительны и к нейтронам от естественной радиоактивности. В этом случае (считая, что нейтроны от естественной радиоактивности не чувствительны к атмосферному давлению) барометрический коэффициент должен быть по абсолютной величине несколько меньше.

Определение барометрического коэффициента проводилось следующим образом: темп счета нейтронов за каждый месяц нормировался на среднемесячное значение, после чего строилась зависимость нормированного темпа счета от атмосферного давления в мм рт. ст. После аппроксимации полученного распределения прямой, тангенс угла наклона данной прямой является барометрическим коэффициентом (рисунок 8). Средние значения барометрических коэффициентов для каждого из четырех детекторов установки “Нейтрон” составили:

детектор 1 – 0.65 ± 0.06 %/мм рт. ст.;

детектор 2 – 0.86 ± 0.10 %/мм рт. ст.;

детектор 3 – 0.80 ± 0.06 %/мм рт. ст.;

детектор 4 – 0.84 ± 0.09 %/мм рт. ст.

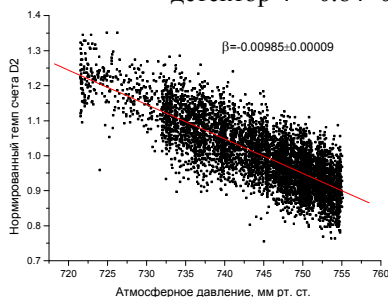


Рисунок 8. Корреляция темпа счета тепловых нейтронов с давлением за месяц.

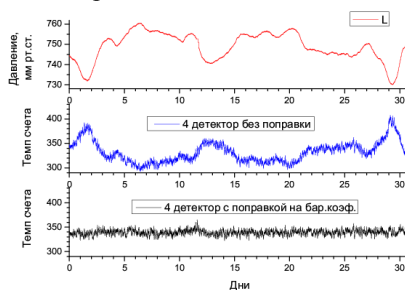


Рисунок 9. Сверху вниз: изменение давления в течение месяца; темп счета без поправки; темп счета с поправкой на барометрический коэффициент.

Полученные барометрические коэффициенты можно использовать для введения поправки в темп счета детекторов тепловых нейтронов по формуле:

$$N_{\text{сог}} = N_{\text{ном}} * (1 - \beta * (P - \langle P \rangle)),$$

где $N_{\text{сог}}$ - темп счета с введенной поправкой, $N_{\text{ном}}$ - нормированный темп счета, P - атмосферное давление, $\langle P \rangle$ - среднемесячное атмосферное давление, β - барометрический коэффициент (отрицательный). Пример введения поправки на барометрический коэффициент в темп счета тепловых нейтронов представлен на рисунке 9, на котором также приводятся значения давления за выбранный период времени.

Исследование влияния температуры на темп счета тепловых нейтронов с использованием метода наложения эпох с интервалом 24 часа показало, что наибольшее влияние температурная волна оказывает на детектор № 2 (около 10%). Это связано с тем, что второй детектор расположен в галерее между зданиями, которая имеет тонкое перекрытие, а по бокам сплошное остекление, и он, соответственно, является наиболее чувствительным именно к тепловым нейтронам, находящимся в равновесии с окружающей средой. У детекторов 1, 3 и 4 температурная волна наблюдается на уровне 2 – 3%; это связано с тем, что эти детекторы регистрируют, в основном, вторичные тепловые нейтроны, рожденные адронами космических лучей в потолке или стенах здания.

Оценка влияния толщины снежного покрова на темп счета тепловых нейтронов показала, что данный эффект может достигать 20% для детекторов, расположенных на открытом пространстве.

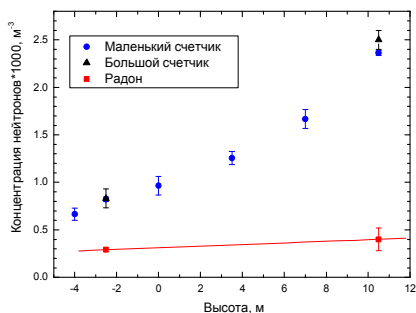


Рисунок 10. Концентрация тепловых нейтронов на разных высотах и примесь нейтронов от радона.

пересчитывается в концентрацию тепловых нейтронов с учетом площади и эффективности детекторов. Полученные с помощью портативного

Проведенные измерения темпа счета тепловых нейтронов на разных высотах вблизи поверхности Земли показали, что в подвальном помещении (~ 4 м ниже уровня грунта) он в три-четыре раза меньше, чем на уровне четвертого этажа (~ 10.5 м). Помимо данных полученных на портативном детекторе, приводятся результаты измерений, полученных на эн-детекторе пирамидальной конструкции. При сопоставлении данных различных детекторов темп счета

детектора результаты на разных высотах (от - 4 до 10.5) показали согласие в пределах погрешности с данными больших детекторов (рис. 10).

В четвертой главе диссертации продемонстрирована стабильность работы установки в течение длительного периода времени и показаны примеры зарегистрированных событий совместно с данными других установок НОЦ НЕВОД. Приводятся результаты обработки экспериментальных данных за более чем два года работы установки: зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов как функция суммарного энерговыделения электромагнитной компоненты и временное распределение нейтронов ШАЛ.

В процессе работы установки набрана экспериментальная информация за более чем два года и зарегистрировано более миллиона событий. Темпы счета триггеров второго кластера установки за февраль – май 2013 года представлены на рисунке 11; локальные пики по третьему триггеру связаны, в основном, с помехами или наводками. Установка ПРИЗМА-32 в целом показала хорошую стабильность работы в течение длительного периода времени (более 90%).

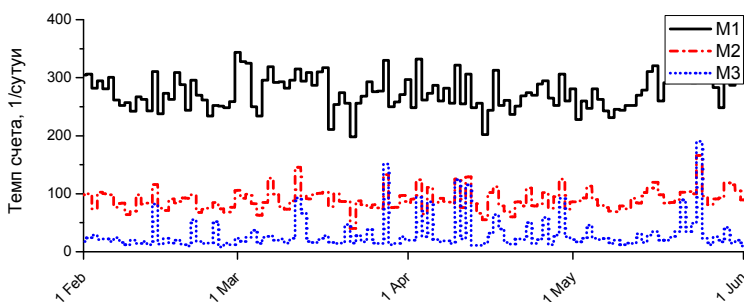


Рисунок 11. Темп счета триггеров второго уровня за 2013 год для кластера 2. (M1 - срабатывание минимум двух детекторов; M2 – суммарное энерговыделение более 50 частиц; M3 – более 4-х нейтронов).

Оба кластера установки имеют независимую систему триггирования и сбора экспериментальных данных. Для обработки полученных данных была разработана методика шивки данных с двух кластеров установки по временным меткам. Поскольку темп счета событий типа ШАЛ (по всем триггерам) небольшой (0.013 с^{-1}), то вероятность случайных совпадений в интервале 20 мс можно оценить как $0.02 \text{ с} * 0.013 \text{ с}^{-1} = 0.00026$. Все зарегистрированные события метятся временной меткой. Временные часы обоих кластеров синхронизованы к единому серверу, который использует время, получаемое с GPS модуля; обновление происходит один раз в 5 минут. Данные объединяются при предварительной обработке в офф-лайн режиме при совпадении событий

по времени с точностью ± 10 мс. Помимо временного ограничения, при объединении данных двух кластеров в одно событие накладываются дополнительные требования: исключение помех по форме импульса, кратность сработавших детекторов не менее четырех во всей установке (по два детектора на каждый кластер), исключение случайных наложений разных ШАЛ в пределах временных ворот 20 мс.

Для определения энерговыделения в эн-детекторах от прохождения заряженной компоненты был проведен отдельный эксперимент, основанный на том, что плотность заряженных частиц ШАЛ на малых расстояниях (~ 1 м) остается практически неизменной. Суть эксперимента заключалась в совместном наборе экспериментальных данных энерговыделения от электромагнитной компоненты ШАЛ на сцинтилляционных детекторах (с известным значением энерговыделения от одной частицы) и на эн-детекторах.

Для отбора событий, относящихся к группе ШАЛ, и сопоставления полученных данных использовался совместный триггер НЕВОД-СКТ-ЧВД-ПРИЗМА-32; было набрано около 8.5 тысяч событий. Из них для каждого эн-детектора было отобрано ~ 600 событий, в которых сработало по 4 окружающих его сцинтилляционных счетчика и затем, по известному положению одночастичного пика, было определено количество частиц, прошедших через счетчики СКТ. При этом было сделано допущение, что каждая последующая частица прибавляет к общему отклику величину, равную отклику на одиночную частицу.

На рисунке 12 показана зависимость числа частиц, прошедших через сцинтилляционный детектор, от амплитуды на эн-детекторе (число частиц в счетчике СКТ приведено к площади эн-детектора - 0.36 м^2).

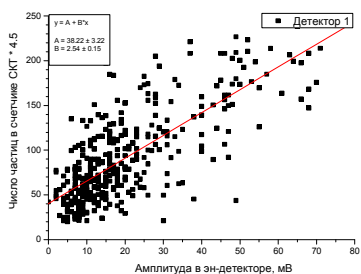


Рисунок 12. Зависимость числа частиц, зарегистрированных в детекторе СКТ, от амплитуды сигнала в эн-детекторе №1.

Из данных зависимостей методом фитирования определены коэффициенты соотношения между числом частиц в сцинтилляционном счетчике и амплитудой в эн-детекторе:

- эн-дет. №1 – (2.54 ± 0.15) частиц/мВ;
- эн-дет. №2 – (2.85 ± 0.13) частиц/мВ;
- эн-дет. №3 – (2.39 ± 0.11) частиц/мВ;
- эн-дет. №4 – (2.47 ± 0.13) частиц/мВ.

Усреднив значения, получим, что амплитуда от прохождения одной частицы в эн-детекторе составляет (0.40 ± 0.03) мВ. Таким образом, цена канала АЦП (1.95 мВ/канал) от

заряженной компоненты в установке ПРИЗМА-32 составляет 5 частиц/канал, а минимальное число заряженных частиц, которое может зарегистрировать эн-детектор в установке ПРИЗМА-32 по электромагнитной компоненте, равно 5 частиц.

Полученная оценка числа частиц на канал в эн-детекторе установки ПРИЗМА-32 (5 частиц/канал) совпадает с оценкой, полученной на таких же эн-детекторах в тестовом эксперименте, проведенном совместно с установкой ARGO-YBJ.

Для изучения возможности оценки энергии ШАЛ по нейтронной компоненте проведено сравнение между энерговыделением от заряженной компоненты и числом зарегистрированных нейтронов ШАЛ. В результате была получена зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов как функция суммарного энерговыделения электромагнитной компоненты во всех детекторах (рисунок 13).

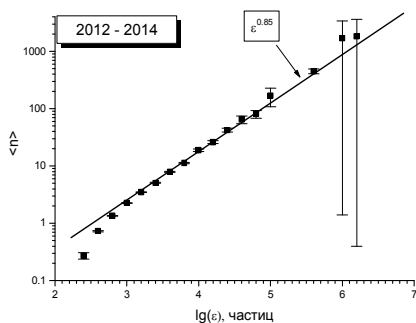


Рисунок 13. Зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов как функция суммарного энерговыделения электромагнитной компоненты во всех детекторах.

энерговыделению от $\sim 10^6$ частиц. Полученный результат показывает возможность использования данных по числу нейтронов для прямой оценки энергии ШАЛ.

Одним из наиболее интересных результатов, полученных в настоящее время, является временное распределение тепловых нейтронов ШАЛ (рисунок 14). При обработке использовались данные двух кластеров за период 2012-2013 г.г. Шаг по временной шкале составляет 0.1 мс.

Полученная зависимость хорошо фитируется прямой, а показатель степени, определяемый тангенсом наклона прямой, равен 0.85 ± 0.02 . Это хорошо согласуется с ожидаемым показателем для роста числа «ядерно-активных» частиц в адронном каскаде вблизи ствола, что, в свою очередь, свидетельствует о корректности измерительной процедуры, разработанной и реализованной на установке для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ. Среднее значение числа зарегистрированных нейтронов 1000 на 32 детектора соответствует

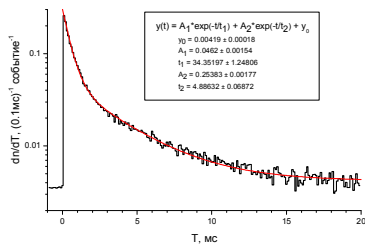


Рисунок 14. Временное распределение нейтронов для событий, отобранных по триггеру МЗ.

Полученное распределение можно профитировать двойной экспоненциальной функцией $y(t) = A_1 \cdot \exp(-t/t_1) + A_2 \cdot \exp(-t/t_2) + y_0$. Следует отметить, что эти результаты очень близки к данным, полученным на опытных образцах созданной установки, а также качественно близки к расчету временных распределений нейтронов от первичных протонов и ядер железа.

Полученные параметры функции $t_1 = 0.49 \pm 0.01$ мс и $t_2 = 3.44 \pm 0.13$ мс можно объяснить следующим образом. Первый параметр (t_1) связан со средним временем жизни нейтронов, выходящих из-под детектора, т. е. локально рожденных. Время жизни тепловых нейтронов до захвата в среде типа стандартного грунта, сухого бетона, кирпича и других обычных строительных материалов составляет около 1 мс. Кроме того, время замедления нейтронов в такой среде равно примерно 0.5 мс. В воде, как известно, время замедления составляет около 13 мкс, а время жизни равно 0.213 мс. Поскольку наши детекторы расположены в непосредственной близости от водного бассейна установки НЕВОД, то измеренное нами в эксперименте время «светимости» грунта после прохождения ШАЛ оказалось примерно в 2 раза меньше 1 мс. Следует предположить, что часть регистрируемых нейтронов быстро замедляется в воде и выходит из нее с меньшим временем после прохождения ШАЛ, а наблюдаемая величина есть некое усредненное по площади установки время жизни тепловых нейтронов в указанных средах.

Второй параметр (t_2) связан с временем жизни тепловых нейтронов в воздухе (атмосферные нейтроны). Однако, поскольку установка расположена внутри здания, то регистрация этой компоненты подавлена. В то же время существует влияние потолка и стен здания, в которых также рождаются нейтроны при прохождении ШАЛ. Высота потолка над установкой составляет ~ 7 м, а соответствующее время пролета по вертикали со скоростью 2200 м/с равно ~ 3.2 мс, поэтому логично предположить, что измеренная величина $t_2 = 3.44$ мс, соответствует именно этому процессу.

В качестве примера регистрации ШАЛ приводится событие с максимальным числом нейтронов и большим энерговыделением от электромагнитной компоненты, зарегистрированное в процессе работы

установки, с числом нейтронов 2033 (рисунок 15). Положение оси и энергия ШАЛ оценены по данным электромагнитной компоненты с использованием стандартных методов восстановления оси и энергии ШАЛ.

В этом событии сработали все 32 детектора. Оценка мощности ливня по электромагнитной компоненте составила $\lg N_e = 7.6$, а положение оси оказалось в районе 28-го детектора. Число зарегистрированных тепловых нейтронов составило более 2033 в течение 20 мс (на самом деле больше, т.к. некоторые ФЭУ эн-детекторов были в глубоком насыщении), более 600 из которых зафиксировал детектор 28.

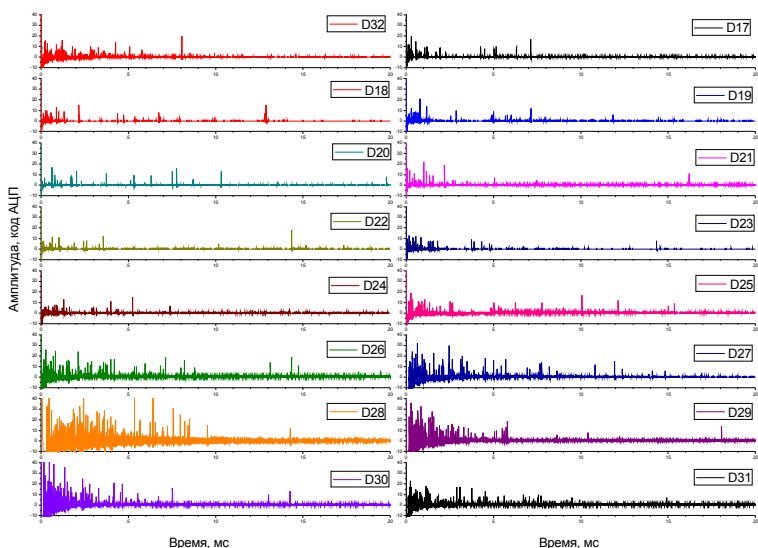


Рисунок 15. Осциллограмма зарегистрированного события с суммарным числом 2033 нейтронов (второй кластер)

Несмотря на большое число зарегистрированных нейтронов в одном из эн-детекторов, нейтроны хорошо разделяются между собой после выхода ФЭУ из насыщения.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы:

- Проведено детальное исследование эн-детектора, конструкция которого была разработана в процессе создания установки для регистрации нейтронов ШАЛ. Долговременные экспозиции при исследовании фонового потока тепловых нейтронов показали хорошую надежность и высокую стабильность работы детектора, а также возможность использования детекторов такого типа для вариационных задач.
- Проведенные методические измерения показали, что детекторы на основе сцинтиллятора ZnS в виде тонкого слоя хорошо регистрируют только множественное прохождение заряженных частиц (с порогом $\sim 5 - 10$ частиц).
- Создана полноценная установка для изучения ШАЛ, позволяющая одновременно регистрировать сразу две компоненты. Установка состоит из 32 эн-детекторов, расположенных с шагом $5 \text{ м} \times 2.5 \text{ м}$, разбитых на два кластера по 16 детекторов, занимающих площадь $\sim 450 \text{ м}^2$. Разработана и внедрена регистрирующая электроника, основанная на размещении детекторов кластерами по 16 штук.
- Проведен долговременный набор экспериментальных данных на созданной установке ПРИЗМА-32. Время экспозиции составило более двух лет в режиме непрерывного набора информации, зарегистрировано более одного миллиона событий.
- Получена зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов, как функция суммарного энерговыделения электромагнитной компоненты во всех детекторах. Полученная зависимость имеет степенной вид с показателем 0.85 ± 0.02 .
- По экспериментальным данным получена информация о временном распределении тепловых нейтронов ШАЛ, которую можно описать двойной экспоненциальной функцией $y(t) = A_1 \cdot \exp(-t/t_1) + A_2 \cdot \exp(-t/t_2) + y_0$. с параметрами функции $t_1 = 0.49 \pm 0.01 \text{ мс}$ и $t_2 = 3.44 \pm 0.13 \text{ мс}$.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Д.М. Громушкин, В.В. Алексеенко, А.А. Петрухин, Ю.В. Стенькин, И.И. Яшин. “Регистрация потока тепловых нейтронов вблизи поверхности Земли”, Известия РАН. Серия физическая, **73**, №3, 2009, с. 426.
2. Ю.В. Стенькин, В.В. Алексеенко, В.И. Волченко, Д.М. Громушкин, В.В. Джаппуев, А.У. Куджаев, О.И. Михайлова, А.А. Петрухин, В.И. Степанов, В.П. Сулаков, А.Л. Цябук, И.И. Яшин. “Как выглядит ШАЛ в тепловых нейтронах?”, Известия РАН. Серия физическая, **73**, №5, 2009, с. 647.
3. В.В. Алексеенко, Ю.М. Гаврилюк, Д.М. Громушкин, Д.Д. Джаппуев, А.У. Куджаев, В.В. Кузьминов, О.И. Михайлова, Ю.В. Стенькин, В.И. Степанов. “Связь вариаций потока тепловых нейтронов из земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью”. Физика Земли, № 8, 2009, с. 91.
4. Д.М. Громушкин, Ю.В. Стенькин, И.Б. Хацуков. “Мониторинг потока тепловых нейтронов, с использованием детекторов нового типа”, Краткие сообщения по физике, **37**, №11, 2010, с. 24-28.
5. Д.М. Громушкин, А.А. Петрухин, Ю.В. Стенькин, И.И. Яшин. “Изучение временной структуры нейтронной компоненты ШАЛ”. Известия РАН. Серия физическая, **75**, № 3, 2011, с. 403.
6. D.M. Gromushkin, A.A. Petrukhin, Yu.V. Stenkin, I.I. Yashin. “Study of EAS neutron component temporal structure”, Astrophysics and Space Sciences Transactions, **7**, 2011, p. 115.
7. D.M. Gromushkin, V.V. Alekseenko, A.A. Petrukhin, O.V. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, V.I. Volchenko, I.I. Yashin. “The ProtoPRISMA array for EAS study: first results”, Journal of Physics: Conference Series, **409**, 2013, 012044.
8. V. Alekseenko, F. Arneodo, G. Bruno, W. Fulgione, D. Gromushkin, O. Shchegolev, Yu. Stenkin, V. Stepanov and V. Sulakov. “Registration of Forbush decrease 2012/03/08 with a global net of the thermal neutron scintillation en-detectors”, Journal of Physics: Conference Series, **409**, 2013, 012190.
9. Д.М. Громушкин, В.И. Волченко, А.А. Петрухин, Ю.В. Стенькин, В.И. Степанов, О.Б. Щеголев, И.И. Яшин. “Установка нового типа для регистрации ШАЛ: первые результаты”, Известия РАН. Серия физическая, **77**, № 5, 2013, с. 704.
10. D. Gromushkin, V. Alekseenko, A. Petrukhin, O. Shchegolev, Yu. Stenkin, V. Stepanov, I. Yashin, E. Zadeba. “The array for EAS neutron component detection”, Journal of Instrumentation (JINST)_9, 2014, C08028.

Подписано в печать .10.2014. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ

Типография НИЯУ МИФИ. 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31