

На правах рукописи

ХОМЯКОВ ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

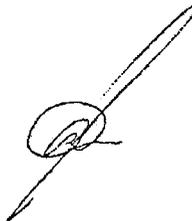
**ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ КАСКАДНЫХ ЛИВНЕЙ,
РОЖДЕННЫХ МЮОНАМИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
В ВОДЕ**

01.04.23 – Физика высоких энергий

15 МАР 2017

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

Автор:



Москва - 2016

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

- Научный руководитель: Кокоулин Ростислав Павлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НОЦ НЕВОД
НИЯУ МИФИ
- Официальные оппоненты: Безруков Леонид Борисович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ИЯИ РАН
- Шаулов Сергей Борисович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ФИАН
- Ведущая организация: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (Научно-исследовательский институт ядерной физики)

Защита состоится 19 апреля 2017 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 на базе 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.mphi.ru/dissertations>

Автореферат разослан «7» марта 2017 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

Исследование мюонов сверхвысоких энергий (выше сотен ГэВ) – одна из важнейших экспериментальных задач, решение которой может дать ответ о характеристиках потока внеатмосферных нейтрино, предсказываемых новых частицах или состояниях материи. Для таких исследований в спектроскопии мюонов высоких энергий используется множество методов, важное место среди которых занимают измерения параметров каскадных ливней, рождаемых мюонами в веществе.

Для оценки энергетических характеристик мюонов и нейтрино по генерируемым ими в черенковском водном детекторе (ЧВД) каскадам используются методы отбора ливней и восстановления их параметров, основанные на различных моделях развития электромагнитных каскадов и распространения света от них. В качестве таких моделей могут использоваться результаты аналитических решений каскадных уравнений в различных приближениях, результаты моделирования ливневых процессов методом Монте-Карло. Так, например, при работе с ливнями, регистрируемыми установкой IceCube, в качестве зависимости для углового распределения ливневых частиц используется аппроксимация результатов, полученных К. Вибушем в пакете GEANT 3.

При этом актуальной проблемой остается экспериментальное исследование распределения черенковского света от каскадных ливней в воде. Ее решение позволит усовершенствовать подходы к выделению каскадов и восстановлению их параметров, а также проверить используемые модели развития высокоэнергичных ливней. На сегодняшний день данная проблема экспериментально практически не изучена.

В действующих больших черенковских установках, таких как ANTARES, IceCube, Байкал (HT200/HT200+), расстояния между измерительными оптическими модулями кратно превышают продольные размеры регистрируемых ливней, поэтому получить детализированную пространственную картину ливня в черенковском свете с шагом, сравнимым с размерами ливня, практически невозможно.

Экспериментальный комплекс НЕВОД с черенковским водным детектором сравнительно небольшого объема (2000 м³) – уникальная установка, способная решить данную задачу. Благодаря плотной решетке оптических модулей и их измерительным характеристикам, черенковский водный калориметр (ЧВК) НЕВОД позволяет не только измерять полную каскадную кривую рожденных в детекторе ливней, но и исследовать световое поле от высокоэнергичных каскадных ливней с детализацией до полуметра. А это, в свою очередь, позволяет проверить существующие

модели развития каскадов, усовершенствовать методы работы с каскадными ливнями, рожденными мюонами в ЧВК НЕВОД и в других черенковских установках.

Цель работы

Измерить пространственное распределение черенковского излучения высокоэнергичных каскадных ливней в воде и разработать на его основе методы выделения каскадных ливней высоких энергий, рожденных мюонами в водном детекторе, и восстановления их параметров.

Научная новизна:

- Впервые экспериментально получено пространственное распределение черенковского излучения от каскадных ливней с энергиями 100 – 500 ГэВ в воде.
- Предложен и реализован новый метод восстановления параметров ливней, основанный на зависимости интенсивности черенковского излучения от глубины развития ливня на разных расстояниях от его оси.
- С использованием нового метода восстановления параметров ливней впервые измерен энергетический спектр каскадов, рожденных мюонами в воде, в широком диапазоне энергий 0.1 – 20 ТэВ.

Достоверность:

- Наблюдается хорошее согласие результатов измерения пространственного распределения черенковского излучения каскадных ливней с энергиями 100-500 ГэВ на ЧВК НЕВОД с расчетами, выполненными методом Монте-Карло.
- Корректность критериев отбора высокоэнергичных каскадов и метода восстановления их параметров подтверждена сопоставлением с экспериментальными событиями с известной осью ливней, определенной по данным координатного детектора, а также с моделированными данными.

Практическая значимость

Полученные экспериментальные данные по пространственному распределению черенковского света от высокоэнергичных каскадных ливней в воде (с восстановленной энергией более 100 ГэВ) позволили проверить модели рассеяния каскадных частиц, применяемые в

крупномасштабных черенковских установках для моделирования и обработки экспериментальных событий.

Разработанные методы восстановления параметров ливней позволили повысить на два порядка статистику по сравнению с использовавшимся ранее отбором по данным координатного детектора и продвинуться на порядок в область более высоких энергий, а также существенно расширить диапазоны зенитных и азимутальных углов исследуемых на ЧВК НЕВОД каскадных ливней.

Разработанные методы исследования высокоэнергичных каскадов в ЧВК могут быть применены на других черенковских установках, а также могут быть взяты за основу для совершенствования методик работы с каскадными ливнями в крупномасштабных установках.

Личный вклад

Автор принимал участие в поддержке работы установки при проведении длительных экспериментальных серий, в работах по настройке параметров триггерной системы экспериментального комплекса. Автором непосредственно проведены обработка и анализ экспериментальных данных по оценке сферичности отклика измерительных модулей ЧВК, измерению пространственного распределения черенковского света от каскадных ливней в воде, измерению энергетического спектра ливней; представлены доклады на конференциях различных уровней и подготовлены статьи по результатам исследований.

Автор защищает

1. Методические результаты:

- метод измерения сферичности отклика оптических модулей ЧВК НЕВОД по событиям с одиночными мюонами;
- метод измерения пространственного распределения черенковского излучения высокоэнергичных каскадных ливней в воде;
- метод проверки моделей углового распределения ливневых частиц;
- критерии отбора высокоэнергичных каскадных ливней среди событий с большим энерговыделением в решетке ЧВК;
- метод восстановления параметров высокоэнергичных каскадов на основе откликов измерительных модулей ЧВК.

2. Физические результаты:

- свойства сферичности отклика квазисферического модуля;
- отклик ЧВК на одиночный мюон;

- пространственное распределение черенковского излучения от высокоэнергичных каскадных ливней;
- результаты отбора и восстановления характеристик ливней, рожденных мюонами в воде;
- дифференциальный энергетический спектр каскадных ливней в интервале зенитных углов более 55° в диапазоне энергий 0.1 – 20 ТэВ.

Апробация

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: Научных сессиях НИЯУ МИФИ (2014, 2015), Международных сессиях-конференциях Секции ядерной физики ОФН РАН (2014, 2016), Восьмых и Девятых Черенковских чтениях (2015, 2016), Всероссийских конференциях по космическим лучам (ВККЛ 2014, 2016), Международной конференции по физике частиц и астрофизике (ICPPA 2015). Основные результаты опубликованы в пяти статьях в научных журналах, входящих в перечни ВАК (перечень от 23.11.2016), Web of Science и/или Scopus.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 117 страниц, 71 рисунок, 5 таблиц, 56 наименований источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведено краткое описание методов спектрометрии мюонов высоких энергий, среди которых более детально рассмотрен метод оценки энергетических характеристик мюонов и нейтрино по генерируемым ими в веществе каскадам. Сделан краткий обзор действующих и перспективных крупномасштабных черенковских водных детекторов, рассмотрены особенности восстановления параметров регистрируемых в них каскадных ливней. Отражена цель работы, научная новизна и актуальность разработанных методов и результатов, полученных на черенковском водном калориметре НЕВОД.

В главе 1 описан экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР, на котором проводились измерения. Приведены сведения о конфигурации и настройках параметров триггерной системы в измерительной серии. Дано описание основных типов событий, на основе которых изучались характеристики каскадных ливней.

Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР в НИЯУ МИФИ создан с целью регистрации основных компонент космических лучей на поверхности Земли. В состав экспериментального комплекса входят следующие основные установки: черенковский водный детектор (ЧВД) НЕВОД, система калибровочных телескопов (СКТ), координатно-трековый детектор ДЕКОР (рис. 1).

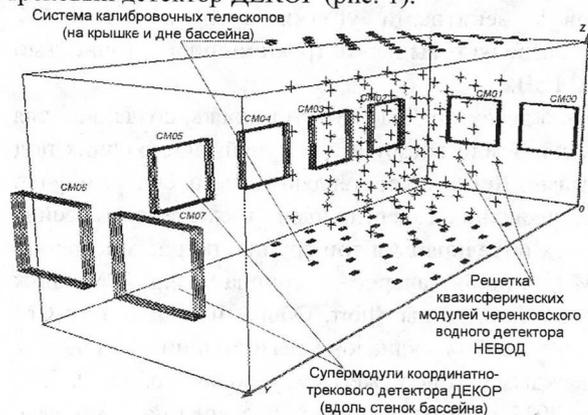


Рис. 1 Установки экспериментального комплекса НЕВОД-ДЕКОР

Черенковский водный детектор НЕВОД – многофункциональная экспериментальная установка объемом 2000 м^3 (размер бассейна – $9 \times 9 \times 26 \text{ м}^3$). Для регистрации космических лучей с любого направления установка имеет детектирующую систему из плотно размещенных измерительных модулей. Она представляет собой решетку из 64 модулей ($4 \times 4 \times 4$ модуля) с шагом 2.5 м вдоль детектора, 2 м по ширине и 2 м по глубине, в которую вложена другая – из 27 модулей ($3 \times 3 \times 3$ модуля, с теми же шагами между модулями) со смещением на полшага по всем направлениям (центры решеток совпадают). В текущей конфигурации ЧВД имеет всего 91 квазисферический модуль (КСМ).

Квазисферический модуль содержит шесть ФЭУ-200 с плоским фотокатодом диаметром 15 см, ориентированных вдоль осей ортогональной системы координат. Благодаря двухдиодному съему сигналов с ФЭУ обеспечивается большой динамический диапазон регистрируемых сигналов: от одного до 10^5 фотоэлектронов. Для каждого КСМ возможна выработка трех типов триггерных сигналов: «а» (от *any*) вырабатывается в случае срабатывания любого из шести ФЭУ КСМ, «b» (от *bottom*) вырабатывается в случае срабатывания направленного вниз ФЭУ, «с» (от *coincidence*) вырабатывается в случае срабатывания хотя бы двух непротивоположно направленных ФЭУ в пределах временного интервала в 150 нс.

Система калибровочных телескопов, предназначенная для калибровки спектрометрических трактов ЧВД в течение длительных экспериментальных серий, включает 80 сцинтилляционных детекторов, 40 из которых расположены на крышке бассейна (верхняя плоскость) и 40 – на дне (нижняя плоскость). Любая пара, состоящая из верхнего и нижнего детекторов, образует мюонный телескоп, позволяющий выделять треки мюонов с зенитными углами в диапазоне $0 \div 45^\circ$. Вертикальные телескопы позволяют выделять треки мюонов с точностью 2° и пороговой энергией 2 ГэВ.

Координатно-трековый детектор ДЕКОР – установка, созданная для регистрации на поверхности Земли космических лучей, приходящих под большими зенитными углами. Детектор составляют восемь супермодулей (СМ), расположенных вертикально в галереях вдоль трех стенок бассейна ЧВД НЕВОД. Супермодули объединены в три группы по расположению в галереях: четыре СМ длинной галереи – группа Long, СМ двух коротких галерей образуют две группы Short. Общая площадь всех СМ составляет около 70 м^2 (32768 каналов регистрации). Точность определения координат каждым СМ не хуже 1 см, угловая – около 0.7° .

В период с 16 июля 2013 года по 8 апреля 2015 года на комплексе НЕВОД-ДЕКОР проводилась 11-я измерительная серия, данные которой использовались в настоящей работе. Длительность измерений составила 11 897 часов живого времени. Было зарегистрировано около $7 \cdot 10^8$ событий. В течение серии установки ЧВД, ДЕКОР, СКТ работали совместно и в полной конфигурации: 91 КСМ ЧВД НЕВОД, 80 счетчиков СКТ, 8 супермодулей ДЕКОР. В данной работе использовались следующие триггерные условия:

- TrN1 с условием « $\geq 60\text{с}$ » (срабатывание не менее 60 КСМ, в каждом из которых работали хотя бы два соседних ФЭУ);
- TrD3 – срабатывание хотя бы по одному супермодулю ДЕКОР каждой подгруппы Short в пределах временных ворот 250 нс.

В целях исследования характеристик каскадных ливней, рожденных мюонами в бассейне черенковского детектора, использовались два класса событий. Один из них – события с пролетом через установку околоразноуровневого мюона вдоль продольной оси бассейна ЧВД. Их отбор проводился с помощью супермодулей ДЕКОР группы Short-Short. Отбирались события, где сработали только два СМ, расположенные в галереях на противоположных коротких сторонах бассейна (по одному СМ с каждой стороны). При этом треки мюонов, восстановленные по данным каждого СМ, должны совпадать в пределах конуса с раствором,

не превышающим 5 градусов. В этом случае предполагалось, что через оба супермодуля прошел один мюон. Класс таких событий получил название «OneTrack».

Другой класс – события с большим энерговыделением (триггер « $\geq 60\text{с}$ »). Такие события представлены не только каскадными ливнями, рожденными в ЧВД от мюонов и адронов, но и другими типами разнокачественных событий. К ним относятся:

- широкие атмосферные ливни, в том числе со стволами;
- группы мюонов;
- прочие многочастичные события (включая комбинированные).

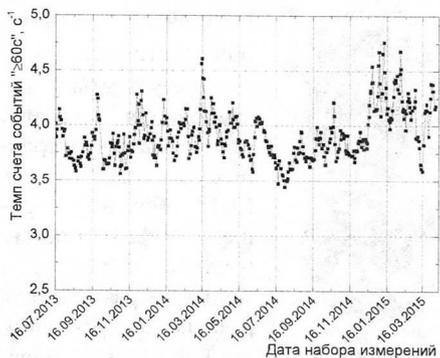


Рис. 2 Темп счета событий с триггером « $\geq 60\text{с}$ » в 11-ой серии

Поэтому задача исследования ливней в событиях от триггера « $\geq 60\text{с}$ » предполагает разработку критериев отсева событий других типов. Темп счета событий с триггером « $\geq 60\text{с}$ » в одиннадцатой измерительной серии показан на рис. 2.

Резкие изменения темпа счета триггера « $\geq 60\text{с}$ » в основном связаны с барометрическим эффектом. Средняя частота регистрации событий по триггеру « $\geq 60\text{с}$ » в серии измерений составила 3.9 с^{-1} .

В главе 2 приведены результаты исследования зависимости отклика модуля ЧВД НЕВОД от направления прихода черенковского света от трека частицы. Получена зависимость от расстояния до трека отклика квазисферического модуля на одиночную заряженную частицу.

Для исследования свойств отклика квазисферического модуля брались экспериментальные события «OneTrack». Для каждого модуля, который должен видеть черенковский свет от трека, определялось направление падения света на модуль, рассчитанное относительно центра КСМ. Отклик КСМ (в фотоэлектронах) рассматривался для разных диапазонов расстояний до трека и рассчитывался в двух вариантах:

$$B_1 = (R / R_{\text{норм}}) \sum_{i=1}^6 A_i \quad (1)$$

$$B_2 = (R / R_{\text{норм}}) \sqrt{\sum_{i=1}^6 A_i^2} \quad (2)$$

где R – расстояние от трека мюона до центра КСМ, $R_{\text{норм}}$ – расстояние, соответствующее середине диапазона, A_i – отклики ФЭУ КСМ.

В результате измерений для каждого диапазона расстояний и для каждого из вариантов расчета отклика было получено усредненное по сфере среднеквадратичное отклонение от среднего отклика КСМ, отражающее свойство сферичности КСМ. Эта величина, выраженная в процентах, составила около 8% для диапазона 0.5 – 1.0 м, менее 5% для диапазона 1.0 – 2.0 м и в пределах 7% для больших расстояний. На рис. 3 представлены распределения откликов КСМ для обоих вариантов расчета

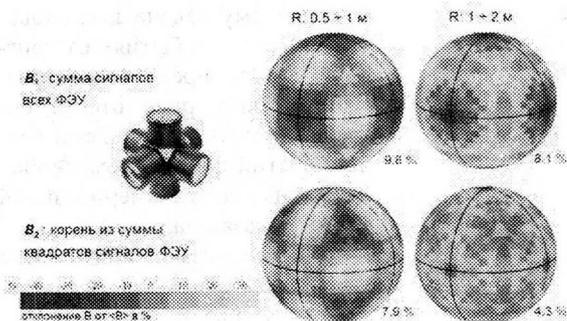


Рис. 3 Распределение значений амплитудного отклика и показатель сферичности КСМ для разных вариантов расчета отклика в величине B_2 .

Одной из важнейших характеристик черенковского водного детектора является отклик ФЭУ квазисферического модуля ЧВД на одиночную заряженную частицу в зависимости от расстояния до трека этой частицы. Исследование калибровочной зависимости проводилось на основе данных специальных наборов, в которых был установлен более низкий по сравнению со штатными наборами порог регистрации сигнала с ФЭУ, составляющий 0.25 ф.э. (в штатных наборах – 2.5 ф.э.). Для расчетов брались события «OneTrack» в геометрии Short-Short.

Отклик ФЭУ с плоским фотокатодом в случае плоского фронта падающего света пропорционален косинусу угла падения света на фотокатод (по крайней мере, в некотором диапазоне углов падения), поэтому в работе использовалась зависимость нормализованного отклика ФЭУ (A_{\perp}), то есть приведенного к направлению внешней нормали

отклика и для двух указанных диапазонов расстояний.

Результаты исследования показали, что на малых и средних расстояниях КСМ обладает хорошей сферичностью отклика. При этом меньший разброс для разных направлений прихода света обеспечивается при использовании в каче-

фотокаатода путем деления измеренного отклика на косинус угла падения черенковского света. При этом брались ФЭУ, «видящие» прямой свет от трека мюона под углом менее 60° (косинус угла падения прямого света на фотокаатод больше 0.5). Зависимости величин откликов A_{\perp} от расстояния от трека до центра фотокаатода с шагом 0.25 м для 10-й и 11-й измерительных серий приведены на рис. 4.

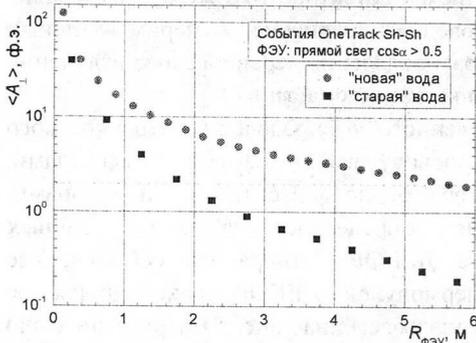


Рис. 4 Нормализованный отклик ФЭУ в событии «OneTrack» в зависимости от расстояния до трека мюона

«новой» воде такой величине отклика соответствует расстояние около 6 метров.

Было исследовано заметно проявившее себя в условиях очищенной воды влияние отражения черенковского света от поверхности воды внутрь бассейна ЧВД. В итоге была получена зависимость для отклика ФЭУ на одиночный мюон с исключением вклада отраженного света. Отклик квазисферического модуля рассчитывался как корень из суммы квадратов амплитуд всех его ФЭУ (B_2). Полученная по событиям «OneTrack» аппроксимация этой величины имеет следующий вид:

$$B_{\mu}(R) = \frac{18.7 \text{ ф.э.} \cdot \text{м}}{R} \cdot e^{-\frac{R}{10.0 \text{ м}}} \quad (3)$$

Отклик модуля на одиночную заряженную частицу (каскадный электрон) был получен, исходя из соотношения средних полных энергетических потерь мюона с энергией 100 ГэВ (средняя энергия околоразностных мюонов на поверхности Земли в геометрии Short-Short) и потерь электрона в воде:

$$B_1(R) = B_{\mu}(R) \cdot \frac{\beta}{\langle dE_{\mu} / dx \rangle \cdot l} \approx \frac{B_{\mu}(R)}{1.39} \quad (4)$$

где $\langle dE_\mu / dx \rangle$ – средние полные потери мюона с энергией 100 ГэВ в воде, равные 3.01 МэВ см²/г, $l = 36.1$ г/см² – радиационная длина в воде, $\beta = 78.3$ МэВ – критическая энергия электронов в воде.

В главе 3 представлен метод измерения пространственного распределения черенковского излучения, генерируемого каскадными ливнями в черенковском водном детекторе НЕВОД, и анализ полученного распределения. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов распределения черенковского излучения для различных моделей рассеяния каскадных частиц.

При измерении пространственного распределения черенковского света от каскадных ливней за основу взяты события с каскадами, рожденными в бассейне детектора окологоризонтальными мюонами. Трек мюона в таких событиях определялся на основе данных координатно-трекового детектора ДЕКОР. Отбирались события, где мюон прошел через пару супермодулей ДЕКОР, находящихся на противоположных коротких сторонах бассейна (рис. 5). При этом было принято допущение, что трек мюона совпадает с осью рожденного этим мюоном каскадного ливня.

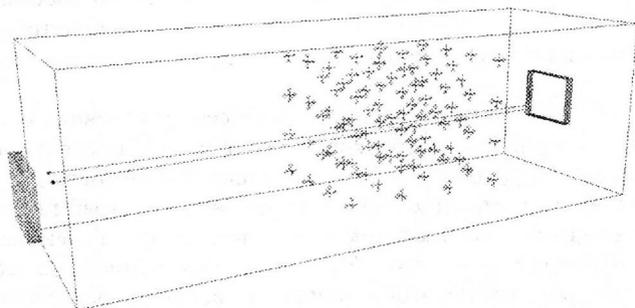


Рис. 5 Пример события с каскадным ливнем от окологоризонтального мюона, развившимся в чувствительной области детектора

Восстановление параметров каскадных ливней проводилось на основе метода (работы С.С. Хохлова и др.), в котором принято допущение, что все ливневые электроны движутся вдоль оси ливня и излучают фотоны под одним и тем же углом – углом черенковского излучения, составляющим для воды около 42°. Также предполагается, что сама ось ливня совпадает с треком мюона. Согласно данному методу проводится измерение каскадной кривой ливня путем пересчета откликов

ФЭУ, регистрирующих черенковское излучение от ливневых частиц, в число этих частиц, соответствующее определенному участку развития ливня.

Энергия ливня ε_0 восстанавливается в результате фитирования экспериментальной зависимости количества каскадных частиц от глубины аппроксимацией Грейзена в приближении Б для одномерного каскада:

$$N_{+\mu}^{\text{аннр}}(y_0, t_0, t) = \begin{cases} 1.39, & \text{если } t < t_0 \\ \left(\frac{0.32}{\sqrt{y_0}} \right) \cdot \exp((t-t_0) \cdot (1-1.5 \ln s)) + 1.39, & \text{если } t \geq t_0 \end{cases} \quad (5)$$

где t_0 (в радиационных длинах) – глубина генерации ливня, $y_0 = \ln\left(\frac{\varepsilon_0}{\beta}\right)$, $\beta = 78.3$ МэВ – критическая энергия электронов в воде, величина 1.39 – вклад родительского мюона (рассчитан, исходя из средних полных потерь энергии мюона с энергией 100 ГэВ в воде), s – возраст ливня.

Для каждого из отобранных событий с каскадными ливнями была измерена зависимость отклика КСМ от двух величин: от расстояния R от центра КСМ до оси ливня и от глубины развития ливня вдоль его оси. За начало отсчета глубины взята восстановленная точка максимального развития ливня t_{max} , соответствующая возрасту $s = 1$.

В качестве отклика КСМ взят корень из суммы квадратов амплитуд сработавших ФЭУ (для квазисферического модуля на основе шести ФЭУ эта величина слабо зависит от направления прихода фронта черенковского света). Поскольку в выборке присутствуют ливни с разными значениями восстановленной энергии в диапазоне 100-500 ГэВ, отклики модулей нормировались на восстановленную энергию каскада:

$$B = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \sqrt{\sum_{i=1}^6 A_i^2} \quad [\text{ф.э.}] \quad (6)$$

где ε_0 – нормировочная энергия 200 ГэВ, близкая к средней энергии ливней в выборке;

ε – восстановленная энергия ливня в событии;

A_i – амплитуда i -го ФЭУ КСМ (в фотоэлектронах, ф.э.).

Полученные указанным образом зависимости $B(R, t-t_{\text{max}})$ усреднялись для всех событий выборки. Итоговое среднее пространственное распределение величины B (в фотоэлектронах на КСМ), характеризующей интенсивность черенковского излучения, приведено на рис. 6.

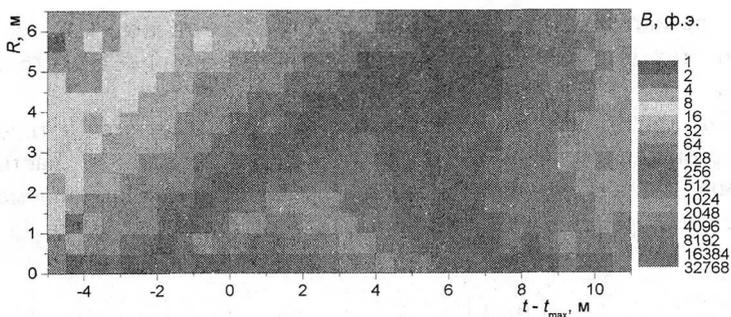


Рис. 6 Зависимость средней интенсивности черенковского света B от глубины развития ливня ($t - t_{\max}$) на разных расстояниях от оси ливня R

Видно, что свет от ливня распространяется во всех направлениях. При этом явным образом выделяется преимущественное направление светового конуса. Оно соответствует передней полусфере, определяемой направлением развития ливня.

Основываясь на том, что параметры ослабления света в воде одинаковы для каскадного ливня и для одиночного мюона, было рассмотрено отношение интенсивности $B(R, t - t_{\max})$ черенковского излучения для каскадов к интенсивности $B_{\mu}(R)$, измеренной для одиночных мюонов (формула (3)). Это позволяет скомпенсировать влияние ослабления света. Для того, чтобы наблюдать черенковское излучение только от каскадных частиц, было дополнительно вычтен вклад мюона. Пространственное распределение результирующей величины приведено на рис. 7.

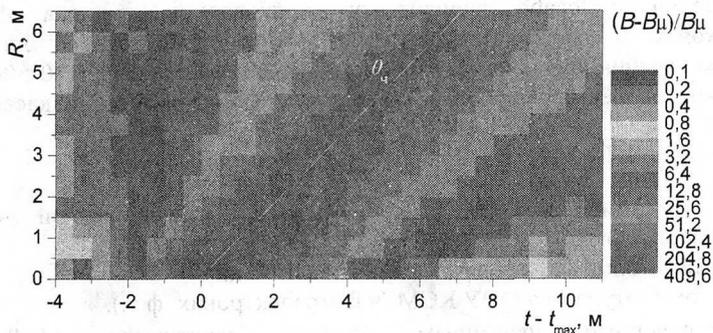


Рис. 7 Зависимость отношения отклика на каскад к отклику на одиночный мюон от глубины развития ливня ($t - t_{\max}$) на разных расстояниях от оси ливня (R)

На рисунке хорошо видно изменение относительной интенсивности черенковского света в зависимости от направления, задаваемого углом между данным направлением и осью ливня. Характерно, что границы между зонами разной интенсивности представляют собой почти прямые линии, которые расходятся веерообразно. Это подтверждает предположение, что фактор ослабления света был в значительной степени исключен.

Были рассмотрены продольные профили распределения величины $(B-B_\mu)/B_\mu$ для разных расстояний от оси ливня. На рис. 8 показаны экспериментальные профили для трех интервалов расстояний от оси ливня: от 0.5 м до 1.0 м, от 2.5 м до 3 м и от 4.5 м до 5 м.

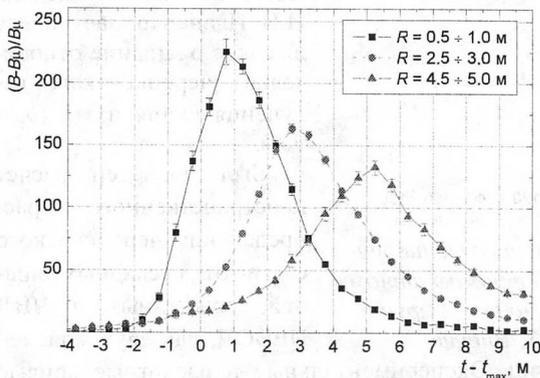


Рис. 8 Зависимость величины $(B - B_\mu) / B_\mu$ от глубины развития ливня ($t - t_{\max}$) для трех интервалов расстояний от оси ливня

близки. Профиль, отвечающий наиболее близкому расстоянию от оси ливня (где расхождение света ещё не слишком сказывается), по сути представляет собой усредненную каскадную кривую.

Для сравнения экспериментальных данных с расчетами распределения черенковского излучения были взяты две модели углового распределения ливневых частиц. Первая из этих моделей — аналитический расчет группы И.П. Иваненко среднего углового распределения ливневых частиц на основе решения каскадных уравнений. Вторая модель — используемая в коллаборации IceCube аппроксимация для зависимости, которая получена в результате моделирования, выполненного К.Х. Вибушем в программном пакете GEANT 3.

Наблюдается уширение профилей с увеличением расстояния от оси ливня, что связано с расхождением черенковского света вследствие рассеяния каскадных частиц. При этом, поскольку эффект ослабления света в значительной мере исключен, площади под кривыми профилями, отражающие величину энергии ливня,

Для указанных моделей рассеяния каскадных частиц было рассчитано угловое распределение черенковских фотонов. При этом использовалось допущение, что все фотоны испускаются под черенковским углом к треку заряженной каскадной частицы, который составляет около 42° . Полученные для обеих моделей угловые распределения черенковского излучения от каскадных ливней (нормированные на полное число фотонов) представлены на рис. 9. Из графиков видно, что модели дают близкий

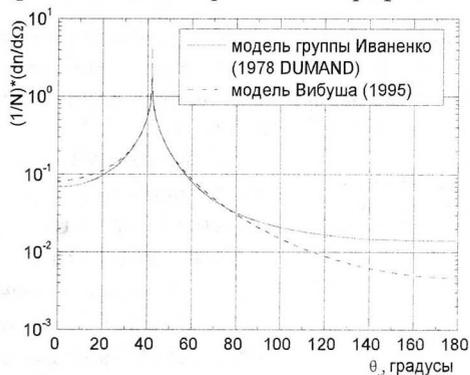


Рис. 9 Среднее угловое распределение черенковских фотонов в электромагнитном каскадном ливне для модели группы И.П. Иваненко и модели К.Х. Вибуша

рассеяния каскадных частиц. Экспериментальные и расчетные кривые приведены на рис. 10. В области максимума ливня и на его спаде обе модели достаточно хорошо

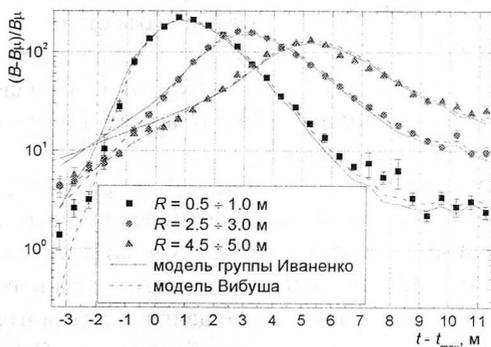


Рис. 10 Продольные профили $(B-B_0)/B_0$ для трех диапазонов расстояний от оси ливня; точки – эксперимент, линии – расчет

результат в отношении черенковского света, распространяющегося от ливня в переднюю полусферу. При этом модель И.П. Иваненко дает более высокое ожидание относительно черенковского излучения ливня назад ($\theta_\gamma > 90^\circ$).

Был проведен расчет пространственного распределения черенковского света от каскадных ливней, рожденных в ЧВД НЕВОД, для двух моделей Вибуша, для двух моделей достаточно хорошо согласуются с экспериментом. Однако на восходящем участке профиля, который отвечает за распространение света в обратную по отношению к направлению развития ливня полусферу, более предпочтительной представляется модель К.Х. Вибуша рассеяния ливневых электронов.

В главе 4 представлены методы выделения событий с ливнями и восстановления их параметров на основе только отклика черенковского детектора. Метод основывается на поиске параметров ливня (координаты и направление оси ливня, энергия ливня, глубина рождения ливня), при которых достигается наилучшее согласие откликов КСМ в данном событии с расчетными значениями откликов. В качестве исходных данных использовались события с большим энерговыделением в решетке ЧВД, регистрируемые по триггеру « ≥ 60 с». Была взята модель К.Х. Вибуша углового распределения черенковских фотонов, на основе которой рассчитано угловое распределение каскадных электронов. Для восстановления неизвестных параметров ливня использовался итерационный алгоритм поиска. Для задания в алгоритме исходных значений искомых параметров был предложен ряд оценок.

Метод предварительной оценки положения и направления оси ливня основывается на использовании порядковых статистик амплитуд откликов КСМ. Для оценки каждого из параметров выбирался определенный набор КСМ с наибольшими суммарными амплитудами ФЭУ. Такие КСМ обычно находятся вблизи оси ливня: на рис. 11 приведено событие с каскадом, образованным мюоном в событии «OneTrack» (показаны только 20 модулей, имеющих наибольшие суммарные отклики ФЭУ).

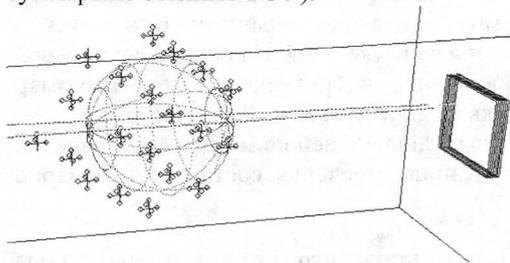


Рис. 11 Двадцать КСМ с наибольшими амплитудами в событии с ливнем

Для каждого из выбранных КСМ по откликам его ФЭУ оценивался вектор направления черенковского излучения. Далее вычислялся результирующий вектор, соответствующий направлению оси, который затем нормировался. Для оценки геометрического положения оси ливня рас-

считывались координаты центра тяжести группы выбранных КСМ, с весами, соответствующими откликам КСМ.

Точность полученных оценок исследовалась на основе обучающей выборки событий с высокоэнергичными ливнями, оси которых определялись с хорошей точностью по данным детектора ДЕКОР. Наилучшая точность оценки направления была достигнута для выборки из пятнадцати КСМ с наибольшими откликами с исключением из них

одного КСМ с максимальным откликом. Средний угол φ между оценкой направления оси и треком мюона по данным ДЕКОР составил 14.4° (среднеквадратичное отклонение – около 11°). При оценке геометрического положения оси наилучшим оказался вариант с использованием для расчета шести КСМ с наибольшими откликами. Соответствующее этому варианту среднее расстояние до оси ливня для обучающей выборки составило 30 см ($\sigma_d \approx 29$ см).

Метод предварительной оценки энергии ливня основан на том, что для событий с каскадными ливнями, рожденными в ЧВД вблизи чувствительной области детектора, суммарная амплитуда откликов КСМ в событии в среднем пропорциональна восстановленной энергии ливня. На основе данных обучающей выборки получена оценка:

$$y_0^{\text{оцен}} = \ln \left(\sum_4^{20} B_i \right) - 1.71 \quad (7)$$

где i – номера КСМ в порядке уменьшения величин их откликов, B_i – отклик i -го КСМ (корень из суммы квадратов амплитуд всех его ФЭУ).

Поскольку процедура многопараметрического итерационного поиска является сильно ресурсоемкой, а исследуемые события от триггера « ≥ 60 с» содержат, помимо ливней, другие типы событий, были разработаны критерии предварительного (до процедуры восстановления) отбора потенциальных ливней. Главный критерий основывается на компактности расположения модулей с наибольшими откликами в событиях с ливнями, рожденными в решетке ЧВД. На основе обучающей выборки было установлено ограничение на среднеквадратичный размер кластера из десяти КСМ с наибольшими откликами: $R_{\text{кл}} < 2.35$ м.

Для отбора высокоэнергичных ливней использовалось условие на основе оценки энергии ливня; граница отсека составляет примерно 60-80 ГэВ: $y_0^{\text{оцен}} > 6.8$.

В главе 5 представлены результаты обработки методов отбора каскадов среди событий от триггера « ≥ 60 с» и восстановления их характеристик по отклику ЧВД на моделированных ливнях и обучающей выборке. Приведены результаты измерения энергетического спектра ливней, рожденных мюонами в ЧВД, в области энергий от 100 ГэВ до 20 ТэВ по данным экспериментальной серии 16.07.2013 – 08.04.2015 (11 897 часов живого времени).

Для проверки метода итерационного восстановления параметров высокоэнергичных ливней моделировались каскады с фиксированными энергиями, равными 31.6 ГэВ, 100 ГэВ, 316 ГэВ, 1 ТэВ, 3.16 ТэВ, 10 ТэВ.

В процедуре восстановления участвовали только те события, для которых оказались выполнены условия срабатывания триггера « ≥ 60 с». Для отсева ливней, развитие которых происходит преимущественно или полностью вне детектирующей решетки ЧВД (что приводит к неудовлетворительному результату восстановления) были рассмотрены корреляции восстановленных значений y_0 с координатами центра тяжести кластера КСМ с наибольшими амплитудами откликов (рис. 12).

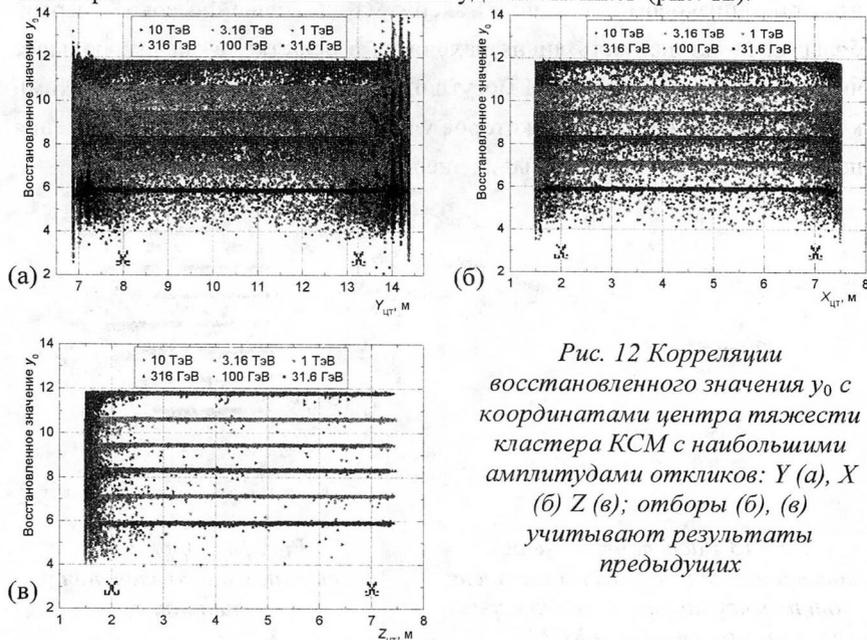


Рис. 12 Корреляции восстановленного значения y_0 с координатами центра тяжести кластера КСМ с наибольшими амплитудами откликов: Y (а), X (б) Z (в); отборы (б), (в) учитывают результаты предыдущих

Были сформулированы соответствующие критерии отбора по положению центра тяжести кластера КСМ с наибольшими амплитудами:

$$8.0 \text{ м} < Y_{\text{ЦТ}} < 13.3 \text{ м}; \quad (8)$$

$$2.0 \text{ м} < X_{\text{ЦТ}} < 7.0 \text{ м}; \quad (9)$$

$$2.0 \text{ м} < Z_{\text{ЦТ}} < 7.0 \text{ м}. \quad (10)$$

Также были рассмотрены корреляции восстановленного значения y_0 с восстановленным положением максимума ливня и направлением оси ливня. Рассчитывалась величина смещения d_e точки максимума ливня относительно плоскости, проведенной через центр детектирующей решетки и перпендикулярной восстановленному направлению оси

ливня (рис. 13). Из корреляций на рис. 14 видно, что со стороны входа каскада в решетку ($d_e < 0$) граница, за которой наблюдается сильный разброс восстановленных значений y_0 , примерно одинакова. Другая граница (при $d_e > 0$) имеет заметную тенденцию к смещению в область положительных значений d_e с ростом энергии ливня, что связано с тем, что при одинаковом положении максимума для ливней высоких энергий большая по длине часть ливня находится в решетке, а значит, большее число непериферийных КСМ могут видеть ливень под углами, близкими к черенковскому. Отсюда некоторое улучшение качества восстановления по сравнению с ливнями меньших энергий.

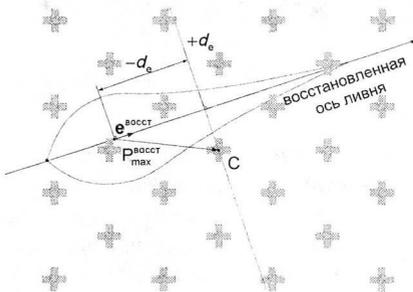


Рис. 13 Расчет отклонения восстановленного максимума ливня от плоскости, проходящей через центр решетки КСМ

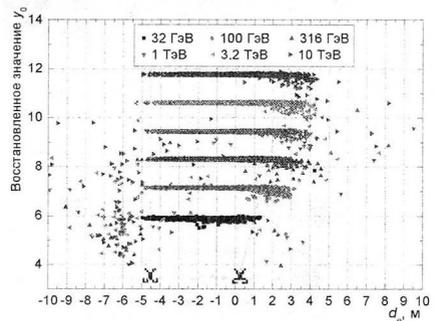


Рис. 14 Корреляции восстановленного значения y_0 с величиной d_e

В итоге было установлено условие отбора ливней по значению d_e :

$$-4.5 \text{ м} < d_e < \frac{y_0^{\text{восст}}}{3} - 1 \text{ м} \quad (11)$$

Поскольку основная задача – исследование ливней, генерированных мюонами, был проведен также отбор по зенитному углу восстановленного направления оси ливня на основе условия:

$$\theta_{\text{л}}^{\text{восст}} > 55^\circ \quad (12)$$

Был проведен анализ количества событий, оставшихся по итогам применения различных условий отбора, от изначально смоделированных 50 тысяч для каждого значения энергии. Он показал, что при энергиях ливней выше единиц ТэВ с ростом энергии наблюдается уменьшение объема итоговой выборки: ливней с энергией 10 ТэВ по применению всех

условий отбора насчитывается на 10% меньше, чем ливней с энергией 100 ГэВ. Это связано с тем, что при поперечном пересечении бассейна мюоном ливень большой энергии не успевает развиваться внутри решетки КСМ, и основной свет приходится на ее край.

Методы отбора ливней и восстановления их параметров были применены к ливням обучающей выборки. Результат восстановления параметра y_0 предложенным методом для ливней с неизвестной осью ($y_0^{\text{восст}}$) в сравнении со значениями данного параметра, восстановленными по методу для ливней с известной осью ($y_0^{\text{восст ИО}}$), показан на рис. 15. Результаты восстановления направления оси – распределение событий по углу между треком мюона, определенным по данным ДЕКОР, и восстановленным направлением оси ливня, приведены на рис. 16.

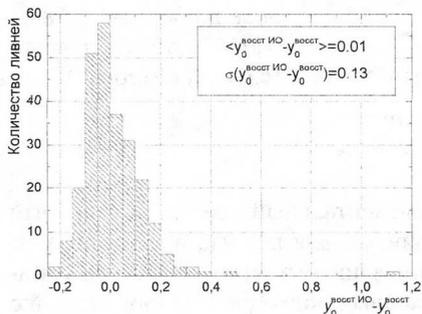


Рис. 15 Сравнение результатов восстановления параметра y_0 для событий обучающей выборки

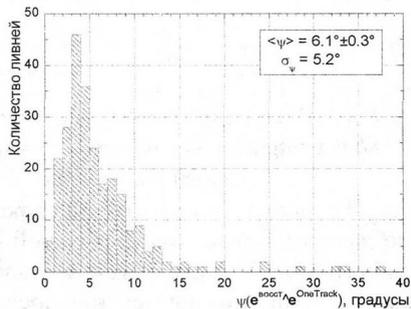


Рис. 16 Распределение событий по значению угла между направлением трека мюона и восстановленным направлением оси ливня

Величины ошибок восстанавливаемых параметров ливней составили $\sim 6^\circ$ для направления и 13% для оценки энергии при $\varepsilon > 100$ ГэВ.

Критерии отбора каскадных ливней и метод восстановления их параметров были применены к событиям, зарегистрированным по триггеру « ≥ 60 с» в экспериментальной серии, составившей 11897 часов живого времени (набор данных с 16 июля 2013 года по 8 апреля 2015 года). На основе полученной выборки событий с ливнями был построен дифференциальный энергетический спектр ливней в области энергий от 100 ГэВ до 20 ТэВ (всего около 150 тыс. событий). Для сравнения были рассчитаны ожидаемые спектры ливней, образованных в воде мюонами, для разных значений показателя функции генерации пионов γ . Полученный экспериментальный дифференциальный спектр ливней и

расчетные спектры приведены на рис. 17. При этом в экспериментальные данные для области энергий выше 1 ТэВ была введена поправка, связанная с энергозависимостью условий отбора.

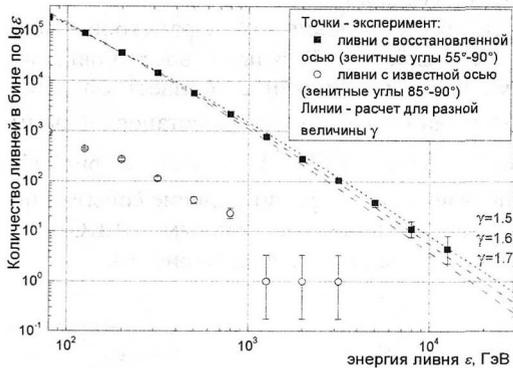


Рис. 17 Экспериментальные и расчетные дифференциальные энергетические спектры ливней от мюонов

На рис. 17 также приведен экспериментальный спектр, полученный по данным той же измерительной серии, но для ливней, выделенных из событий OneTrack, с осями в диапазоне зенитных углов от 85° до горизонта. Видно, что применение предложенных подходов к отбору ливней с неизвестной осью и восстановлению их параметров позволило более чем в сто раз поднять статистику ливневых событий и продвинуться примерно на порядок в область более высоких энергий.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- Измерен отклик ЧВК НЕВОД на одиночный мюон. Получена зависимость отклика квазисферического модуля от расстояния до трека мюона.

- Предложен метод и проведены измерения сферичности отклика измерительных модулей ЧВК НЕВОД. Полученное среднее квадратичное отклонение от среднего отклика КСМ, отражающее свойство сферичности модуля, составило около 8% для диапазона 0.5 – 1.0 м и в пределах 5 – 7% для больших расстояний.

- Разработан метод и впервые экспериментально получено пространственное распределение черенковского излучения от рожденных мюонами в воде каскадных ливней с энергиями 100-500 ГэВ. Получены данные измерений в пределах области протяженностью 45 p.e. вдоль оси

Сопоставление расчета и эксперимента на основе критерия χ^2 дает основания говорить о хорошем их согласии. При этом анализ спектра дал оценку показателя γ интегрального спектра генерации пионов в пределах 1.584 – 1.612 (95% доверительный интервал).

ливней и на расстояниях до 20 р.е. от оси с шагом 1.4 р.е. по обоим направлениям.

– Разработан метод и на его основе проверены модели углового распределения ливневых частиц на основе измеренного пространственного распределения черенковского света от ливней. Анализ показал удовлетворительное согласие обеих моделей (аналитическая модель группы И.П. Иваненко и аппроксимация результатов моделирования К. Вибушем в GEANT3, применяемая в коллаборации IceCube) с экспериментом.

– Разработан и реализован новый метод восстановления параметров высокоэнергичных ливней, основанный на зависимости интенсивности черенковского излучения от глубины развития ливня на разных расстояниях от его оси. Апробация метода на событиях с ливнями, оси которых определены по данным координатного детектора, показала, что средняя угловая точность восстановления оси ливня составляет около 6° , а энергетическая $\sim 13\%$ для энергии каскадов выше 100 ГэВ.

– Разработаны критерии отбора высокоэнергичных каскадных ливней среди событий с большим энерговыделением в решетке ЧВК. Критерии опробованы на моделированных данных.

– Измерен энергетический спектр каскадных ливней в интервале зенитных углов от 55° до горизонта в диапазоне энергий 0.1 – 20 ТэВ по данным измерительной серии длительностью около 12 тыс. часов «живого» времени. На основе измерений получена оценка показателя γ интегрального спектра генерации пионов: диапазон значений показателя спектра, соответствующий 95% доверительному интервалу, составил 1.598 ± 0.014 .

– Разработанные методы отбора ливней и восстановления их параметров позволили повысить на два порядка статистику событий по сравнению с использовавшимся ранее отбором по данным координатного детектора и продвинуться на порядок в область более высоких энергий.

– Разработанные методы исследования высокоэнергичных каскадов в ЧВК могут быть применены на других черенковских установках сопоставимого класса, а также могут быть взяты за основу для совершенствования подходов к работе с каскадными ливнями в крупномасштабных установках.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.А. Хомяков, А.Г. Богданов, В.В. Киндин, Р.П. Кокоулин, А.А. Петрухин, С.С. Хохлов, В.В. Шутенко и И.И. Яшин. Восстановление параметров высокоэнергичных каскадов, рожденных мюонами в воде // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 3. С. 405-407.
2. V. A. Khomyakov, A. G. Bogdanov, V. V. Kindin, R. P. Kokoulin, A. A. Petrukhin, S. S. Khokhlov, V. V. Shutenko, and I. I. Yashin. Restoration of parameters of high-energy cascades in Cherenkov water calorimeter with a dense array of quasispherical modules // Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78, No. 13, P. 1511–1516.
3. V. A. Khomyakov, V. V. Kindin, V. D. Burtsev, R. P. Kokoulin, K. G. Kompaniets, V. V. Ovchinnikov, S. S. Khokhlov, A. A. Petrukhin, V. V. Shutenko, I. I. Yashin, E. A. Zadeba. Study of characteristics of the quasi-spherical measurement modules of the Cherenkov water calorimeter NEVOD // Physics Procedia. 2015. V. 74, P. 442–448.
4. V. A. Khomyakov, A. G. Bogdanov, V. V. Kindin, R. P. Kokoulin, A. A. Petrukhin, S. S. Khokhlov, V. V. Shutenko, I. I. Yashin. Spatial distribution of Cherenkov light from cascade showers in water // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 675. 032036.
5. R. P. Kokoulin, M. B. Amelchakov, N. S. Barbashina, A. G. Bogdanov, V. D. Burtsev, D. V. Chernov, L. I. Dushkin, D. M. Gromushkin, N. N. Kamlev, S. S. Khokhlov, V. A. Khomyakov, V. V. Kindin, K. G. Kompaniets, E. A. Kovylyayeva, V. S. Kruglikova, G. Mannocchi, V. V. Ovchinnikov, A. A. Petrukhin, O. Saavedra, I. A. Shulzhenko, V. V. Shutenko, G. Trincherо, I. I. Yashin, E. A. Zadeba. Cascade showers initiated by muons in the Cherenkov water detector NEVOD // Proceedings of Science. PoS(ICRC2015)360.

Подписано в печать 16.02.2017. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 16.

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