

На правах рукописи

**АМЕЛЬЧАКОВ МИХАИЛ БОРИСОВИЧ**

**СИСТЕМА КАЛИБРОВОЧНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ ЧВД  
НЕВОД КАК ДЕТЕКТОР ШАЛ В ДИАПАЗОНЕ  
ЭНЕРГИЙ ПЕРВИЧНЫХ ЧАСТИЦ  $10^{14}$ - $10^{18}$  эВ**

**01.04.23 – Физика высоких энергий**

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

**Автор:**



**Москва - 2015**

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

Научный руководитель: Кокоулин Ростислав Павлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: Шаулов Сергей Борисович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией ФИАН

Лидванский Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИЯИ РАН

Ведущая организация: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Защита состоится 23 декабря 2015 г. в 16 час. 30 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/dissertations>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 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

Спутниковые эксперименты, такие как MUBEE, SOKOL, AMS-1, RUNJOB, ATIC02 и др., могут проводить исследования частиц космических лучей (КЛ) в области энергий до  $10^{14}$  эВ. При больших энергиях вследствие быстро спадающего энергетического спектра интегральный поток составляет менее 10 частиц/м<sup>2</sup>сут<sup>1</sup>. При такой интенсивности событий становится трудно реализуемым использование прямых методов для исследования КЛ. Поэтому основным источником информации о КЛ при сверхвысоких энергиях могут быть только наземные установки для регистрации ШАЛ.

Для регистрации ШАЛ в области энергий выше  $10^{15}$  эВ создано значительное количество установок, среди которых можно выделить KASCADE, AUGER, IceTop и др. Однако эти установки не обеспечивают необходимую эффективность работы в более низком диапазоне энергий.

Таким образом, переходная область энергий КЛ от  $10^{14}$  до  $10^{15}$  эВ остаётся до сих пор слабо изученной. В то же время она вызывает значительный интерес с точки зрения энергетического спектра и состава КЛ. Установок, на которых получены экспериментальные данные в указанном диапазоне, немного. Среди них можно выделить CASA-MIA, Тянь-Шань и Tibet, расположенные соответственно на высотах 1300, 3300 и 4300 м.

Установка СКТ имеет относительно малые размеры по сравнению с другими установками для регистрации ШАЛ, но при этом даёт возможность исследования ШАЛ в широком диапазоне энергий первичных КЛ вблизи уровня моря. Компактное расположение регистрирующих элементов позволяет использовать отличный от других установок метод регистрации. Поэтому для неё доступен диапазон энергий от  $10^{14}$  до  $10^{15}$  эВ.

Использование СКТ совместно с другими установками экспериментального комплекса НЕВОД (ПРИЗМА, ДЕКОР, ЧВД НЕВОД) даёт уникальную возможность проведения измерений в перекрывающихся диапазонах энергий, что обеспечит их взаимную калибровку.

### Цель работы

Создание новой системы калибровочных телескопов (СКТ) экспериментального комплекса НЕВОД для калибровки черенковского водного детектора (ЧВД) и проведение исследований на поверхности Земли электронной компоненты ШАЛ в области энергий  $10^{14} - 10^{15}$  эВ и

мюонной компоненты в области энергий  $10^{16} - 10^{18}$  эВ, разработка методов восстановления спектров локальных плотностей электронов и мюонов ШАЛ, регистрируемых на установке СКТ, и оценка их связи с первичным энергетическим спектром космических лучей.

### **Научная новизна:**

- Впервые измерены спектры локальной плотности электронной и мюонной компонент ШАЛ двумя методами в широком диапазоне первичных энергий  $10^{14} - 10^{18}$  эВ на одной установке с распределённой системой сцинтилляционных счётчиков.
- Впервые новым методом, основанным на кратности срабатывания сцинтилляционных счётчиков, измерен спектр локальной плотности мюонов в диапазоне, соответствующем энергиям первичных частиц  $10^{16} - 10^{18}$  эВ, и подтверждено существование «излома» при энергии  $\sim 10^{17}$  эВ.

### **Достоверность:**

- Калибровка сцинтилляционных счётчиков по энергосодержанию в их рабочем объёме проводится с помощью одиночных мюонов с известными параметрами трека. Энергосодержание мюонов в веществе сцинтиллятора хорошо изучено и его характеристики приводятся в справочной литературе.
- Измеренные с помощью СКТ спектры локальных плотностей хорошо согласуются с результатами других измерений в тех областях энергий, где такие результаты имеются.

### **Практическая значимость**

Новая система калибровочных телескопов интегрирована в экспериментальный комплекс НЕВОД и используется для калибровки фотоумножителей квазисферических модулей черенковского водного детектора и измерения спектров локальной плотности электронной и мюонной компонент ШАЛ.

Проведение измерений на СКТ совместно с другими установками экспериментального комплекса НЕВОД обеспечивает их взаимную калибровку в широком диапазоне энергий.

Разработанные методы восстановления спектров локальных плотностей электронов и мюонов могут быть использованы на других установках подобного типа.

## **Личный вклад**

Автор внёс определяющий вклад в разработку и создание новой конструкции сцинтилляционных счётчиков и регистрирующей системы СКТ. Участвовал в создании стендов, разработке программного обеспечения и технологической линии по сборке, наладке и тестированию счётчиков. Принимал участие в подготовке и проведении длительного эксперимента. Им непосредственно проведены обработка и анализ экспериментальных данных по измерению спектров локальных плотностей заряженных частиц ШАЛ, а также подготовлены статьи по результатам исследований.

## **Автор защищает**

1. Систему калибровочных телескопов для регистрации электронной и мюонной компонент ШАЛ на поверхности Земли.
2. Метод амплитудной калибровки сцинтилляционных счётчиков СКТ по телескопным событиям.
3. Метод восстановления спектра локальных плотностей заряженных частиц ШАЛ по кратности срабатывания счётчиков.
4. Метод восстановления спектра локальных плотностей заряженных частиц ШАЛ по амплитудным данным счётчиков.
5. Результаты измерения спектра локальных плотностей электронов в диапазоне значений от 0.5 до 200 м<sup>-2</sup>.
6. Результаты измерения спектра локальных плотностей мюонов в диапазоне значений от 0.2 до 60 м<sup>-2</sup>.

## **Апробация**

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: 5-й Всероссийской молодёжной конференции «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (2011), Научных сессиях НИЯУ МИФИ (2014, 2015), Международных конференциях по космическим лучам (ICRC 2011, 2015), Всероссийских конференциях по космическим лучам (ВККЛ 2008, 2010, 2014) и опубликованы в их трудах. Основные результаты работы опубликованы в 4 статьях в научных журналах, цитируемых в базе данных Scopus.

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации: 92 страницы, 57 рисунков, 8 таблиц, 60 наименований цитируемой литературы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** приведено краткое описание существующих проблем в физике космических лучей при высоких и сверхвысоких энергиях. Приведены результаты исследования космических лучей, полученные разными методами на разных установках. Сформулированы значимость и цель данной работы, а также выносимые на защиту результаты.

**В главе 1** приводится описание системы калибровочных телескопов, входящей в состав экспериментального комплекса НЕВОД. Описывается процесс разработки и итоговый вариант нового сцинтилляционного счётчика для СКТ.

Система калибровочных телескопов входит в состав уникальной научной установки «Экспериментальный комплекс НЕВОД» (рис. 1), созданной на базе черенковского водного детектора (ЧВД).

Система калибровочных телескопов включает в себя две плоскости по 40 сцинтилляционных счётчиков, размещённых над и под рабочим объёмом ЧВД, как показано на рис. 1. Любая пара счётчиков из верхней и нижней плоскости образует телескоп. Счётчики размещены в шахматном порядке на площади  $8 \times 10 \text{ м}^2$  (рис. 2).

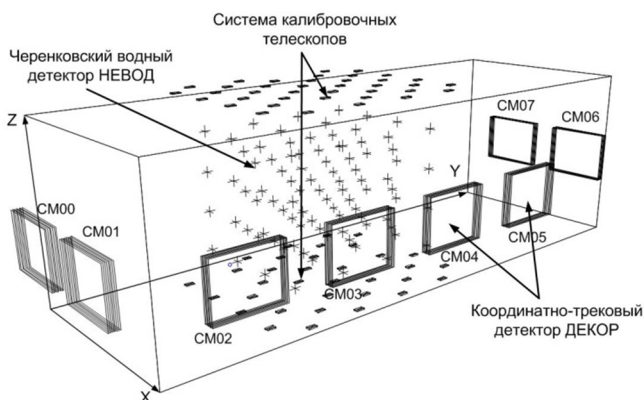


Рис. 1. Экспериментальный комплекс НЕВОД.

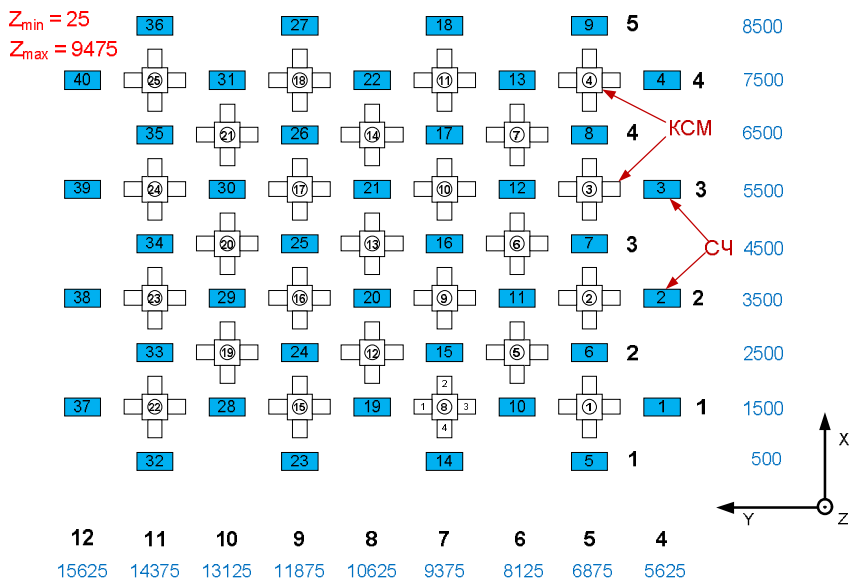


Рис. 2. Схема расположения счётчиков в плоскости СКТ.

Таким образом, конфигурация СКТ определяет 1600 различных телескопов и 40 различных зенитных углов наклона в диапазоне от 0 до 51°. Это даёт возможность калибровать по черенковскому излучению от одиночных мюонов с известными параметрами трека до 83% фотоумножителей, используемых в ЧВД. Положение трека определяется по координатам сработавших счётчиков в телескопном событии. Угловая погрешность восстановления трека мюона определяется геометрическими размерами счётчиков и не превышает 2°.

Сигналы со счётчиков по коаксиальным кабелям передаются в регистрирующую систему СКТ, размещённую в отдельном помещении вместе с электроникой обслуживания других установок экспериментального комплекса.

В процессе модернизации в 2010 – 2012 годах была разработана и реализована новая конструкция сцинтилляционного счётчика и новая регистрирующая система (РС), включающая в себя как логический, так и спектрометрический тракты. Каждый регистрирующий канал новой РС способен оцифровывать заряд отклика отдельного счётчика в диапазоне от 0 до 500 пКл.

В процессе разработки нового счётчика рассматривалось несколько его конфигураций. Реализована была модификация, удовлетворяющая критериям экономичности изготовления и однородности отклика по результатам моделирования в программном пакете Geant4 v.10.0. Сцинтилляционный блок счётчика (рис. 3) собран из двух вертикальных сборок, каждая из которых состоит из 4-х сцинтилляционных пластин (пластический сцинтиллятор марки ИФВЭ\_СЦ-301 производства ИФВЭ, г. Протвино) с размерами  $200 \times 200 \times 5 \text{ мм}^3$ . Полная сборка сцинтилляционного блока имеет вид прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $40 \times 20 \times 2 \text{ см}^3$ .

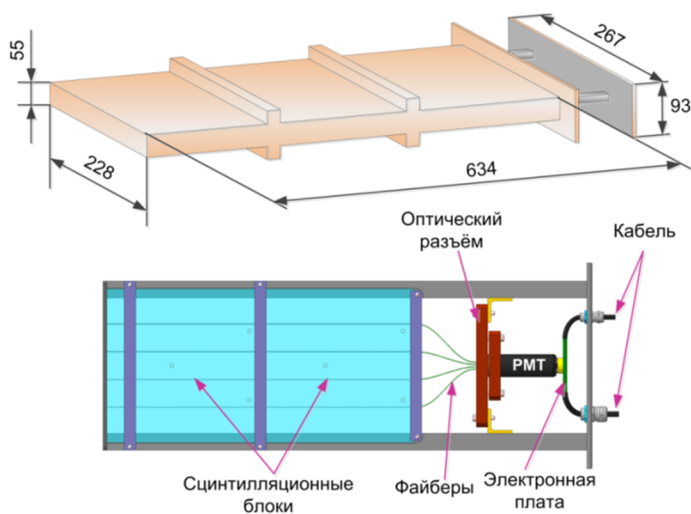


Рис.3. Сцинтилляционный счётчик СКТ.

Сцинтилляционный блок обернут с четырёх сторон диффузно отражающим материалом (Tyvek). Торцы блока заклеены серебряным скотчем. Для сбора света, образующегося при прохождении заряженных частиц, из внутреннего объема сцинтилляционного блока используется трехслойное спектрсмещающее оптическое волокно (файбер) WLS fibers Kuraray Y11 сечением  $1 \text{ мм}^2$ , проложенное внутри сцинтилляционного блока. Перед сборкой все концы файберов полируются. Свободные концы файберов подводятся к ФЭУ-85 через специальный оптический разъём из текстолита.



Для питания ФЭУ и съёма сигнала используется специальная плата преобразования напряжения и усиления сигналов спектрометрического канала, разработанная в ООО «Высоковольтные системы», г. Дубна. Плата обеспечивает преобразование низковольтного напряжения +12 В в высоковольтное в диапазоне  $-700 \div -1000$  В. Регулировка напряжения, подаваемого на фотокатод ФЭУ, осуществляется многооборотным резистором (потенциометром). Операционный усилитель, установленный на плате, обеспечивает 5-кратное усиление по напряжению с инверсией анодных сигналов ФЭУ. Сигнал на выходе счётчика имеет положительную полярность.

Питание счётчика (+12 В) и съём сигнала осуществляется по двум коаксиальным кабелям РК-50-3-34 (ТУ 16.К99-021-2005), подведённым через расположенные на крышке счётчика гермовводы (см. рис. 3).

По результатам тестирования счётчика на установке УРАГАН были получены характерные оценки его параметров:

1. Неоднородность светосбора не более 18%;
2. Эффективность регистрации при пороге 5 мВ ~ 96%.

Регистрирующая система СКТ разработана и изготовлена совместно с ООО СНИИП-Плюс, г. Москва и конструктивно разделена на два блока электроники плоскости (БЭП). Каждый БЭП обеспечивает обработку аналоговых сигналов, поступающих с 40 счётчиков одной плоскости, формирует и передаёт логические сигналы срабатывания счётчиков во внешнюю триггерную систему и осуществляет обмен данными по Ethernet с центральной вычислительной машиной (ЦВМ) экспериментального комплекса.

Блок электроники плоскости (рис. 4) имеет блочно-модульную конструкцию на основе 19-дюймового крейта размера 6U. Набор блоков одного БЭП включает:

- 8 измерительных блоков (МАО – модуль амплитудного анализа) каждый на 5 каналов, для подключения счётчиков;
- контроллер на основе микро-ЭВМ WAFER-LX3 3.5;
- блок преобразователя напряжения.

Модули МАО-02П и модуль контроллера объединены шиной РС-104, которая является аналогом 16-битной шины ISA.

Питание осуществляется от внешнего источника напряжением 48 В. На каждом БЭП установлены преобразователи напряжения (ПН) для получения рабочих номиналов: + 5 В,  $\pm 7.2$  В, + 12 В.

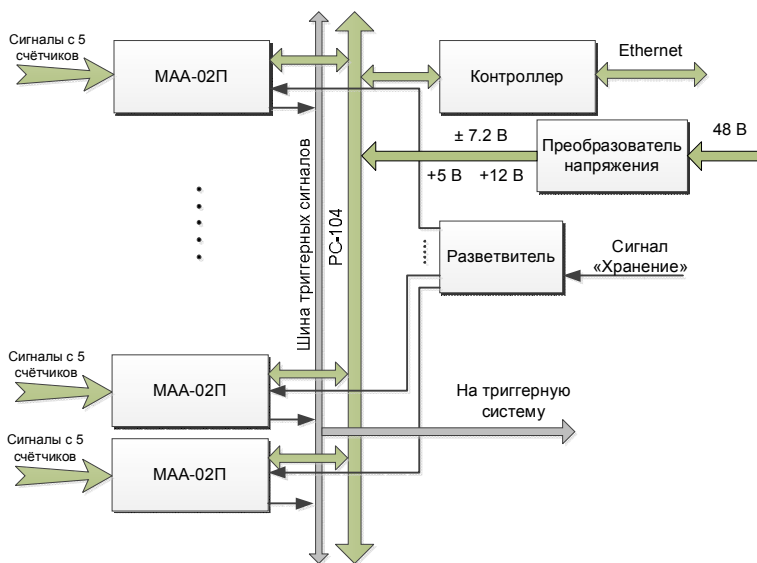


Рис. 4. Функциональная схема БЭП.

В состав каждого регистрирующего канала МАА входят спектрометрический и логический тракты. В спектрометрическом тракте зарядо-чувствительный усилитель совместно с 12-разрядным АЦП со временем преобразования сигнала в код  $\sim 2$  мкс обеспечивают оцифровку заряда сигнала со счётчика в диапазоне от 0 до  $\sim 500$  пКл. В логическом тракте сформированный по длительности 100 нс сигнал с дискриминатора используется для запуска процесса преобразования в АЦП, для определения темпа счета событий внутри БЭП на 12-разрядном счётчике, а также передаётся на внешнюю триггерную систему. Порог дискриминатора регулируется с помощью 8-разрядного ЦАП и устанавливается одинаковым в диапазоне от 0 до  $\sim 160$  мВ для пяти каналов одного МАА. Формирователь временных ворот вырабатывает логический сигнал длительностью 250 нс, задержанный на 100 – 1000 нс относительно логического сигнала со счётчика для ожидания сигнала “Хранение”, который вырабатывается внешней триггерной системой и используется для инициализации процесса записи данных зарегистрированного события.

Для СКТ триггер формируется при выполнении одного из следующих трёх условий:

I. Сработало одновременно не менее 3-х счётчиков в верхней плоскости (M1).

II. Сработало одновременно не менее 2-х счётчиков в нижней плоскости (M2).

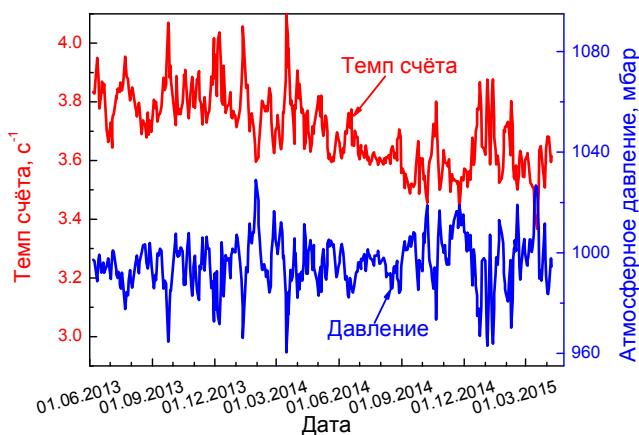
III. Сработали счётчики одновременно в двух плоскостях установки (M3).

В триггерной системе все триггеры СКТ объединены по схеме «или» в один общий сигнал.

**В главе 2** приводится описание основных типов регистрируемых событий и результаты работы СКТ в длительной серии измерений. Обсуждаются метод калибровки, оценки относительной эффективности счётчиков СКТ и процедура контроля работоспособности СКТ.

С 3 июня 2013 года по 8 апреля 2015 года на экспериментальном комплексе НЕВОД в 11-й серии измерений по общему триггеру СКТ за 12592.6 часов (~ 524.7 суток) «живого» времени было зарегистрировано ~ 167.8 млн. событий.

Изменение темпа счета общего триггера СКТ за все время работы представлено на рис. 5 совместно с графиком изменения атмосферного давления. Усреднённые темпы счёта событий по триггерам M1, M2 и M3 и барометрические коэффициенты, рассчитанные для каждого триггера СКТ, представлены в таблице 1. Изменения во времени темпов счёта событий, скорректированных на давление, для различных триггерных условий приведены на рис. 6.



*Рис. 5. Изменение темпа счета общего триггера СКТ и атмосферного давления в течение 11-й серии измерений.*

Таблица 1. Темпы счёта и барометрические коэффициенты.

Триггер	Темп счёта, с <sup>-1</sup>	Барометрический коэффициент, %/мбар
Общий	$3.800 \pm 0.126$	$- 0.216 \pm 0.006$
M1	$0.763 \pm 0.048$	$- 0.554 \pm 0.008$
M2	$0.061 \pm 0.004$	$- 0.198 \pm 0.025$
M3	$3.029 \pm 0.085$	$- 0.138 \pm 0.005$

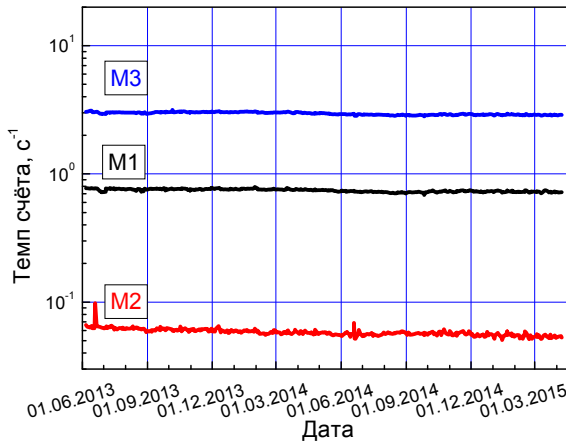


Рис. 6. Скорректированные на давление значения темпов счёта триггеров СКТ.

Триггеры M1 и M2 предназначены для регистрации многочастичных событий соответственно в верхней и нижней плоскостях СКТ. Телескопный триггер M3 позволяет проводить амплитудную калибровку как фотоумножителей ЧВД по прямому черенковскому излучению от треков мюонов, так и самих счётчиков СКТ в процессе всего времени эксплуатации установок.

Для обеспечения контроля работоспособности СКТ в процессе проведения экспериментальной серии для каждого регистрирующего канала проводились измерения следующих параметров:

1. Значение пьедестала спектрометрического канала.
2. Темп счёта счётчика.
3. Амплитуда отклика счётчика, получаемая при калибровке.
4. Оценка относительной эффективности регистрации.

Значения пьедесталов и темпов счёта контролируются по данным мониторинга, который проводится в автоматическом режиме каждые 20 минут в течение экспериментального набора данных. Значения амплитуд и относительных эффективностей определялись при off-line обработке данных с использованием специально разработанных для СКТ методов.

Если контролируемые параметры выходили за границы установленных допустимых значений (таблица 2) для хотя бы одного регистрирующего канала БЭП, то данный канал включался в график профилактических работ, а набор целиком считался «плохим» для данного БЭП (плоскости СКТ) и исключался из физического анализа.

*Таблица 2. Допустимые диапазоны значений параметров.*

№	Параметр	Диапазон
1.	Наиболее вероятная амплитуда отклика, отсч. АЦП	$50 < A < 100$
2.	Относительная эффективность	$\eta > 0.8$
3.	Темп счёта (верхняя плоскость), $c^{-1}$	$10 < v < 40$
4.	Темп счёта (нижняя плоскость), $c^{-1}$	$5 < v < 30$
5.	Значение пьедестала, отсч. АЦП	$8 < A < 50$
6.	Среднеквадратичное отклонение пьедестала, отсч. АЦП	$2 < \sigma < 9$

При обработке экспериментальных данных по триггерам М1 и М2 при исключении «плохих» наборов «живое» время измерения составило  $\sim 11806$  часов ( $\sim 492$  дня) и  $\sim 11909$  час ( $\sim 496$  дней), соответственно. За указанное время по триггеру М1 было набрано  $\sim 31.5$  млн. событий, а по триггеру М2  $\sim 2.5$  млн. событий. На рис. 7 приведены распределения по кратности срабатывания счётчиков в этих событиях. Распределение в верхней плоскости имеет заметно более пологий вид, чем в нижней. Если для описания этих зависимостей использовать степенную функцию вида  $v = Am^{-\gamma}$ , то показатель  $\gamma$  для верхней и нижней плоскостей будет иметь значения соответственно  $\sim 2.71$  и  $\sim 3.76$ . Темп счёта четырёхкратных совпадений в нижней плоскости соответствует темпу счёта при срабатывании почти всех детекторов верхней плоскости СКТ. Также для верхней плоскости, в отличие от нижней, заметно увеличение темпа счёта событий, в которых сработали все счётчики, установленные в

плоскости. Данные факты указывают на то, что регистрируемые события в плоскостях относятся к разным диапазонам первичных энергий КЛ.

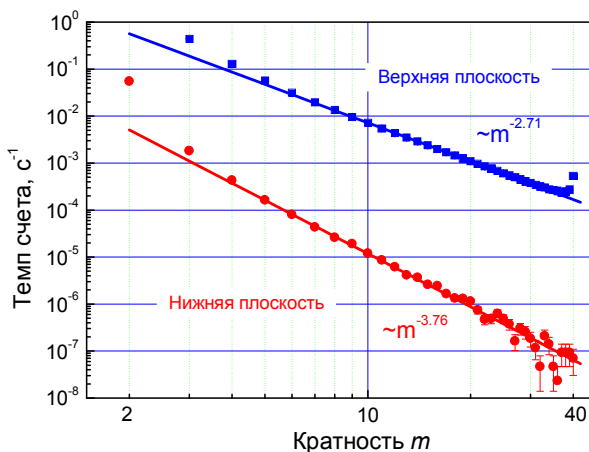


Рис. 7. Зависимость темпа счета от кратности срабатывания счётчиков в верхней и нижней плоскостях.

В главе 3 дано описание метода восстановления спектров локальных плотностей электронов и мюонов при регистрации ШАЛ в установке СКТ и его проверка на простых математических моделях.

Плотность заряженных частиц в плоскостях СКТ можно определять двумя различными способами: по амплитудным данным со счётчиков и по кратности их срабатывания.

Методика восстановления спектров локальных плотностей основана на том, что форма спектра имеет квазистепенной вид в широком диапазоне значений и плотность считается неизменной в пределах размера плоскости СКТ. Так как ШАЛ падают на установку под разными зенитными углами, то это сказывается на условиях регистрации. В частности, меняется эффективная площадь счётчиков и длина пробега частиц в сцинтиляторе. Поэтому при расчётах, наряду со степенным характером спектра, следует учитывать и зенитный угол наклона прихода ливня. В качестве пробного дифференциального спектра, была выбрана функция вида:

$$\frac{dF_0}{dDd\Omega} = A_0 (D/D_0)^{-(\beta+1)} f(\theta) [m^2 c^{-1} \text{cp}^{-1}], \quad (4)$$

где  $A_0$  – нормировочный множитель, константа  $D_0 = 1 \text{ м}^{-2}$  используется только для сокращения размерности в формуле,  $\beta$  – показатель наклона интегрального спектра локальной плотности заряженных частиц,  $f(\theta)$  – функция углового распределения прихода ШАЛ.

Для электронной и мюонной компонент необходимо использовать разные функции углового распределения, т.к. они формируются в результате двух разных каналов развития ШАЛ. Для электронной компоненты использовалась функция:

$$f(\theta) = \exp\left(-\frac{\beta X_0}{\Lambda}(\sec\theta - 1)\right), \quad (5)$$

где  $X_0$  – глубина атмосферы в точке наблюдения ( $\sim 1020 \text{ г/см}^2$ ),  $\Lambda$  – длина ослабления потока нуклонов в атмосфере ( $\sim 120 \text{ г/см}^2$ ), а для мюонной компоненты ШАЛ выбрана функция:

$$f(\theta) = \cos^{4.5} \theta. \quad (6)$$

В основе вычислений лежит определение темпа счёта событий и соответствующих им значений среднелогарифмических плотностей заряженных частиц. В случае восстановления по кратности для вычисления ожидаемого темпа счёта используется формула:

$$v_m = 2\pi \int_0^\infty \left( \int_0^1 C_n^m p^m (1-p)^{n-m} \frac{dF_0}{dDd\Omega} d \cos\theta \right) dD, \quad (7)$$

где  $m$  – кратность совпадения,  $p = 1 - \exp(-S_{\text{eff}}D)$  – вероятность попадания не менее одной заряженной частицы в счётчик, а  $S_{\text{eff}} = S \times \eta \times \cos\theta$  – эффективная площадь счётчика.

Рассчитав среднелогарифмические значения плотностей и косинусов зенитных углов наклона ШАЛ и используя формулу (7), можно записать выражение для восстановленного спектра локальных плотностей заряженных частиц ШАЛ:

$$\frac{dF}{dDd\Omega} = \frac{v_m^{\text{ex}}}{v_m} (D^* / D_0)^{-(\beta+1)} f(\theta^*) \left[ \text{м}^2 \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1} \right], \quad (8)$$

где  $v_m^{\text{ex}}$  – экспериментальный темп счёта,  $v_m$  – расчётное значение темпа счёта для выбранного показателя пробного спектра,  $D^*$  – среднелогарифмическое значение плотности,  $\theta^*$  – зенитный угол, соответствующий среднелогарифмическому значению  $\cos\theta$ .

При восстановлении по амплитуде, вычисление темпа счёта проводится внутри каждого бина гистограммы шириной  $\Delta D$ :

$$v(D, \Delta D) = \frac{2\pi A_0 D_0^{\beta+1} f_0}{\beta} \left( D^{-\beta} - (D + \Delta D)^{-\beta} \right) \quad (9)$$

где  $f_0$  – значение интеграла по косинусу зенитного угла от функции  $f(\theta)$  в диапазоне от 0 до 1.

Значение среднелогарифмического косинуса зенитного угла считается равным значению, определённому по кратности, а среднелогарифмическая плотность определяется для каждого бина данных  $\Delta D$  с помощью (9).

Итоговое выражение для восстановленного по амплитудам спектра локальных плотностей заряженных частиц ШАЛ выглядит так же, как (8), только вместо  $v_m^{\text{ex}}$  используется значение экспериментального темпа счёта в заданном бине гистограммы, а вместо  $v_m$  – рассчитанное по формуле (9) значение.

Выбор показателя пробного спектра  $\beta$  основан на сравнении расчётных и экспериментальных темпов счёта. Для той части спектра, которая может быть описана степенной функцией, отношение частот должно оставаться величиной постоянной при правильно выбранном показателе для расчётов. Такой выбор  $\beta$  является оценочным и не влияет на значение показателя наклона восстановленного спектра. Неточность подбора  $\beta$  приводит лишь к смещению точек спектра по осям координат. Таким образом, оценка показателя наклона проводится только по восстановленному спектру, и уже используя ее, проводятся вычисления среднелогарифмических значений плотностей и косинусов угла наклона.

Для проверки методики восстановления спектра использовалась модель степенного дифференциального спектра локальной плотности заряженных частиц с показателем наклона интегрального спектра локальной плотности  $\beta = 1.5$  и угловой функции распределения  $f(\theta)$ , соответствующей электронной компоненте ШАЛ.

Розыгрыш значений амплитуды отклика счётчика проводился с использованием экспериментального амплитудного распределения, которое было получено для одного из счётчиков при регистрации по телескопному триггеру МЗ.

Вид восстановленных спектров представлен на рис. 8, а численные результаты приведены в таблице 3.



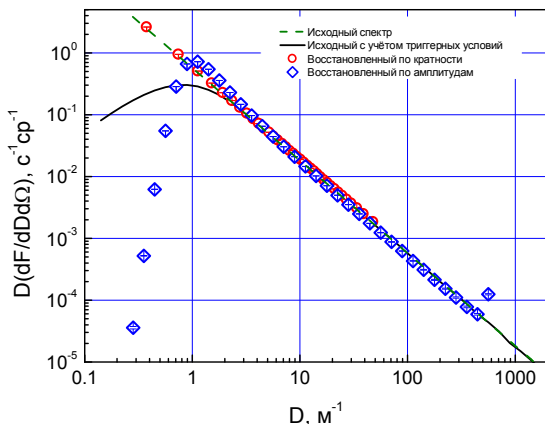


Рис. 8. Спектры локальных плотностей. Статистические погрешности расчётов находятся в пределах точек на рисунке.

Таблица 3. Показатели наклона спектров.

Спектры	Диапазон плотности, $m^{-2}$	Показатель
Исходный	—	1.5
Исходный с учётом триггерных условий	$D > 3$	$1.500 \pm 0.001$
По кратности	$1 < D < 50$	$1.50 \pm 0.01$
По амплитуде	$20 < D < 200$	$1.51 \pm 0.01$

Для спектра, восстановленного по амплитудным данным, при плотностях менее  $1 m^{-2}$  наблюдается заметное искажение. При плотностях от 1 до  $3 m^{-2}$  наблюдается небольшое превышение данного спектра над спектром, восстановленным по кратности, из-за асимметрии амплитудного распределения для одиночного мюона. В интервале плотностей от 20 до  $50 m^{-2}$  результаты восстановления спектра двумя методами практически совпадают. В диапазоне плотностей от 50 до  $500 m^{-2}$  присутствуют только данные для спектра, восстановленного по амплитудам откликов счётчиков.

**В главе 4** приводятся результаты реконструкции спектров локальных плотностей электронов и мюонов ШАЛ, полученные по данным работы СКТ в 11-й серии измерений на экспериментальном комплексе НЕВОД, и их сравнение с модельными расчётами и результатами других экспериментов.

Зависимость отношения измеренного и рассчитанного темпов счёта от кратности при выбранном значении параметра  $\beta = 1.48$  пробного спектра и восстановленный по кратностям срабатывания счётчиков в верхней плоскости спектр локальных плотностей заряженных частиц приведены на рис. 9. Значение показателя наклона  $\beta$  спектра определялось в диапазоне плотностей, которые соответствуют интервалу кратности от 8 до 34 (рис. 9 слева). При кратностях менее 8, из-за каскадов, рождаемых в крыше и стенах здания экспериментального комплекса, распределение частиц в плоскости СКТ нельзя считать равномерным, а при кратностях более 34 наклон спектра начинает увеличиваться. Сплошной линией на рисунке показана аппроксимация степенной зависимостью в диапазоне плотностей от 2 до  $30 \text{ м}^{-2}$ . Значение зенитного угла  $\theta^* = 20^\circ$ , приведённого на рис. 9 (справа), соответствует среднелогарифмическому значению  $\cos\theta$ , рассчитанному для событий в верхней плоскости при определённом значении показателя наклона спектра  $\beta = 1.482 \pm 0.002$ .

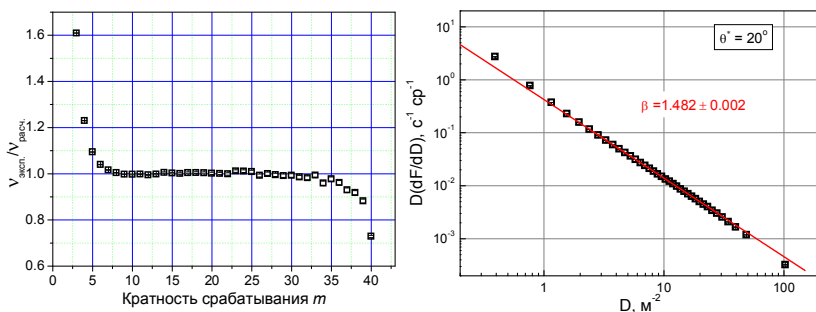


Рис. 9. Зависимость от кратности срабатывания счётчиков отношения измеренных к расчётным значениям темпов счёта (слева) и восстановленный по кратности срабатывания счётчиков спектр локальных плотностей электронов (справа) для верхней плоскости СКТ.

Для сравнения на рис. 10 (слева) приведены одновременно два спектра локальной плотности заряженных частиц, один восстановленный по амплитудным данным, а другой по кратностям срабатывания счётчиков. Для электронной компоненты спектр, восстановленный по амплитудным данным, имеет немного больший показатель наклона  $\beta = 1.503 \pm 0.005$  в диапазоне плотностей от 20 до  $200 \text{ м}^{-2}$ , чем спектр по кратности срабатывания счётчиков, но при этом спектр ещё оказывается смещённым в сторону больших плотностей. Результаты расчётов на

математической модели установки с помощью программных пакетов CORSIKA v.7.40 и Geant4 v.10.0 показали, что данное смещение является следствием влияния крыши и стен здания экспериментального комплекса. После внесения корректировки по плотности спектры локальных плотностей, восстановленные разными способами, практически совпали (рис. 10 справа) в диапазоне плотностей от 10 до 50 м<sup>-2</sup>.

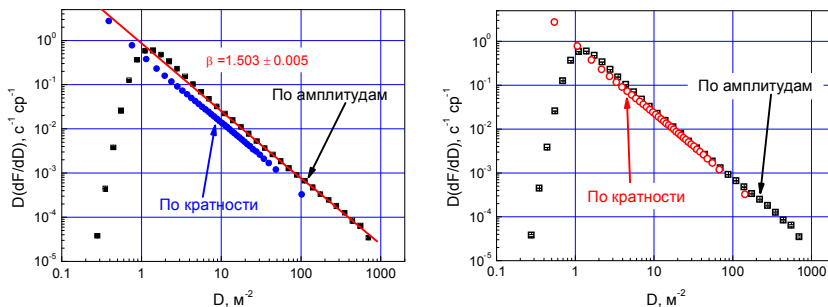


Рис. 10. Спектры локальной плотности заряженных частиц для электронной компоненты ШАЛ: измеренные (слева) и после учёта влияния конструкции здания.

Если с помощью полученных при моделировании коэффициентов смещения по плотности исключить влияние конструкции здания в спектре локальных плотностей электронов ШАЛ, то он будет находиться между расчётными кривыми для протонов и ядер железа при плотностях более 2 м<sup>-2</sup> (рис. 11), что свидетельствует о смешанном составе КЛ в указанном на рисунке диапазоне энергий с преобладанием протонов.

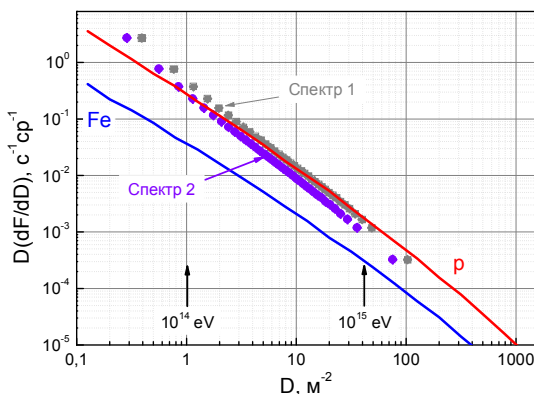


Рис. 11. Сравнение измеренного спектра локальных плотностей электронов ШАЛ с расчётными, полученными для первичных протонов и ядер железа. «Спектр 1» – восстановленный по кратности, «Спектр 2» – то же, что «Спектр 1», но с поправкой на влияние конструкции здания.

Значение показателя наклона спектра, полученное по экспериментальным данным СКТ, хорошо согласуется со средним значением, определённым по результатам работ на других установках вблизи уровня моря ( $\langle\beta\rangle = 1.50 \pm 0.02$ ).

Для мюонной компоненты процесс восстановления усложнялся тем, что при больших ( $m > 34$ ) кратностях срабатывания счётчиков темп счёта событий в нижней плоскости слишком мал ( $\sim 1 - 2$  в год). Поэтому при кратностях более 10 данные по нескольким значениям кратности пришлось объединять. Зависимость отношения измеренного и рассчитанного темпов счёта от кратности при выбранном значении параметра  $\beta = 2.05$  пробного спектра приведена на рис. 12 слева. Горизонтальными штрихами у экспериментальных точек обозначен диапазон кратностей, для которых проводилось суммирование количества событий. Линиями на спектре локальных мюонных плотностей (рис. 12, справа) показаны аппроксимации степенными функциями в двух диапазонах плотности, которые соответствуют интервалам по кратности от 4 до 20 и от 9 до 40 (см. рис. 12, слева). Приблизительной оценкой плотности мюонов, при которой происходит «излом» спектра, является значение  $5 \text{ м}^{-2}$ , которое соответствует 14-кратным совпадениям сработавших счётчиков в нижней плоскости СКТ. Расчётное значение зенитного угла, соответствующего среднелогарифмическому значению косинуса, для событий в нижней плоскости  $\theta^* = 29^\circ$ .

Спектр, восстановленный по амплитудным данным в нижней плоскости СКТ (рис. 13), оказался сильно деформированным по отношению к спектру, восстановленному по кратности срабатывания счётчиков. Причина связана с тем, что каскады, рождаемые при прохождении мюонов и других заряженных частиц через водный объём ЧВД, также могут регистрироваться счётчиками в нижней плоскости. В связи с тем, что радиус Мольера в воде составляет около 9 см, практически вся энергия электромагнитных каскадов может выделиться только в одном счётчике. Подтверждением этому является то, что для участка спектра с оценками плотности менее  $20 \text{ м}^{-2}$  характерными являются события, в которых сработало небольшое число счётчиков, среди которых имеется 1–2 с амплитудой, близкой к максимальной. При значениях оценок плотностей более  $20 \text{ м}^{-2}$  практически во всех событиях присутствуют счётчики с максимально возможным значением амплитуды отклика. Таким образом, никакого отношения к локальной плотности частиц данный спектр иметь не может.

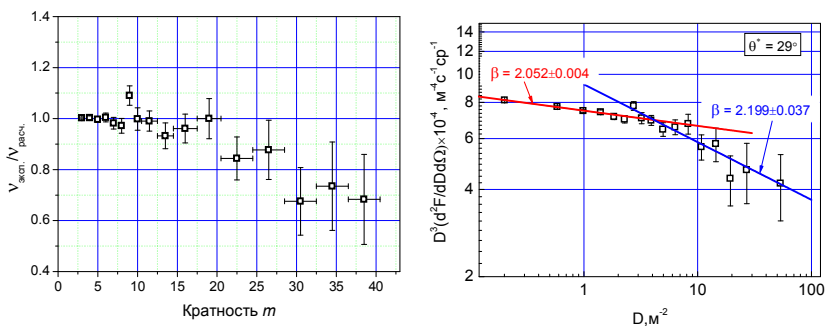


Рис. 12. Слева: Зависимость от кратности срабатывания счётчиков отношения измеренных темпов счёта к расчётным значениям. Справа: Восстановленный по кратности срабатывания счётчиков спектр локальных плотностей мюонов для нижней плоскости СКТ.

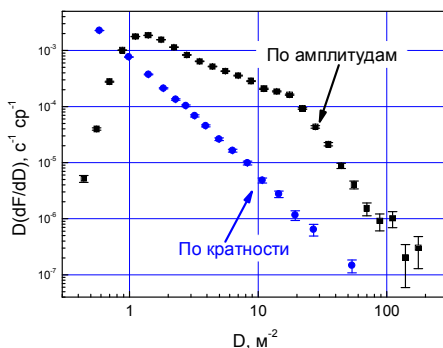


Рис. 13. Спектры локальной плотности заряженных частиц для мюонной компоненты ШАЛ.

Для определения соответствия полученного спектра локальных плотностей мюонной компоненты с энергетическим диапазоном КЛ было проведено сравнение со спектром, полученным на установке ДЕКОР для зенитного угла наклона  $35^\circ$ , как наиболее близкого к значению  $\theta^* = 29^\circ$  для СКТ. На установке ДЕКОР измерения проводились другим методом. Локальная плотность мюонов определялась по множественности треков, зарегистрированных под разными зенитными углами, начиная с  $35^\circ$ . Среднелогарифмические значения плотности в спектре для СКТ также были пересчитаны для зенитного угла наклона  $35^\circ$ . Несмотря на то, что показатели наклона

спектров близки друг другу в пересекающихся диапазонах плотностей, интенсивность для спектра, полученного на СКТ, оказалась примерно в 2 раза больше, чем на ДЕКОР (рис. 14). Вверху рисунка стрелками указаны рассчитанные среднелогарифмические значения энергии, которые дают вклад в события с соответствующей локальной плотностью, а кривыми указаны расчётные спектры для первичных протонов и ядер железа, полученные в той же работе. Результат сравнения указывает на то, что в нижней плоскости вместе с мюонами регистрируется ещё какая-то составляющая. Так же, как и в случае с электронной компонентой, для прояснения ситуации был проведён расчёт влияния бассейна ЧВД и конструкции здания на основе математической модели установки с помощью программных пакетов CORSIKA v.7.40 и Geant4 v.10.0. Скорректированный спектр локальных плотностей, в котором с помощью рассчитанных коэффициентов смещения по плотности исключено влияние конструкции здания и водного бассейна, также представлен на рис. 14 и хорошо согласуется с результатами, полученными на установке ДЕКОР. Из рисунка также видно, что «излом» в спектре локальных мюонных плотностей, измеренном на СКТ, соответствует среднелогарифмической энергии КЛ порядка  $10^{17}$  эВ.

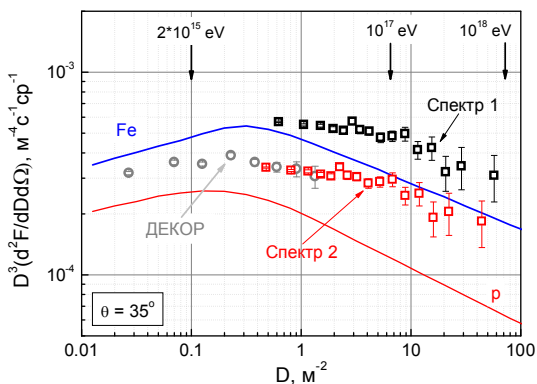


Рис. 14. Сравнение измеренного спектра локальных плотностей мюонов ШАЛ на СКТ со спектром, полученном на установке ДЕКОР. Кривыми указаны расчётные спектры для первичных протонов и ядер железа. «Спектр 1» – восстановленный по кратности спектр, «Спектр 2» – то же, что «Спектр 1», но с поправкой на влияние конструкции здания и водного бассейна.

**В заключении диссертации** сформулированы основные результаты работы:

1. Аппаратурно-методические:

- Разработана и реализована новая конструкция сцинтилляционного счётчика на основе оптоволоконного светосбора;
- Создана новая установка СКТ для калибровки ЧВД НЕВОД и регистрации электронной и мюонной компонент ШАЛ;
- Разработан метод амплитудной калибровки сцинтилляционных счётчиков по телескопным событиям;
- Разработан метод оценки относительной эффективности срабатывания счётчиков по телескопным событиям;
- Разработан метод реконструкции спектров локальных плотностей частиц по кратности сработавших счётчиков в плоскости СКТ;
- Разработан метод реконструкции спектров локальных плотностей частиц по амплитудным данным счётчиков в плоскости СКТ;
- Обеспечена работоспособность СКТ в течение длительной серии измерений (с 3 июня 2013 года по 8 апреля 2015 года).

2. Экспериментальные:

- Показана возможность измерения спектров локальных плотностей электронной и мюонной компонент ШАЛ в разных энергетических диапазонах первичных космических лучей, соответственно от  $10^{14}$  до  $10^{15}$  эВ и от  $10^{16}$  до  $10^{18}$  эВ;
- Получены оценки показателей спектров локальных плотностей заряженных частиц ШАЛ. Для электронной компоненты полученные оценки показателей наклона спектра при восстановлении по кратности и амплитудным данным близки друг другу и равны соответственно  $1.482 \pm 0.002$  и  $1.503 \pm 0.005$ . Для мюонной компоненты полученные оценки показателей наклона спектра при восстановлении по кратности равны  $2.052 \pm 0.004$  и  $2.199 \pm 0.037$ , соответственно до и после второго «излома» спектра;
- Получена оценка энергии первичных космических лучей  $\sim 10^{17}$  эВ, соответствующая второму излому энергетического спектра.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Н.В. Ампилогов, М.Б. Амельчаков, Г.И. Бритвич и др. “Сцинтилляционный детектор с оптоволоконным съёмом информации”. Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. № 5, С. 675-678 [Bull. Rus. Acad. Sci., Phys., 2009. V. 73, No. 5, P. 637-639].
2. С.С. Хохлов, М.Б. Амельчаков, В.В. Ашихмин и др. “Мюонная калибровка черенковского водного детектора НЕВОД”. Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т. 75. № 3. С. 460-462 [Bull. Rus. Acad. Sci., Phys., 2011. V. 75. No. 3. P. 431-433].
3. I.I. Yashin, M.B. Amelchakov, V.V. Ashikhmin et al. “Status of the NEVOD-DECOR experiment”, Proc. 32nd ICRC 2011, Beijing. V. 3. p. 76-79.
4. М.Б. Амельчаков, А.Г. Богданов, В.В. Исаков и др. “Измерение спектра локальной плотности заряженных частиц на установке СКТ”, Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 3. С. 401-404 [Bull. Rus. Acad. Sci., Phys., 2015. V. 79. p. 368-370].



Подписано в печать \_\_.\_\_.2015. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ

---

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