

На правах рукописи

**ХОХЛОВ Семён Сергеевич**

**КАСКАДНЫЕ ЛИВНИ  
В ЧЕРЕНКОВСКОМ ВОДНОМ ДЕТЕКТОРЕ**

**01.04.23 – Физика высоких энергий**

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

**Автор:**



**Москва - 2013**

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

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук  
Яшин Игорь Иванович

Официальные оппоненты:  
Кузьмичев Леонид Александрович,  
доктор физико-математических наук,  
НИИЯФ МГУ, г. Москва,  
заведующий отделом частиц сверхвысоких энергий

Лубсандоржиев Баярто Константинович,  
доктор физико-математических наук,  
ИЯИ РАН, г. Москва,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится 11 декабря 2013 г. в 15 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.

Автореферат разослан \_\_\_ ноября 2013 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

Измерения энергетического спектра мюонов на поверхности Земли являются важнейшей задачей, так как дают возможность исследовать энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей (ПКЛ), а также характеристики их взаимодействий. Особый интерес представляет область сверхвысоких энергий, где предсказывается как изменение энергетического спектра и массового состава ПКЛ, так и изменение в характеристиках адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий, включая появление новых частиц или состояний материи. Традиционно для измерения энергии заряженных частиц используются ионизационные калориметры, однако сильная зависимость потока мюонов от их энергии требует создания очень больших детекторов, чтобы обеспечить необходимую статистику.

Поэтому использование черенковских водных детекторов (ЧВД), представляющих собой большие водные объемы естественного или искусственного происхождения, в которых размещены оптические датчики в виде регулярной пространственной решетки, является вполне оправданным. Одной из важнейших задач таких детекторов является измерение энергии каскадных ливней, генерируемых мюонами. Однако в крупномасштабных установках, таких как Байкал, ANTARES или IceCube, из-за больших расстояний между оптическими модулями (десятки метров) энергия каскадных ливней в воде оценивается по черенковскому излучению от каскадов в точечном приближении. При этом для верификации процедур реконструкции используются модельные эксперименты, что увеличивает систематические неопределенности при определении энергии каскада. Поэтому прямое измерение каскадной кривой в ЧВД с плотной решеткой оптических модулей является актуальной экспериментальной задачей.

Особый интерес представляет измерение спектра каскадных ливней от горизонтального потока космических лучей в ЧВД, расположенном на поверхности Земли, так как из-за свойств атмосферы при увеличении зенитного угла средняя энергия мюонов быстро растет и достигает величины  $\sim 100$  ГэВ вблизи горизонта, а значительная часть частиц имеют ТэВ-ные энергии. Статистически обеспеченные данные по энергетическому спектру мюонов могут дать важную информацию о процессах генерации мюонной компоненты в космических лучах.

### **Цель работы**

Разработка методов измерения энергии каскадных ливней и восстановления каскадной кривой в черенковском водном детекторе и оценка на основе данных по каскадным ливням энергетического спектра мюонов космических лучей.

### **Научная новизна**

- Впервые разработан и реализован метод восстановления каскадной кривой по черенковскому излучению в водном детекторе с плотной объемной решеткой регистрирующих модулей.
- Впервые экспериментально получены каскадные кривые ливней в воде, восстановленные по черенковскому свету.
- Впервые получен экспериментальный спектр каскадных ливней, генерируемых околоразнонаправленными мюонами в черенковском водном детекторе.

### **Достоверность**

Мюоны, генерирующие каскадные ливни, регистрировались одновременно координатно-трековым детектором ДЕКОР и ЧВД НЕВОД, что позволило проводить перекрестную проверку методов при определении направлений прихода мюонов. Фотоумножители КСМ калибровались черенковским излучением мюонов с известным положением треков, выделенных системой калибровочных телескопов и координатно-трековым детектором ДЕКОР. Методы калибровки ФЭУ, реконструкции каскадной кривой и восстановления энергии ливня сопоставлялись с данными моделирования в программном пакете Geant4. Все события, зарегистрированные комплексом НЕВОД-ДЕКОР с восстановленной энергией каскадных ливней выше 600 ГэВ, а также реконструированные в них каскадные кривые были визуально проанализированы, что позволило избежать возможных ошибок при автоматической обработке событий.

### **Практическая значимость**

Разработанные методы могут быть использованы при измерении энерговыделений различных типов событий, регистрируемых как экспериментальным комплексом НЕВОД-ДЕКОР, так и другими экспериментальными установками подобного класса. Поскольку энергию каскадных ливней в существующих ЧВД определяют в точечном приближении, результаты исследования формы каскадных кривых в широком диапазоне энергий и их связи с переданной в каскад энергией будут использованы при верификации и коррекции методов определения энергии каскадов в глубоководных/подледных черенковских нейтринных телескопах.

### **Личный вклад**

Автор принимал непосредственное участие в разработке и создании новой регистрирующей системы черенковского водного детектора НЕВОД, в создании стендов технологической линии по сборке элементов детектора и разработке программного обеспечения для них, а также в подготовке и проведении длительного эксперимента (2011-2013 гг.). Автором написан комплекс программ первичной обработки данных ЧВД НЕВОД (анализа работоспособности установки и оценки калибровочных коэффициентов ФЭУ) и программа отбора событий с каскадными ливнями.

Автор внес определяющий вклад в разработку метода восстановления каскадной кривой по черенковскому свету и в проведение расчетов ожидаемого спектра каскадных ливней. В результате автором лично были получены формы каскадных кривых в воде, данные по экспериментальному спектру каскадных ливней, генерируемых околоразрывными мюонами, и параметры дифференциальных энергетических спектров атмосферных пионов и мюонов, а также подготовлены основные публикации по результатам работы.

### **Автор защищает**

1. Метод калибровки фотоумножителей по черенковскому излучению одиночных мюонов, проходящих на различных расстояниях под разными углами в воде.
2. Математическую модель черенковского водного детектора НЕВОД, разработанную в программном пакете Geant4, и результаты ее проверки.
3. Метод восстановления каскадной кривой и энергии ливня в черенковском водном детекторе с плотной решеткой регистрирующих модулей.
4. Экспериментальные каскадные кривые, измеренные в черенковском свете в воде.
5. Результаты анализа экспериментального спектра каскадов в ЧВД НЕВОД и параметров спектра мюонов при больших зенитных углах.

### **Апробация**

Результаты работы были представлены на российских и международных конференциях: Научной сессии НИЯУ МИФИ (2009, 2010, 2012), Баксанской молодежной школе экспериментальной и теоретической физики (2009), Молодежной школе-семинаре ФИАН (2009), Черенковских чтениях (2010, 2012, 2013), Всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ 2008, 2010, 2012),

Европейском симпозиуме по космическим лучам (ECRS 2010, 2012), Международной конференции по космическим лучам (ICRC 2009, 2011), опубликованы в их трудах, а также в 8 статьях в журналах из перечня ВАК (7 из них в журналах из перечней Web of Science или Scopus): "Краткие сообщения по физике", "Известия РАН. Серия физическая", "Astrophysics and Space Sciences Transactions", "Ядерная физика и инжиниринг" и "Journal of Physics: Conference Series".

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 132 страницы, 96 рисунков, 11 таблиц, 59 наименований цитируемой литературы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** приведен краткий обзор методов измерения энергий каскадных ливней в наиболее известных черенковских водных детекторах, сформулированы цель работы и выносимые на защиту результаты.

**В главе 1** приводится описание экспериментального комплекса НЕВОД-ДЕКОР, измерительной серии и основных типов регистрируемых событий. Обсуждаются методы калибровки ФЭУ ЧВД НЕВОД.

Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР (рис. 1) располагается в специально построенном четырехэтажном здании на территории Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Комплекс создавался для регистрации всех основных компонент космических лучей на поверхности Земли.

В состав комплекса входят следующие основные установки: черенковский водный детектор НЕВОД объемом  $2000 \text{ м}^3$ , система калибровочных телескопов (СКТ) и координатно-трековый детектор ДЕКОР, развернутый вокруг ЧВД.

ЧВД НЕВОД представляет собой многофункциональную экспериментальную установку с рабочим объемом  $9 \times 26 \times 9 \text{ м}^3$ . Детектирующая система представляет собой пространственную решетку оптических квазисферических модулей (КСМ). Каждый модуль состоит из шести фотоумножителей с плоским фотокатодом, которые ориентированы вдоль осей ортогональной системы координат. Съем сигналов производится с 12-го и 9-го динодов, что обеспечивает динамический диапазон регистрируемых сигналов от 1 до  $10^5$

фотоэлектронов (ф.э.). Пространственная решетка КСМ позволяет детектировать черенковское излучение с любого направления практически с одинаковой эффективностью. Для формирования пространственной решетки модули объединены в гирлянды-кластеры по 3 или 4 КСМ в каждой с шагом 2.5 м вдоль детектора, 2 м поперек и 2 м по глубине. Всего в состав детектирующей системы входит 91 КСМ (546 ФЭУ). Большой динамический диапазон и плотная решетка КСМ позволяют ЧВД работать в режиме калориметра.

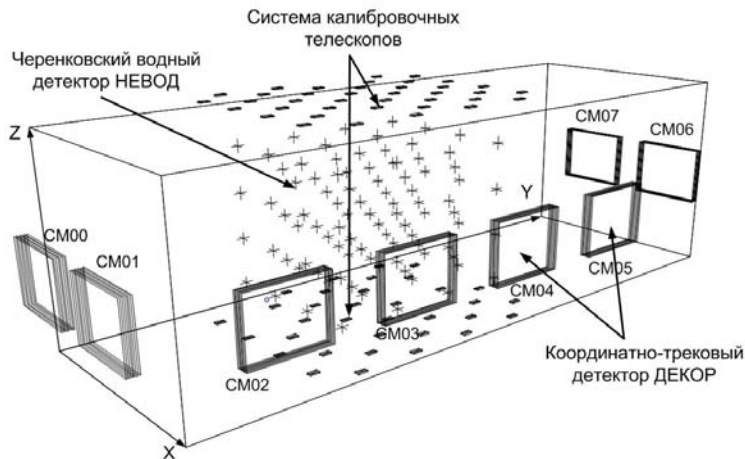


Рис. 1. Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР.

Для измерения угловых характеристик регистрируемых частиц используется координатно-трековый детектор ДЕКОР, который состоит из восьми вертикальных 8-слойных сборок стримерных трубок с резистивным покрытием катода (супермодулей, СМ) общей площадью около  $70 \text{ м}^2$ . Четыре СМ, размещенные в длинной галерее с внешней стороны водного бассейна, составляют группу Long. Супермодули, находящиеся в противоположных коротких галереях, составляют две группы Short. Двухкоординатная система внешних стрипов позволяет определять положение трека заряженной частицы с точностью  $\sim 1 \text{ см}$  по обеим координатам ( $X$ ,  $Y$ ). Угловая точность реконструкции мюонов, пересекающих СМ, лучше  $0.7^\circ$  и  $0.8^\circ$  для зенитного и азимутального углов соответственно.

Для калибровки спектрометрических трактов ЧВД во время длительных экспериментальных серий используется система

калибровочных телескопов. Система состоит из 80 сцинтилляционных детекторов с размерами пластин  $40 \times 20 \times 2$  см<sup>3</sup>. Сорок детекторов расположены на крышке и сорок на дне водного резервуара (верхняя и нижняя плоскости). Любая пара детекторов из верхней и нижней плоскостей образует мюонный телескоп. Телескопы выделяют одиночные мюоны в диапазоне зенитных углов от 0° до 45°. Оси вертикальных телескопов располагаются между гирляндами КСМ на расстоянии 1 м вдоль оси  $X$  и 1.25 м вдоль оси  $Y$ . Такие телескопы позволяют выделять треки вертикальных мюонов с точностью  $\sim 2^\circ$  и пороговой энергией 2 ГэВ.

С 23 декабря 2011 года по 20 марта 2013 года на экспериментальном комплексе НЕВОД-ДЕКОР за 7945 часов «живого» времени было зарегистрировано  $3.75 \times 10^8$  различных событий. Основными триггерными сигналами являлись:

- TrN1 – собственный триггер ЧВД “ $\geq ic$ ”: превышение заданного порога ( $i$ ) по числу КСМ с двойным совпадением сработавших ФЭУ (в серии использовались кратности “ $\geq 51c$ ” и “ $\geq 60c$ ”) для отбора событий с большой засветкой, в частности, для измерения коэффициентов сшивки диапазонов 12-го и 9-го динодов ФЭУ;
- TrN11 – телескопный триггер СКТ: срабатывания по меньшей мере по одному детектору в верхней и нижней плоскостях в пределах временных ворот 75 нс, использовался для калибровки ФЭУ ЧВД;
- TrD3 – срабатывание по меньшей мере по одному супермодулю каждой подгруппы Short в пределах временных ворот 250 нс, использовался для отбора околоразнонаправленных мюонов для калибровки ФЭУ и поиска событий с каскадными ливнями.

Отбор околоразнонаправленных мюонов проводился по триггеру TrD3 ДЕКОР. Для анализа отбирались события, в которых сработали не менее двух СМ, а треки, восстановленные на основе показаний отдельных СМ, согласовывались в пределах конуса с раствором 5°. За трек мюона принималась прямая, соединяющая середины треков в супермодулях. Такой класс событий получил условное название “OneTrack”. Мюоны в этих событиях приходят в диапазоне зенитных углов  $\theta = 84 - 90^\circ$ , при среднем угле  $\langle \theta \rangle = 87.5^\circ$ . Зависимость темпа счета событий “OneTrack” от времени приведена на рис. 2. Всего за серию было зарегистрировано 1 696 531 событие “OneTrack”.



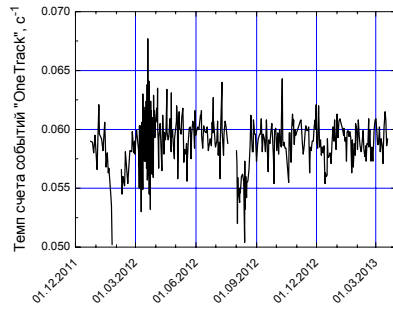


Рис. 2. Зависимость темпа счета событий “OneTrack” от времени.

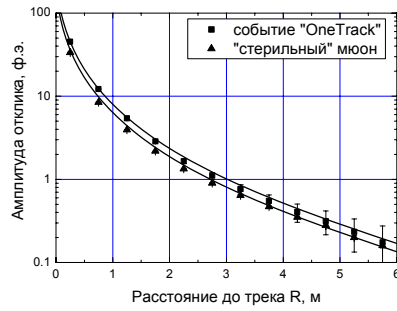


Рис. 3. Зависимость отклика ФЭУ от расстояния для “стерильного” мюона и для события “OneTrack”.

На расстояниях, много больших радиуса фотокатода, отклик ФЭУ на черенковское излучение одиночной заряженной частицы (“стерильного” мюона) может быть рассчитан по формуле:

$$A_1(R, \alpha) = \frac{S_{\text{ФЭУ}} \cdot \cos \alpha}{2\pi(R + r_{\text{ФЭУ}}) \cdot \sin \theta_C} \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{dN}{d\lambda} \cdot \eta(\lambda) \cdot \exp\left(-\frac{R}{L(\lambda) \cdot \sin \theta_C}\right) \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где  $R$  – расстояние от трека до центра фотокатода,  $\alpha$  – угол падения черенковского излучения на фотокатод,  $S_{\text{ФЭУ}}$  и  $r_{\text{ФЭУ}}$  – площадь и радиус фотокатода;  $dN/d\lambda$  – распределение черенковских фотонов по длинам волн;  $\theta_C$  – угол излучения черенковского света в воде;  $\eta(\lambda)$  – средняя квантовая эффективность ФЭУ с бищелочным фотокатодом,  $L(\lambda)$  – длина поглощения света в воде детектора,  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  – границы чувствительности ФЭУ.

На рис. 3 треугольниками представлена зависимость, рассчитанная по формуле (1) для  $\cos \alpha = 1$ , квадратами представлен отклик ФЭУ на события класса “OneTrack”. В результате взаимодействия мюонов в веществе детектора происходит образование вторичных частиц, которые генерируют дополнительные черенковские фотоны и увеличивают отклик ФЭУ в событиях “OneTrack” по сравнению со «стерильными» мюонами.

Зависимость отклика ФЭУ от расстояния до трека описывается простой аппроксимирующей функцией. Для этого свертка экспонент в интеграле (1) заменяется суммой двух экспонент – короткой и длинной. Короткая экспонента отвечает за поглощение мягкого ультрафиолета в

черенковском излучении, длинная – за остальную часть спектра. Таким образом, получаем функцию вида:

$$A_{расч}(R, \alpha) = \frac{C \cdot \cos \alpha}{R + r_{ФЭУ}} \left( (1 - F) \cdot \exp\left(-\frac{R}{L_{short}}\right) + F \cdot \exp\left(-\frac{R}{L_{long}}\right) \right). \quad (2)$$

Результаты фитирования приведены на рис. 3; были получены следующие параметры функции:  $L_{short} = 0.8$  м,  $L_{long} = 2.9$  м,  $F = 0.45$ ,  $C_{OT} = 18.05 \pm 0.04$  ф. э. · м и  $C_{Стер} = 14.37 \pm 0.12$  ф.э. · м.

Для использования при калибровке телескопных событий и событий “OneTrack” анализировалось распределение величины  $\kappa$ , значение которой вычислялось в интервале расстояний  $0.5 < R < 2.0$  м по формуле:

$$\kappa = \frac{A_{изм}}{A_{расч}(R, \alpha)}, \quad (3)$$

где  $A_{изм}$  – отклик ФЭУ в данном событии,  $A_{расч}(R, \alpha)$  – расчетный ожидаемый отклик ФЭУ.

На рис. 4 приведены распределения коэффициента  $\kappa$  для телескопных событий ( $\langle \kappa_{СКТ} \rangle = 0.91$ ,  $\sigma_{СКТ} = 0.61$ ) и событий “OneTrack” ( $\langle \kappa_{OT} \rangle = 1.01$ ,  $\sigma_{OT} = 0.65$ ). Нормированные интегральные распределения этого параметра представлены на рис. 5.

При определении коэффициента относительной чувствительности удобно использовать наиболее вероятное значение  $\kappa$ , которое определялось по интегральному распределению. Наиболее вероятному  $\kappa$  соответствует квантиль порядка 0.35 (горизонтальная линия на рис. 5).

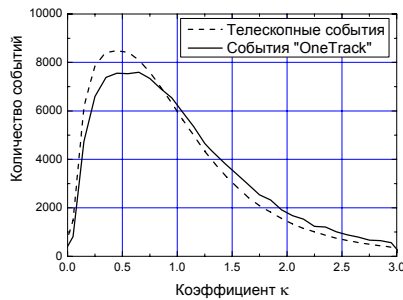


Рис. 4. Распределение коэффициентов  $\kappa$  в телескопных событиях и событиях “OneTrack”.

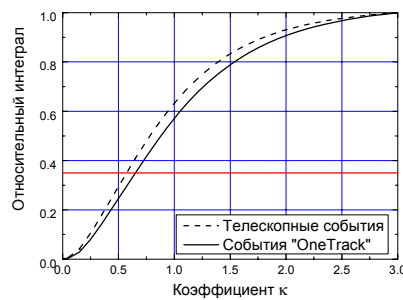


Рис. 5. Интегральные распределения коэффициента  $\kappa$  в телескопных событиях и событиях “OneTrack”.

Средняя энергия мюонов в событиях, выделенных СКТ и ДЕКОР, различается на порядок (8 ГэВ и 110 ГэВ соответственно), что проявляется в распределениях  $\kappa$ . Поэтому для совместного использования телескопных событий и событий “OneTrack” в калибровке коэффициенты  $\kappa$ , рассчитанные в событиях “OneTrack”, дополнительно делились на 1.09. Для определения коэффициента относительной чувствительности  $i$ -го ФЭУ  $Sens_i$  полученное по интегральному распределению значение наиболее вероятного  $\kappa_i^{вер}$  нормировалось на среднее значение для всех ФЭУ  $\langle \kappa_{СКТ}^{вер} \rangle = 0.583$ .

Данный метод калибровки позволяет получить коэффициенты для 310 ФЭУ (из 546 в установке) при анализе событий “OneTrack” и 455 ФЭУ при анализе телескопных событий. Совместный анализ позволяет получить коэффициенты для 491 из 546 ФЭУ ЧВД НЕВОД. Распределение ФЭУ по относительным коэффициентам чувствительности представлено на рис. 6 ( $\langle Sens \rangle = 1.02$ ,  $\sigma_{Sens} = 0.26$ ).

Для проведения физического анализа событий с большими энергосвыделениями в детекторе, когда сигналы с 12-го динода выходят из диапазона измерения АЦП ( $> 1000$  ф. э.), необходимо знать индивидуальный коэффициент сшивки диапазонов 12-го и 9-го динодов ФЭУ. Данный коэффициент определялся как среднее отношение сигналов 12-го и 9-го динодов в диапазоне засветок 375 – 975 ф. э. Распределение всех ФЭУ ЧВД НЕВОД по величине коэффициента сшивки представлено на рис. 7 ( $\langle K_{сш} \rangle = 83.6$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma_K = 14.4$ ).

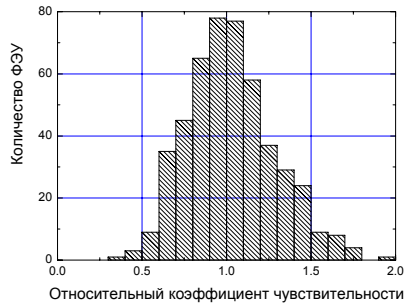


Рис. 6. Распределение ФЭУ по относительному коэффициенту чувствительности.

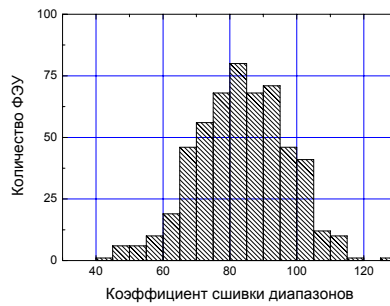


Рис. 7. Распределение ФЭУ по коэффициенту сшивки диапазонов 12-го и 9-го динодов.

В главе 2 дано описание и результаты проверки математической модели ЧВД НЕВОД. Приводится описание метода восстановления каскадной кривой по черенковскому свету, результаты реконструкции моделированных каскадных ливней в ЧВД, а также моделированные средние каскадные кривые в воде.

Для моделирования отклика детектора на различные события в объектно-ориентированном пакете программ Geant4 была создана математическая модель ЧВД НЕВОД. В модель были заложены геометрия и химический состав компонент здания экспериментального комплекса и ЧВД, учтены оптические свойства воды и спектрометрические особенности измерительных трактов.

Для проверки разработанной модели был проведен сравнительный анализ результатов моделирования событий “OneTrack” и телескопных событий с данными экспериментальной серии. Сравнение проводилось по восьми параметрам отклика ЧВД, для примера на рис. 8 и 9 приведены сравнения зависимостей среднего отклика и вероятности срабатывания ФЭУ ЧВД от расстояния в событиях “OneTrack”.

Анализ показал, что математическая модель ЧВД в целом является вполне работоспособной и хорошо согласуется с экспериментом. Основные характеристики отклика моделированных событий отклоняются от эксперимента менее, чем на 8%.

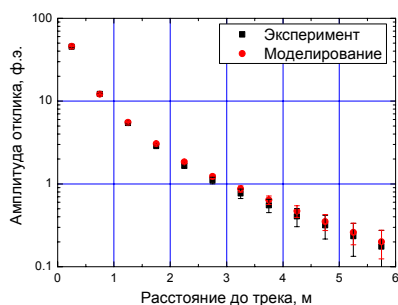


Рис. 8. Зависимость отклика ФЭУ-1(3) от расстояния для событий “OneTrack”.

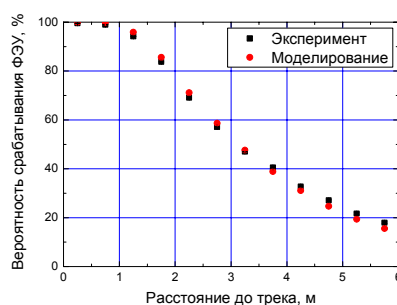


Рис. 9. Зависимость вероятности срабатывания ФЭУ-1(3) от расстояния для событий “OneTrack”.

Метод восстановления каскадных кривых в ЧВД основан на пересчете отклика каждого ФЭУ, который «видит» трек, в число излучающих на треке релятивистских частиц (рис. 10). При этом предполагается, что направление движения рожденных в ливне

электронов и позитронов близко к оси ливня, а сама ось совпадает с треком мюона. Количество заряженных частиц вдоль трека оценивается в отрезках-бинах, на которые разбивается трек. Длина каждого бина – одна радиационная единица (для воды –  $36.1 \text{ г/см}^2$ ). За начало отсчета принимается точка пересечения трека с первой из вертикальных плоскостей КСМ (с плоскостью 11, если мюон пролетел от СМ06, 07 к СМ00, 01, или с плоскостью 5, если от СМ00, 01 к СМ06, 07).

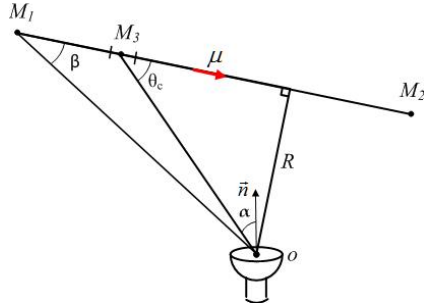


Рис. 10. Геометрия события при пересчете отклика ФЭУ в количестве излучающих частиц на треке.

Для определения числа излучающих на  $i$ -ом участке трека частиц необходимо отклик  $j$ -го ФЭУ на данное событие  $A_{\text{ФЭУ}}^j$  разделить на средний отклик ФЭУ от одиночной частицы – «стерильный» мюон  $A_1$  – с теми же геометрическими параметрами трека:

$$N_{ij} = \frac{A_{\text{ФЭУ}}^j}{A_1(R_j, \alpha_j)}. \quad (4)$$

Участок трека в событии может просматриваться

несколькими ФЭУ, поэтому число заряженных частиц усредняется с учетом спектрометрических свойств ФЭУ:

$$N_i^{\text{ЭКСП}} = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{N_{ij}}{\sigma^2(N_{ij})}}{\sum_{j=0}^n \frac{1}{\sigma^2(N_{ij})}} = \frac{\sum_{j=0}^n A_{\text{ФЭУ}}^j}{\sum_{j=0}^n A_1(R_j, \alpha_j)}, \quad (5)$$

$$\sigma(N_i^{\text{ЭКСП}}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{j=0}^n \frac{1}{\sigma^2(N_{ij})}}} = \sqrt{\frac{1.5 \cdot N_i^{\text{ЭКСП}}}{\sum_{j=0}^n A_1(R_j, \alpha_j)}}. \quad (6)$$

Полученное распределение фитируется функцией, построенной на основе уравнения каскадной кривой в приближении для одномерного каскада:

$$N^{\text{анп}}(y_0, t_0, t) = \begin{cases} 1.35, & \text{если } t < t_0 \\ \left( \frac{0.32}{\sqrt{y_0}} \right) \cdot \exp((t - t_0) \cdot (1 - 1.5 \ln s)) + 1.35, & \text{если } t \geq t_0 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $y_0 = \ln(\varepsilon_0/\beta)$ ,  $\beta = 78.3$  МэВ – критическая энергия электронов в воде,  $s = [3(t-t_0)]/[t-t_0+2y_0]$  – возраст ливня,  $t_0$  – точка генерации каскада.

Для исследования точности метода было проведено моделирование событий с каскадными ливнями фиксированных энергий. При этом в модель запускался мюон фиксированной энергией  $E_\mu = 20$  ГэВ и гамма-кванты с энергиями 10 ГэВ, 31.6 ГэВ, 100 ГэВ, 316 ГэВ, 1 ТэВ и 3.16 ТэВ (с шагом 0.5 по десятичному логарифму энергии в ГэВ). Статистика моделирования составила по 5000 событий для каскадных ливней с энергиями  $\varepsilon_0 = 10 \div 316$  ГэВ. Для ливней с энергиями  $\varepsilon_0 = 1$  ТэВ и  $\varepsilon_0 = 3.16$  ТэВ, ввиду значительного времени расчета, было промоделировано по 2700 событий.

Зависимости восстановленного параметра ливня  $y_0$  от положения максимума восстановленной каскадной кривой  $t_{max}$  приведены на рис. 11. Ноль оси  $t$  расположен в месте пересечения трека мюона первой из семи плоскостей ЧВД.

Каскадные кривые ливней, точка генерации которых расположена перед пространственной решеткой ЧВД и в конце решетки, восстанавливаются некорректно, поэтому для дальнейшего анализа ливни отбирались по условию  $-10.0 < t_{max} < 15.0$  радиационных длин.

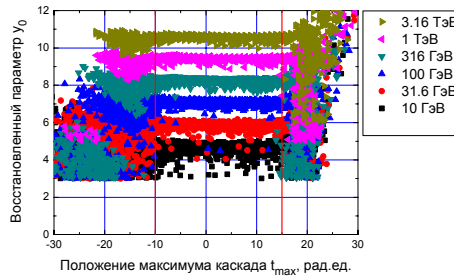


Рис. 11. Зависимость восстановленного параметра  $y_0$  от положения восстановленного максимума каскадной кривой.

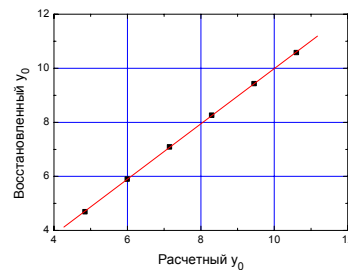


Рис. 12. Зависимость восстановленного значения параметра  $y_0$  от расчетного значения.

Зависимость восстановленных значений параметров  $y_0$  от расчетных значений представлена на рис. 12. Для учета систематического смещения зависимость фитировалась линейной функцией:

$$y_0^{\text{вост}} = a \cdot y_0^{\text{расч}} + b, \quad (8)$$

где  $a = 1.023 \pm 0.004$ ,  $b = -0.24 \pm 0.03$ . В дальнейшем данные коэффициенты использовались в качестве поправочных.

Использование одномерного приближения развития ливня приводит к некоторому искажению формы восстановленной каскадной кривой. На рис. 13 линией представлена теоретическая кривая для ливня с энергией  $\epsilon_0 = 316$  ГэВ, рассчитанная по выражению (7), звездочками представлены средние каскадные кривые по данным моделирования (контурными звездочками – для всех электронов ливня, черными – для электронов с энергиями выше порога черенковского излучения в воде  $E_{\text{чер}} = 260$  кэВ),

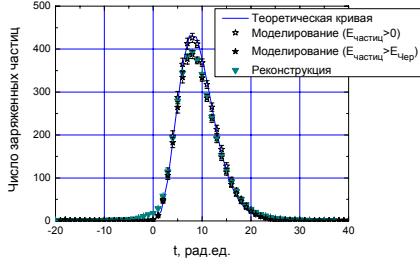


Рис. 13. Теоретическая, средние моделированные и восстановленная каскадные кривые электронно-фотонных ливней с энергией  $\epsilon_0 = 316$  ГэВ.

треугольниками представлена средняя каскадная кривая, восстановленная по разработанному методу. Как видно, средняя восстановленная кривая хорошо повторяет форму средней моделированной кривой для частиц с энергиями выше пороговой, небольшая разница в формах обусловлена рассеянием электронов в воде, которое не учитывается в одномерной модели ливня. По разнице теоретической кривой и средней моделированной каскадной кривой для частиц с энергиями выше пороговой можно сделать вывод о том, что основной вклад в систематический сдвиг при восстановлении энергии каскадного ливня вносит пороговый характер черенковского излучения.

Для определения эффективности восстановления энергетического спектра каскадных ливней разработанный метод был применен к моделированным событиям “OneTrack”. Статистика моделирования составила 755 000 событий.

Спектр каскадных ливней, генерируемых мюонами при моделировании, представлен на рис. 14 квадратиками, кружками представлен восстановленный энергетический спектр. Как видно, каскадные ливни с энергиями меньше 10 ГэВ восстанавливаются не во всех случаях. Для последующего анализа экспериментального энергетического спектра каскадных ливней была введена функция

искажения, определенная как отношение числа каскадов, восстановленных в  $i$ -ом интервале энергий, к числу каскадов, смоделированных в этом интервале энергий.

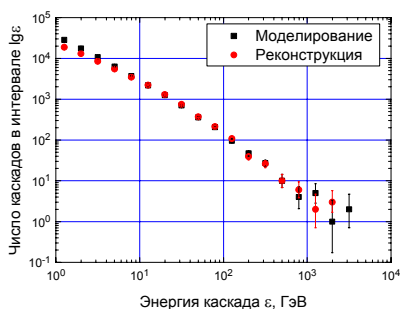


Рис. 14. Энергетические спектры моделированных и восстановленных каскадов.

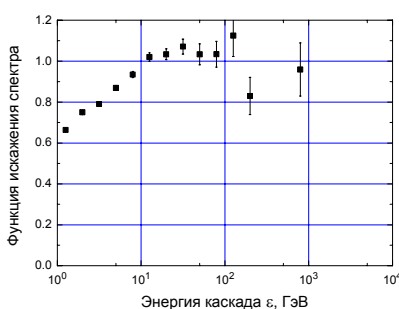


Рис. 15. Функция искажения энергетического спектра каскадов при реконструкции.

Результаты расчета функции искажения представлены на рис. 15. Для увеличения статистики ливни с энергиями больше 252 ГэВ объединены в один интервал. Как видно, для области энергий  $\varepsilon < 10$  ГэВ происходит искажение спектра, а при энергии каскадов выше 10 ГэВ спектр практически не искажается, среднее значение функции искажения в этой области составляет  $1.031 \pm 0.014$ .

Таким образом, ЧВД НЕВОД может использоваться в качестве калориметра для измерения энергии каскадных ливней.

**В главе 3** описывается отбор экспериментальных событий с каскадными ливнями, приводятся экспериментальный спектр каскадных ливней, экспериментальные средние каскадные кривые в воде, а также полученные параметры спектров атмосферных пионов и мюонов и их сравнение с результатами мировых экспериментов.

Зарегистрированные в течение экспериментальной серии ливни были разбиты на группы по десятичному логарифму энергии в ГэВ, внутри которых проведено усреднение каскадных кривых. Результаты представлены на рис. 16. Статистика при оценке средней экспериментальной каскадной кривой ливней с энергией  $\varepsilon = 1$  ТэВ составила всего 30 событий, поэтому каскадная кривая для этой энергии не является вполне гладкой.



Из 1 696 531 события «OneTrack», зарегистрированных в течение серии, было восстановлено 123 364 события с каскадными ливнями с энергией выше 1 ГэВ. Дифференциальный энергетический спектр каскадных ливней, инициированных околоразрешительными мюонами в течение экспериментальной серии 23 декабря 2011 года - 20 марта 2013 года (7945 часов «живого» времени), представлен на рис. 17.

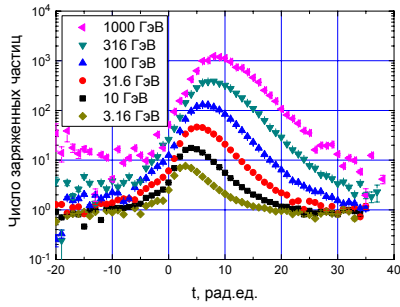


Рис. 16. Средние экспериментальные каскадные кривые ливней с энергиями  $3.2 \div 1000$  ГэВ.

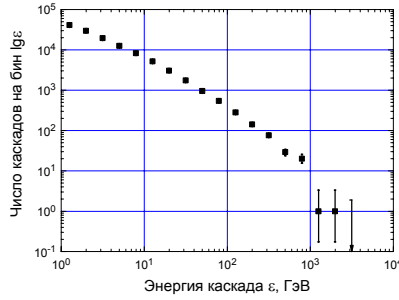


Рис. 17. Дифференциальный спектр каскадных ливней, зарегистрированных в течение экспериментальной серии.

Пионы и каоны в атмосфере образуются в результате ядерных взаимодействий первичного космического излучения с ядрами атомов воздуха. На основе формализма, развитого в работах Г.Т. Зацепина и Л.В. Волковой, функцию генерации  $G_{\pi,K}(x, E, \theta)$  числа пионов и каонов можно представить в виде:

$$G_{\pi,K}(x, E, \theta) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} N_{\text{я}}(x, E', \theta) \cdot W(E, E') dE' = I_{0\pi,K} E^{-(\gamma+1)} e^{-\chi x}, \quad (9)$$

где  $N_{\text{я}}(x, E', \theta)$  - дифференциальный энергетический спектр нуклонов;  $W(E, E')$  - вероятность того, что при ядерном взаимодействии частицы с энергией  $E'$  образуется пион или каон с энергией  $E$ ;  $I_{0\pi,K}$  - нормировочный коэффициент;  $\chi = 1/\Lambda_N$ ,  $\Lambda_N$  - пробег поглощения нуклонов в атмосфере.

На основе функции генерации пионов и каонов, учитывая их убывание в результате распада и ядерных взаимодействий самих пионов и каонов, а также гипотезу скейлинга, можно получить вид дифференциального энергетического спектра этих частиц:

$$N_{\pi,K}(x, E, \theta) = e^{-x} \frac{I_{0\pi,K} E^{-(\gamma+1)}}{1 + E_{\pi,K}(\theta) / E^{-(\gamma+1)}}, \quad (10)$$

где  $E_{\pi,K}(\theta)$  - критическая энергия, т.е. та энергия, при которой вероятность частицы распасться на пути  $dx$  равна вероятности ядерного взаимодействия на этом пути.

В системе покоя продукты двухчастичного распада пиона или каона летят изотропно, поэтому в лабораторной системе при распаде пиона или каона с энергией  $E'$  вероятность образования мюона с энергией  $E$  в интервале  $E \div E + dE$  равна  $dE/[E'(1-(\mu/M_{\pi,K})^2)]$  при  $E < E' < (M_{\pi,K}/\mu)^2 E$  и нулю вне указанного интервала ( $\mu$  и  $M_{\pi,K}$  - массы мюона, пиона и каона). Тогда функция генерации мюонов, возникших в результате распада пионов и каонов имеет вид:

$$G_{\mu}(x, E, \theta) = \int_E^Y N_{\pi,K}(x, E', \theta) \frac{M_{\pi,K} c^2 \lambda_{0\pi,K}}{c \tau_{0\pi,K} \rho(x, \theta) E' E' (1 - (\mu / M_{\pi,K})^2)} dE', \quad (11)$$

где  $Y = (M_{\pi,K}/\mu)^2 E$ ,  $\tau_{0\pi,K}$  - время жизни пиона или каона в системе покоя,  $\rho(x, \theta)$  - плотность атмосферы в рассматриваемой точке.

Далее, для расчета дифференциального энергетического спектра мюонов на уровне моря  $N_{\mu}(T, \cos\theta)$  предполагается, что генерация всех мюонов происходит на эффективной глубине  $l_{eff} = 120$  г/см<sup>2</sup>. Зенитный угол прихода мюонов на уровне моря пересчитывается в зенитный угол на высоте генерации  $\theta'$ , при этом высота генерации рассчитывается по модели двухслойной изотермической атмосферы. Численным интегрированием вдоль пути частицы рассчитывается вероятность распада мюонов с учетом ионизационных потерь энергии в воздухе.

Таким образом, в данной схеме расчета дифференциальный энергетический спектр мюонов на уровне моря зависит от показателя интегрального энергетического спектра генерации пионов  $\gamma_{\pi}$ .

Проходя через вещество, мюоны инициируют каскадные ливни посредством четырех процессов: образование дельта-электронов, образование электрон-позитронных пар, тормозное излучение и неупругое рассеяние на ядрах. Дифференциальный спектр каскадных ливней  $\mathbb{N}(\varepsilon, \cos\theta)$ , инициируемых мюонами, рассчитывался по формуле:

$$\mathbb{N}(\varepsilon, \cos\theta) = X \cdot \sum_i \int_{T_{min}}^{\infty} N_{\mu}(T, \cos\theta) \cdot \sigma_i(T - \Delta E_i, \varepsilon) dT, \quad (12)$$

где  $X = 910$  г/см<sup>2</sup> - толщина мишени;  $\sigma_i(E, \varepsilon)$  - дифференциальное сечение образования мюоном энергии  $E$  каскадного ливня с энергией  $\varepsilon$  в

$i$ -м процессе;  $T_{\min}$  – минимальная кинетическая энергия мюона, который может образовать каскад с энергией  $\epsilon$ .

Для учета геометрии эксперимента рассматривалась пара расположенных друг напротив друга супермодулей ДЕКОР, образующих в пространстве прямоугольный параллелепипед со сторонами  $a, b, c$ . В этом случае интегрирование по геометрии удобно проводить при помощи формулы:

$$N(\epsilon) = 4 \int_0^{b/c} dx \int_0^{a/c} N(\epsilon, \cos\theta) \frac{(b-cx)(a-cy)}{(1+x^2+y^2)^2} dy, \quad \cos\theta = \frac{x}{\sqrt{1+x^2+y^2}}. \quad (13)$$

Далее спектр необходимо умножить на коэффициент, учитывающий все возможные комбинации СМ в событиях:

$$f = 2 \cdot (1 + \Delta) \cdot Eff_{OT}, \quad (14)$$

где  $\Delta = 0.937 \pm 0.002$  – отношение темпов счета перекрестных и «прямых» пар СМ,  $Eff_{OT} = 0.88$  – эффективность регистрации события «OneTrack» в координатном детекторе.

Ожидаемые спектры каскадных ливней были рассчитаны для различных показателей функции генерации пионов в диапазоне  $\gamma = 1.45 \div 1.90$  с шагом 0.05, при этом учитывались каскады с  $\epsilon \geq 10$  ГэВ (12 029 событий). Результаты расчета для некоторых значений  $\gamma$  представлены на рис. 18. Экспериментальные значения числа каскадов для области энергий  $\epsilon < 10$  ГэВ приведены с учетом функции искажения спектра.

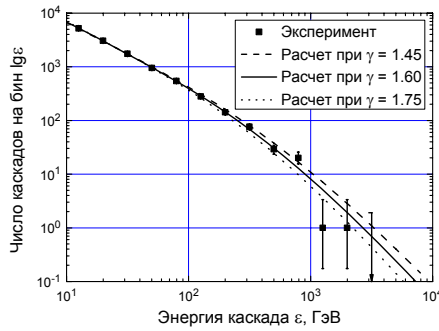


Рис. 18. Экспериментальный и ожидаемые спектры каскадов для некоторых значений показателя степени функции генерации пионов и каонов  $\gamma$ .



Рис. 19. Функция правдоподобия для показателя степени  $\gamma$ .

Значение оптимального показателя спектра пионов проводилось методом графического анализа функции правдоподобия. Поскольку число каскадов  $n_i$ , восстановленных в  $i$ -ом интервале энергии, подчинено распределению Пуассона, функция правдоподобия  $L(\gamma)$  может быть записана в виде:

$$L(\gamma) = \sum_i (n_i \ln \lambda_i(\gamma) - \lambda_i(\gamma)) + \text{const}, \quad (15)$$

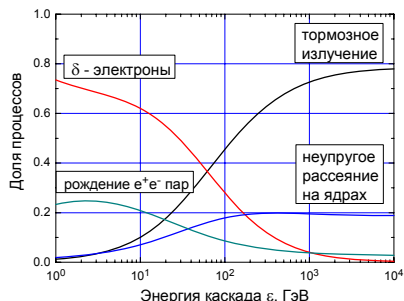


Рис. 20. Доля различных процессов при образовании каскадных ливней.

где  $\lambda_i(\gamma)$  – расчетное значение числа каскадов в  $i$ -м бине при данном показателе  $\gamma$ . На рис. 19 представлен график функции правдоподобия для показателя  $\gamma$ . Функция фитировалась параболой, после чего подбором константы максимум функции был смещен в ноль. Положению максимума соответствует значение  $\gamma = 1.59$ , 95 % доверительный интервал этого

параметра находится в пределах  $\gamma = 1.51 \div 1.67$ .

На рис. 20 приведены зависимости от энергии долей различных процессов в образовании каскадных ливней для геометрии эксперимента, рассчитанные при показателе степени функции генерации пионов  $\gamma = 1.59$ .

В рамках представленной модели спектров мюонов были рассчитаны спектры мюонов для показателей  $\gamma = 1.51$  и  $\gamma = 1.67$ . Поскольку спектр каскадных ливней в ЧВД измерен с приемлемой статистикой в области энергий  $\epsilon < 1$  ТэВ, а за инициирование таких каскадов ответственны мюоны со средними энергиями  $E < 3$  ТэВ, эта энергия была выбрана в качестве правой границы при оценке дифференциального спектра мюонов. На рис. 21 и 22 представлено сравнение полученного дифференциального спектра мюонов с результатами измерений на магнитных спектрометрах MUTRON и DEIS.

В области энергий  $E = 10 \div 1000$  ГэВ дифференциальные спектры мюонов, полученные по спектру каскадных ливней в ЧВД, согласуются с результатами экспериментов MUTRON и DEIS. При энергиях выше

1 ТэВ дифференциальные спектры по данным спектрометров лежат на границе и чуть ниже оцененного по каскадным ливням коридора спектра.

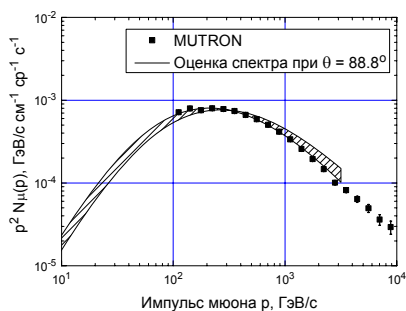


Рис. 21. Сравнение оценок дифференциального спектра мюонов с результатами эксперимента MUTRON.

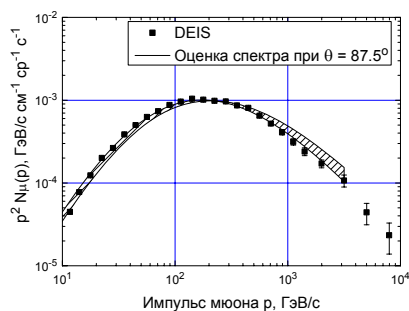


Рис. 22. Сравнение оценок дифференциального спектра мюонов с результатами эксперимента DEIS.

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

1. Аппаратно-методические:

- найден вид и определены параметры функции, аппроксимирующей отклик ФЭУ на "стерильный" мюон и на реальный околоразрывной мюон;
- разработан метод калибровки и проведены измерения коэффициентов относительной чувствительности 491 ФЭУ ЧВД;
- разработан метод и проведены измерения коэффициентов сшивки диапазонов 12-х и 9-х динодов 546 ФЭУ ЧВД, позволяющие достичь динамического диапазона  $1-10^5$  ф. э. для каждого ФЭУ;
- в программном пакете Geant4 разработана и проверена математическая модель черенковского водного детектора НЕВОД;
- разработан метод реконструкции каскадной кривой по черенковскому свету, метод отработан на моделированных событиях.

2. Экспериментальные (по данным измерительной серии 23 декабря 2011 года - 20 марта 2013 года, 7945 часов «живого» времени):

- показана возможность использования ЧВД НЕВОД в качестве калориметра для измерения энергии каскадных ливней;

- получены средние экспериментальные каскадные кривые в воде для энергий  $\varepsilon = 3 \div 1\,000$  ГэВ;
- в диапазоне энергий  $\varepsilon = 1 \div 2\,000$  ГэВ измерен дифференциальный энергетический спектр каскадных ливней, инициированных околоразрешенными мюонами в ЧВД НЕВОД;
- получена оценка показателя интегрального спектра генерации пионов, 95 % доверительный интервал которого находится в пределах  $\gamma = 1.51 \div 1.67$ ;
- на основе спектра каскадов получен дифференциальный энергетический спектр околоразрешенных мюонов, который хорошо согласуется с результатами измерений на магнитных спектрометрах MUTRON и DEIS при энергиях мюонов  $E = 10 \div 1\,000$  ГэВ.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. С.С. Хохлов, В.Г. Гулый, И.С. Карцев, В.В. Киндин, К.Г. Компаниец, М.А. Королев, А.А. Петрухин, В.Н. Распутный, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. “Новый измерительный комплекс ЧВД НЕВОД”, Сборник докладов 30-й ВККЛ (электронная форма) (2008).
2. S.Yu. Matveev, V.G. Gulyi, I.S. Kartsev, S.S. Khokhlov, V.V. Kindin, K.G. Kompaniets, M.A. Korolev, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. “The new detecting system of Cherenkov water calorimeter NEVOD”, Proc. 31<sup>st</sup> ICRC, Lodz, electronic form (2009).
3. С.С. Хохлов, М.Б. Амелчаков, В.В. Ашихмин, Н.С. Барбашина, И.А. Воробьев, Л.И. Душкин, Е.А. Задеба, В.В. Киндин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, И.А. Шульженко, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. “Статус черенковского водного детектора НЕВОД”, Труды научной сессии НИЯУ МИФИ 2010, **4**, 12-16 (2010).
4. С.С. Хохлов, И.А. Воробьев, В.Г. Гулый, И.С. Карцев, В.В. Киндин, К.Г. Компаниец, М.А. Королев, А.А. Петрухин, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. “Новая регистрирующая система черенковского водного детектора НЕВОД”, Краткие сообщения по физике, № 4, 49-51 (2010).
5. С.С. Хохлов. “Новая регистрирующая система черенковского водного детектора НЕВОД”, Труды 10-й Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики, 2010, **2**, 229-236.

6. S.S. Khokhlov, M.B. Amelchakov, V.V. Ashikhmin, I.A. Vorobiev, V.G. Gulyi, E.A. Zadeba, I.S. Kartsev, V.V. Kindin, K.G. Kompaniets, M.A. Korolev, A.A. Petrukhin, I.A. Shulzhenko, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. "New measuring system of multipurpose Cherenkov water detector NEVOD", *Astrophysics and Space Sciences Transactions (ASTRA)*, **7**, 271-273 (2011).
7. С.С. Хохлов, М.Б. Амельчаков, В.В. Ашихмин, И.А. Воробьев, Е.А. Задеба, В.В. Киндин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, М.С. Соколов, И.А. Шульженко, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. "Мюонная калибровка черенковского водного детектора НЕВОД". *Известия РАН. Серия физическая*, **75**, № 3, 460-462 (2011).
8. С.С. Хохлов, М.Б. Амельчаков, В.В. Ашихмин, Н.С. Барбашина, А.Г. Богданов, И.А. Воробьев, Д.М. Громушкин, В.Г. Гулый, А.Н. Дмитриева, Е.А. Задеба, И.С. Карцев, В.В. Киндин, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, М.А. Королев, Дж. Маннокки, С.Ю. Матвеев, А.А. Петрухин, О. Сааведра, Д.А. Тимашков, Дж. Тринкоро, Д.В. Чернов, И.А. Шульженко, В.В. Шутенко, Е.И. Яковлева, И.И. Яшин. "Современный статус черенковского водного детектора НЕВОД", *Труды III Черенковских чтений: Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц*. М., ФИАН, 2010, 30-39.
9. Е.А. Задеба, В.В. Ашихмин, А.Н. Дмитриева, В.В. Киндин, К.Г. Компаниец, А.А. Петрухин, С.С. Хохлов, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. "Нейтринный водный детектор НЕВОД на поверхности Земли", *Ядерная физика и инжиниринг*, **2**, № 6, 483-493 (2011).
10. I.I. Yashin, M.B. Amelchakov, V.V. Ashikhmin, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov, D.V. Chernov, A.N. Dmitrieva, L.I. Dushkin, D.M. Gromushkin, S.S. Khokhlov, V.V. Kindin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, G. Mannocchi, S.Yu. Matveev, V.V. Ovchinnikov, A.A. Petrukhin, O. Saavedra, I.A. Shulzhenko, V.V. Shutenko, G. Trincherо, I.A. Vorobiev, E.A. Zadeba. "Status of the NEVOD-DECOR experiment", *Proc. 32<sup>nd</sup> ICRC, Beijing, China, ID 0322* (2011).
11. Е.А. Ковыляева, S.S. Khokhlov, V.A. Khomyakov, R.P. Kokoulin, A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.I. Yashin. "Reconstruction of single muon tracks in Cherenkov water detector NEVOD", *J. Phys.: Conf. Ser.*, **409**, 012132 (2013).
12. S.S. Khokhlov, A.V. Borshevsky, D.V. Chernov, A.N. Dmitrieva, L.I. Dushkin, V.V. Kindin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets,

- A.A. Petrukhin, V.V. Shutenko, I.I. Yashin, E.A. Zadeba. "Measurements of the energy spectrum of cascade showers initiated by muons in the Cherenkov water calorimeter NEVOD", J. Phys.: Conf. Ser., **409**, 012134 (2013).
13. O. Saavedra, M.B. Amelchakov, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov, D.V. Chernov, A. Chiavassa, L.I. Dushkin, S.S. Khokhlov, V.A. Khomyakov, V.V. Kindin, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, G. Mannocchi, S.Yu. Matveev, A.A. Petrukhin, V.V. Shestakov, I.A. Shulzhenko, V.V. Shutenko, G. Trinchero, I.I. Yashin, and E.A. Zadeba. "NEVOD-DECOR experiment: results and future", J. Phys.: Conf. Ser., **409**, 012009 (2013).
14. С.С. Хохлов, Н.С. Барбашина, А.Г. Богданов, А.Н. Дмитриева, Л.И. Душкин, Е.А. Задеба, В.В. Киндин, Е.А. Ковыляева, Р.П. Кокоулин, К.Г. Компаниец, В.В. Овчинников, А.А. Петрухин, В.А. Хомяков, Д.В. Чернов, В.В. Шутенко, И.И. Яшин. "Энергетический спектр каскадных ливней, генерируемых в воде околоризонтальными мюонами", Известия РАН. Серия физическая, **77**, № 5, 707-709 (2013).

Подписано в печать 31.10.2013. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ

---

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