

На правах рукописи

Шайбонов Баир Александрович

**Выделение событий от каскадов,  
инициированных мюонами и нейтрино, в  
экспериментах на Байкальском  
глубоководном нейтринном телескопе**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в *Учреждении Российской академии наук  
Институте ядерных исследований РАН.*

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук,  
Джилкибаев Жан-Арыс Магисович*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук,  
Семикоз Виктор Борисович  
доктор физико-математических наук,  
Троицкий Сергей Владимирович*

Ведущая организация: *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова*

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 при *Учреждении Российской академии наук Институте ядерных исследований РАН*, расположенном по адресу: *117312 Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Учреждения Российской академии наук Института ядерных исследований РАН.*

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
*кандидат физико-математических наук*

*Б. А. Тулунов*

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Наблюдательные данные, полученные в ходе исследования природных потоков электромагнитного излучения, космических лучей и природных потоков нейтрино являются в настоящее время основным источником информации о процессах протекающих во Вселенной с момента ее зарождения и до наших дней. По сравнению с первыми двумя направлениями исследований, нейтринная астрономия и нейтринная астрофизика находятся на раннем этапе своего развития. Ожидаемые потоки нейтрино астрофизической природы распределены в энергетической области от  $\sim 1.9 \times 10^{-4}$  эВ (реликтовое нейтринное излучение) и, по крайней мере, до  $\sim 10^{20}$  эВ - наибольших энергий космических лучей, зарегистрированных до настоящего времени. В области энергий в несколько десятков МэВ и ниже исследования природных потоков нейтрино ведутся в экспериментах на подземных установках. Наиболее важными результатами, полученными в этих экспериментах, являются регистрация нейтрино от Солнца и регистрация нейтринного сигнала от вспышки сверхновой 1987 года в Большом Магеллановом Облаке. Наиболее эффективными инструментами для исследования нейтрино астрофизической природы в области энергий от десятков ГэВ и до  $10^9$  ГэВ являются нейтринные телескопы, размещенные в естественных прозрачных средах в различных географических районах Земли и нацеленные на исследования широкого спектра научных проблем. Одним из ключевых направлений исследований на нейтринных телескопах является поиск и идентификация астрофизических объектов - источников космических лучей Галактического и внегалактического происхождения. Наиболее перспективными галактическими источниками нейтрино являются остатки от взрывов сверхновых, пульсары, двойные звездные системы, содержащие черную дыру либо нейтронную звезду, скопления молекулярных облаков, являющиеся мишенью для космических лу-

чей, а также окрестность черной дыры Sgr A\* в центре Галактики. Энергетический спектр нейтрино от галактических источников, в основном, заполняет область энергий  $10^3 - 10^6$  ГэВ. Другой класс нейтринных источников формируется внегалактическими астрофизическими объектами такими, как активные ядра галактик, гамма-всплески, скопления галактик. Энергетический спектр нейтрино от этих объектов ожидается в диапазоне энергий  $10^4 - 10^8$  ГэВ и выше. Другой важной задачей экспериментов на нейтринных телескопах является исследование энергетического спектра, глобальной анизотропии и состава по типу нейтрино природного диффузного потока нейтрино как от идентифицированных, так и от неидентифицированных источников в области энергий выше  $10^4$  ГэВ, в которой фон от атмосферных нейтрино становится сравнимым или меньше величины ожидаемого потока. Диффузный поток нейтрино в окрестности Земли формируется нейтринным излучением от всей совокупности источников за время, начиная с отдаленных космологических эпох и до наших дней. Основной вклад в этот поток вносят внегалактические астрофизические объекты. Вклад в диффузный поток вносят также нейтрино, образующиеся в результате взаимодействия космических лучей с веществом межзвездной среды, а, в случае космических лучей ультравысоких энергий, с электромагнитным излучением из широкого диапазона энергий включая реликтовое излучение. Определенную часть диффузного потока могли бы составлять нейтрино от распада сверхмассивных частиц ассоциирующихся, в частности, с теориями великого объединения GUT (top-down сценарий).

Метод глубоководного детектирования, являющийся основой экспериментов по регистрации нейтрино высоких и сверхвысоких энергий астрофизической природы с помощью нейтринных телескопов, был впервые предложен М.А. Марковым в 1960 году и заключается в регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и/или

ливней высоких энергий, образующихся при взаимодействии нейтрино с веществом в прозрачных природных средах. Полнота и качество информации о нейтринных потоках, регистрируемых нейтринными телескопами, определяется светосилой телескопа, эффективностью выделения нейтринных событий, а также энергетическим и угловым разрешением телескопа по отношению к регистрации мюонов и ливней высоких энергий. Метод исследования нейтринных потоков путем регистрации мюонов достаточно хорошо развит и позволяет восстанавливать направление распространения нейтрино высоких энергий с точностью порядка  $0.5 - 1$  градусов. Однако, этот метод применим лишь к мюонным нейтрино. Напротив, ливни высоких энергий рождаются при взаимодействии всех трех типов нейтрино в чувствительном объеме телескопа. Более того, электронные и  $\tau$ -нейтрино могут быть зарегистрированы только посредством регистрации вторичных ливней. Разработка и реализация методов восстановления параметров ливней высоких энергий является актуальной задачей, которая позволит существенно повысить качество информации, извлекаемой из накопленных данных нейтринных телескопов.

### **Цель диссертационной работы**

Разработка методов исследования природных потоков нейтрино высоких энергий, основанных на регистрации ливней высоких энергий, генерируемых в нейтринных взаимодействиях, а также методов анализа данных Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-200.

В соответствие с поставленной целью решались следующие задачи.

Разработка и реализация в виде пакета расчетных программ методики восстановления энергии, направления и координат ливней высоких энергий, генерируемых в чувствительном объеме нейтринного телескопа, с использованием амплитудно-временной информации фотодетекторов телескопа.

Разработка методов и критериев выделения событий от ливней высоких энергий, генерируемых в нейтринных взаимодействиях, из общего потока данных телескопа НТ-200.

Анализ экспериментальных данных нейтринного телескопа НТ-200 с целью исследования диффузного потока нейтрино высоких энергий астрофизической природы.

### **Научная новизна**

Впервые разработана, апробирована и использована при анализе экспериментальных данных глубоководного нейтринного телескопа методика восстановления параметров ливней высоких энергий. Впервые продемонстрирована высокая эффективность исследования энергетического спектра, пространственного распределения и состава по типам нейтрино диффузного потока нейтрино методом регистрации и восстановления параметров вторичных ливней в экспериментах на глубоководных телескопах. Получено одно из наиболее строгих в мире на настоящий момент экспериментальных ограничений на величину диффузного потока нейтрино с энергетическим спектром  $E^{-2}$ , а также исследована область значений нейтринных потоков, предсказываемых в рамках различных моделей генерации нейтрино в астрофизических источниках.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Разработана методика восстановления параметров ливней высоких энергий - энергии, направления развития ливня и координат ливня с использованием амплитудной и временной информации фотодетекторов нейтринного телескопа.
2. Разработаны алгоритмы выделения событий от ливней высоких энергий из экспериментальных данных Байкальского нейтринного телескопа НТ-200 и выполнен анализ данных, накопленных за период с апреля 1998 года по февраль 2003 года с целью выделения событий от мюонов и нейтрино высоких энергий. Распределения выделен-

ных событий по параметрам, характеризующим ливневые события, в пределах экспериментальных и теоретических неопределенностей хорошо согласуются с ожидаемыми распределениями событий от атмосферных мюонов.

3. Получено ограничение на величину суммарного (по всем типам нейтрино) диффузного потока нейтрино высоких энергий внеземного происхождения в области энергий  $20 \text{ ТэВ} \div 10^4 \text{ ТэВ}$  в предположении  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1$ , которое для степенного дифференциального спектра нейтрино  $E^{-2}$  составляет:

$$F_\nu E^2 < 2.9 \times 10^{-7} \text{ ГэВ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}.$$

Это ограничение, наряду с близким по величине ограничением, полученным в эксперименте AMANDA, является одним из двух наиболее сильных из существующих на сегодняшний день экспериментальных ограничений в этой области энергий.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались на Международных и Российских конференциях, симпозиумах и совещаниях: Международной конференции по высокоэнергичным явлениям во Вселенной (44th Rencontres de Moriond, Very High Energy Phenomena in the Universe, La Thuile, Italy 2009), Международном симпозиуме по подземной физике (TAUP'09, Rome 2009), Международной конференции по космическим лучам (ICRC'09, Lodz 2009), Международном совещании по Нейтринным Телескопам (13th "Neutrino Telescopes", Venice 2009), Рабочем совещании по техническим аспектам проектирования большого нейтринного телескопа в Средиземном море (VLVnT, Athens 2009), Международной конференции по проблемам астрофизики (2th RICAP, Rome 2009), Международном семинаре по физике высоких энергий (Кварки-2010, Коломна 2010), Международном совещании по черенковским детекторам (7th RICH, Cassis 2010), 31-ой Всероссийской конференции по космическим лучам (Москва, 2010).

## **Личный вклад автора**

Автором развита и реализована в виде пакета расчетных программ методика восстановления индивидуальных характеристик ливней высоких энергий, регистрируемых в глубоководных нейтринных телескопах. С целью исследования эффективности предложенной методики выполнено детальное моделирование отклика нейтринного телескопа НТ-200 на черенковское излучение ливней с последующим восстановлением параметров ливней. Проведена апробация данной методики посредством ее применения при восстановлении координат и интенсивности калибровочного лазерного источника света по данным телескопа НТ-200 и сравнения полученных результатов с данными акустической системы позиционирования Байкальского нейтринного телескопа.

Автором предложены и разработаны критерии выделения событий от каскадов высоких энергий, генерируемых атмосферными мюонами и нейтрино высоких энергий во внешнем по отношению к детектору НТ-200 водном объеме, основанные на учете индивидуальных характеристик регистрируемых ливней. Выполнены обработка и анализ экспериментальных данных телескопа НТ-200 соответствующих 1038 дням эффективного набора данных, выделены события от ливней высоких энергий и получено их энергетическое и угловое распределения, проведено сравнение с аналогичными ожидаемыми распределениями событий от атмосферных мюонов.

Автором выполнены расчеты ожидаемого числа событий от потоков диффузных нейтрино, предсказываемых рядом теоретических моделей генерации нейтрино в источниках космических лучей и получены ограничения на величину соответствующих потоков, которые относятся к числу наиболее строгих экспериментальных ограничений, существующих в настоящее время.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения,

содержит 91 страницу текста, 54 рисунка, 3 таблицы и список литературы из 92 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** изложена принципиальная схема постановки экспериментов на нейтринных телескопах, размещенных в естественных прозрачных средах, и приводится краткий обзор проблем нейтринной астрономии и астрофизики, которые могут быть исследованы в этих экспериментах. Обсуждаются характерные особенности исследования природных потоков нейтрино методом регистрации вторичных мюонов и методом регистрации вторичных ливней.

**В первой главе** приводится описание основных элементов, функциональных систем и особенностей конструкции детектора НТ200 (рис. 1) и обсуждаются процедуры калибровки измерительных систем телескопа и методы предварительного анализа данных.

Байкальский нейтринный телескоп НТ-200 расположен в южной части оз. Байкал, на расстоянии 3.6 км от берега. Центр телескопа находится на глубине порядка 1150 метров. Телескоп содержит 192 оптических модулей (ОМ), размещенных вдоль вертикальных кабель-тросов и формирующих 8 гирлянд - одну центральную и семь периферийных. Длина каждой гирлянды составляет 68.5 метра, а расстояние между центральной и каждой периферийной гирляндой равно 21.5 метра. Телескоп связан с береговым центром управления и сбора данных подводными линиями связи, обеспечивающими передачу данных, а также энергопитание и управление телескопом. Наряду с НТ-200 подводный комплекс включает в себя гидрологическую гирлянду с оборудованием для непрерывного мониторинга оптических и гидрологических свойств среды и акустическую систему позиционирования.

Ключевым элементом телескопа является оптический модуль

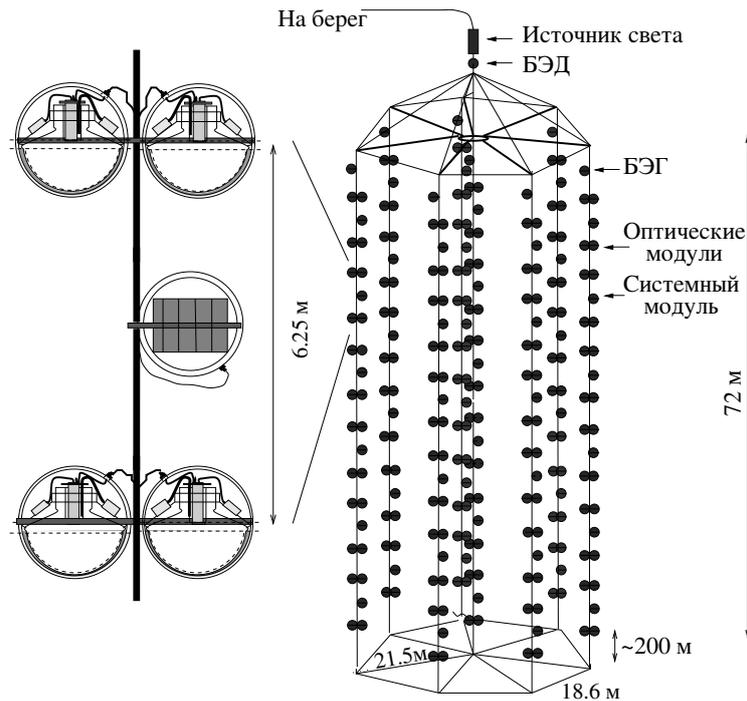


Рис. 1. Схематичное изображение телескопа НТ-200 (справа). Слева показан структурный элемент телескопа “связка”, образованный двумя парами ОМ, подключенными на совпадение, и электронным модулем, обеспечивающим их работу.

на базе гибридного фотодетектора Квазар-370 с полусферическим фотокатодом диаметром 37 см. В оптическом модуле также имеется светодиод, предназначенный для калибровки фотодетектора. Оптические модули телескопа объединены в пары ОМ, включенных на совпадение во временном окне порядка 15 нс, что позволяет существенно понизить уровень фона собственно фотодетекторов и свечения водной среды. Каждая пара оптических модулей формирует один измерительный канал телескопа. В качестве амплитуды сигнала регистрируемого измерительным каналом выбирается амплитуда одного из двух ОМ пары, заранее выбранного по результатам калибровки регистрирующей системы телескопа. Время срабатывания канала соответствует времени первого сработавшего оптического мо-

дуля пары.

Система сбора данных и триггерная система телескопа состоит из отдельных функциональных модулей и блоков, формирующих иерархическую структуру. Оптические модули двух соседних каналов телескопа подключены к своему системному модулю, в котором размещены системы сбора и обработки данных и управления оптическими модулями. В случае срабатывания измерительного канала, в системном модуле формируется сигнал “локального триггера”, содержащий информацию о времени и амплитуде канала, который передается в соответствующий блок электроники гирлянды (БЭГ). Каждая гирлянда имеет по два БЭГа. В каждом БЭГе осуществляется оцифровка локальных триггеров и вырабатывается сигнал запроса, который передается в блок электроники детектора (БЭД). В БЭДе размещена триггерная система телескопа и ретранслятор системы передачи информации. Триггер установки формируется при срабатывании  $\geq N$  каналов во временном окне 500 нс (как правило, число  $N$  устанавливается равным 3 или 4). В случае выполнения триггерного условия, амплитудная и временная информация каждого сработавшего канала передается в береговой центр сбора данных.

Процедура калибровки измерительных каналов включает в себя определение цены деления временных и амплитудных кодировщиков, значений амплитудных порогов, относительных временных задержек и эффективности измерительных каналов. Значения относительных временных задержек и эффективности измерительных каналов определяются по результатам анализа событий, инициированных внешними калибровочными источниками света.

Поток атмосферных мюонов является природным калибровочным источником в экспериментах на нейтринных телескопах. Первичный анализ данных НТ-200 включает в себя сравнение темпов счета, а также временных и амплитудных распределений сигналов измерительных каналов телескопа с распределениями, ожидаемыми

от атмосферных мюонов. Целью этого анализа является уточнение калибровочных коэффициентов измерительных систем телескопа и чувствительностей оптических модулей, а также устранение из последующего анализа экспериментальных данных некачественной информации.

**Во второй главе** диссертации обсуждаются процессы генерации и распространения черенковского излучения электромагнитных и адронных ливней высоких энергий в воде, приводятся результаты моделирования отклика фотодетектора нейтринного телескопа на это излучение и описана методика восстановления параметров ливней с использованием временной и амплитудной информации фотодетекторов нейтринного телескопа.

Ливни высоких энергий являются источниками черенковского излучения с характерными пространственным, угловым и временным распределениями генерируемых фотонов, которые формируются в процессе развития ливней. Интенсивность черенковского излучения ливня пропорциональна суммарной длине траекторий заряженных частиц и, соответственно, энергии ливня с коэффициентом пропорциональности порядка  $10^8 \gamma / \text{ТэВ}$ . Относительное угловое распределение черенковских фотонов  $\Psi_\gamma(\theta)$ , просуммированное по траекториям всех заряженных частиц ливня, является сильно анизотропной функцией с максимумом при  $42^\circ$  (черенковский угол в воде) относительно оси ливня и при энергиях ливней выше 100 ГэВ практически не зависит от их энергии. Результаты расчета угловых распределений черенковских фотонов, испущенных с разных участков оси ливня (L. Bezrukov and A. Butkevich, Proc. workshop "Simulation and Analysis Methods for Large Neutrino Telescopes", Ed. by Ch. Spiering, DESY Zeuthen, Germany, 1998), показали, что эти распределения в области, соответствующей максимуму каскадной кривой, незначительно отличаются от суммарного распределения  $\Psi_\gamma(\theta)$ , что позволяет использовать  $\Psi_\gamma(\theta)$  в качестве универсального

углового распределения черенковских фотонов, испускаемых с любого участка оси ливня.

Численное моделирование отклика фотодетектора проводилось с учетом перечисленных выше характерных особенностей генерации черенковского излучения ливней, а также с учетом процессов поглощения и рассеяния света в воде и взаимного расположения и ориентации фотодетектора и ливня. Результаты численного моделирования показали, что благодаря слабому рассеянию света в байкальской воде анизотропия углового распределения фотонов источника (в нашем случае ливня высокой энергии) сохраняется на расстояниях вплоть до 200 метров от источника. Угловое распределение черенковских фотонов от ливня на любом удалении от источника имеет ярко выраженный максимум в направлении от источника, формируемый нерассеявшимися (прямыми), либо рассеявшимися на малые углы фотонами. В результате, отклик оптического модуля байкальского телескопа, ориентированного на ливень, в 50-100 раз превышает отклик ОМ отвернутого от ливня. Поэтому подавляющая часть оптических модулей, сработавших от излучения ливня, регистрирует прямые, либо рассеявшиеся на малые углы фотоны.

Перечисленные выше характерные особенности процессов генерации и распространения черенковского излучения ливней в байкальской воде с одной стороны, и функциональные особенности фотодетекторов НТ-200 с другой, позволяют реализовать достаточно эффективный алгоритм восстановления параметров ливней высоких энергий с использованием временной и амплитудной информации фотодетекторов нейтринного телескопа. Процедура восстановления параметров ливня - энергии, направления оси ливня и координат соответствующих максимуму каскадной кривой осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится восстановление координат  $\vec{r}_{sh}$  ливня с использованием временной информации сработавших измерительных каналов телескопа. В качестве восстановленных координат

нат выбираются их значения, которые соответствуют минимальному значению функционала  $\chi_t^2$ :

$$\chi_t^2 = \frac{1}{(N_{hit} - 4)} \sum_{i=1}^{N_{hit}} \frac{(T_i(\vec{r}_{sh}, t_0) - t_i)^2}{\sigma_{ti}^2}, \quad (1)$$

где  $t_i$  - время  $i$ -ого сработавшего измерительного канала телескопа,  $t_0$  - время зарождения ливня,  $T_i$  - ожидаемое время срабатывания  $i$ -ого канала от прямого света ливня,  $\sigma_{ti}$  - неопределенность измерения времени,  $N_{hit}$  - число сработавших каналов в событии. На втором этапе проводится восстановление энергии  $E_{sh}$  и направления оси ливня  $\vec{\Omega}_{sh}(\theta, \varphi)$  с применением метода максимального правдоподобия, с использованием восстановленных на первом этапе координат. В качестве полярного и азимутального углов, характеризующих направление развития ливня, и энергии ливня выбираются их значения, соответствующие минимальному значению функционала:

$$L_A = - \sum_{i=1}^{N_{hit}} \ln p_i(A_i, E_{sh}, \vec{\Omega}_{sh}(\theta, \varphi)). \quad (2)$$

Функции  $p_i(A_i, E_{sh}, \vec{\Omega}_{sh}(\theta, \varphi))$  представляют собой вероятности регистрации сигнала с амплитудой  $A_i$  (измеряемой в фотоэлектронах) от ливня с энергией  $E_{sh}$  и направлением оси  $\vec{\Omega}_{sh}$   $i$ -ым сработавшим каналом телескопа. Функции вероятности  $p_i$  определяются по результатам моделирования откликов фотодетекторов телескопа на черенковское излучение ливня с энергией  $E_{sh}$  и направлением оси ливня  $\vec{\Omega}_{sh}$ , с учетом распространения света в воде, относительного расположения и ориентации оптических модулей и ливня и чувствительностей оптических модулей.

С целью апробации процедуры восстановления параметров ливней, было выполнено восстановление координат и интенсивности калибровочного импульсного источника света на базе азотного лазера, который имеется в составе байкальского нейтринного телескопа и

удален от геометрического центра НТ-200 примерно на 150 м. Истинные координаты источника определяются по данным акустической системы позиционирования с точностью до 20 см. В результате применения процедуры восстановления к экспериментальным данным были получены следующие результаты. Относительная точность восстановления координат источника по данным НТ-200 составляет примерно 8%, а точность восстановления логарифма интенсивности составляет 30%. Результаты восстановления координат и интенсивности калибровочного источника света позволяют сделать вывод о достаточно высокой эффективности разработанной процедуры восстановления параметров ливней высоких энергий по данным нейтринного телескопа НТ-200.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию диффузного потока нейтрино высоких энергий в экспериментах на нейтринном телескопе НТ-200. Методика поиска нейтрино высоких энергий основана на регистрации черенковского излучения электромагнитных и адронных ливней, генерируемых в большом водном объеме вокруг телескопа в результате нейтринных взаимодействий. Отметим, что данная методика позволяет регистрировать нейтрино всех трех типов. Диффузный поток нейтрино высоких энергий в окрестности Земли формируется нейтринным излучением от всей совокупности источников за время, начиная с отдаленных космологических эпох и до наших дней. Наиболее вероятными источниками нейтрино высоких энергий являются галактические и внегалактические объекты, в которых происходит ускорение заряженных частиц, в основном, протонов и электронов, до сверхвысоких энергий. В случае Фермиевского ускорения частиц на фронтах ударных волн в источнике энергетический спектр нейтрино по своей форме должен быть близок к спектру протонов  $E^{-\gamma}$  с показателем  $\gamma = 2.0 \div 2.3$ . Таким образом, ожидаемый спектр диффузных нейтрино является существенно более пологим, чем спектр атмосферных мюонов, порождающих фо-

новые события в телескопе. Метод анализа данных, реализованный в данной работе, базируется на выделении событий от ливней высоких энергий, восстановлении энергии и направления этих ливней и сравнении полученного углового распределения и энергетического спектра с распределениями, ожидаемыми от атмосферных мюонов, с целью выделения нейтринных событий.

Первичный отбор событий, обусловленных ливнями высоких энергий, проводился с использованием следующих критериев отбора: множественность сработавших каналов в событии  $N_{hit} > 15$ ; временной отклик телескопа соответствует прохождению светового сигнала в установке снизу вверх. Последнее требование реализуется путем ограничения допустимых значений параметра  $t_{min}$ , характеризующего каждое событие:

$$t_{min} = \min(t_i - t_j) > -10 \text{ нс}, \quad (i < j), \quad (3)$$

где  $t_i, t_j$  - время срабатывания  $i$ -ого и  $j$ -ого каналов на каждой сработавшей гирлянде (номер канала отсчитывается сверху вниз от верхнего канала гирлянды),  $t_{min}$  - минимальная разница во времени срабатывания любых пар каналов на всех возможных гирляндах (при этом  $i$ -ый канал на гирлянде расположен выше  $j$ -ого канала). Условие (3) исключает из дальнейшего анализа существенную долю событий от атмосферных мюонов сверху. При этом, фактор подавления для полного набора данных, используемых в нашем анализе, составляет примерно  $2.5 \times 10^{-3}$ . Лишь относительно малая часть событий от околоразрешенных атмосферных мюонов, прошедших под установкой и инициировавших ливень высокой энергии, удовлетворяет этому критерию отбора.

Следующий набор критериев выделения ливневых событий и оценка эффективности восстановления параметров ливней были получены из анализа разыгранных событий от атмосферных мюонов, удовлетворяющих предварительным критериям отбора. Расчет потока мюонов на уровне моря от взаимодействия космических лучей

в атмосфере Земли проводился по программе CORSIKA5.7 (Heck D., Knapp J., Report fzka 6097, Karlsruhe, Kernforschungszentrum, 1998). Розыгрыш первичного взаимодействия протонов и ядер в атмосфере Земли проводился по модели QGSJET (Калмыков Н., Остапченко С., Ядерная физика, 1993, т. 56, с. 105). Распространение мюонов в воде до уровня установки моделировалось по программе MUM (E.V. Bugaev et al., Phys. Rev. D64, 2001, P. 074015). Далее, моделировался отклик телескопа на одиночные мюоны и группы мюонов с учетом электромагнитного сопровождения мюонов. К событиям, удовлетворяющим предварительным критериям отбора, применялась процедура восстановления координат, энергии и направления оси ливня, описанная во второй главе диссертации. С целью дальнейшего понижения числа фоновых событий были выбраны критерии отбора, накладывающие дополнительные ограничения на множественность сработавших каналов в событии, а также на переменные, характеризующие эффективность процедуры восстановления параметров ливней. Рисунки 2 и 3 иллюстрируют точность восстановления логарифма энергии и направления развития ливня для событий, удовлетворяющих всем критериям отбора. Точность восстановления логарифма энергии составляет 19–21%, а точность восстановления направления оси ливня составляет 4–6 градусов. В течение 1038 дней эффективного набора данных телескопом НТ-200, за период с апреля 1998 года по февраль 2003 года, было зарегистрировано  $3.45 \times 10^8$  событий по условию отбора  $\geq 4$  сработавших каналов в событии. Для дальнейшего анализа было отобрано 22597 событий, удовлетворяющих первичным критериям отбора  $N_{hit} > 15$  и  $t_{min} > -10$  нс. В результате применения к данным событиям процедуры восстановления параметров ливней и критериев отбора, использовавшихся при анализе ожидаемых событий от атмосферных мюонов, было получено распределение по косинусу зенитного угла и энергетический спектр экспериментальных событий. На рис. 4 представлено распре-

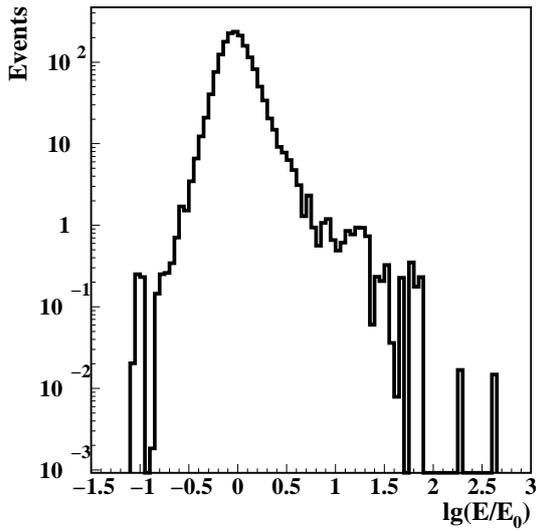


Рис. 2. Распределение логарифма отношения восстановленной и разыгранной энергий ливней от атмосферных мюонов.

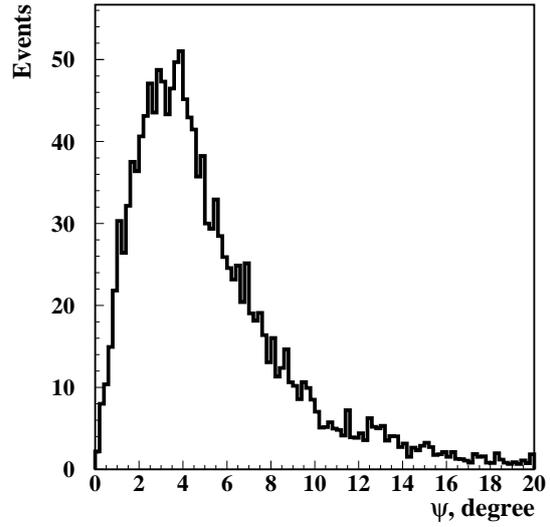


Рис. 3. Распределение событий по углу  $\psi$  между разыгранным и восстановленным направлениями развития ливней в области углов  $\psi < 20^\circ$ .

деление по косинусу зенитного угла  $\theta$  ( $\theta = 0$  для направления вдоль вертикали сверху вниз) экспериментальных событий (точки), а также соответствующие распределения разыгранных (гистограмма) и восстановленных (прямоугольники) событий от атмосферных мюонов. В области зенитных углов  $40^\circ < \theta < 90^\circ$  (события сверху) наблюдается хорошее согласие между экспериментальным и теоретическим распределениями. В интервале  $\theta < 40^\circ$  число как экспериментальных, так и ожидаемых фоновых событий после процедуры восстановления, превышает число разыгранных фоновых событий. Это превышение обусловлено неточностью алгоритма восстановления, природа которой подробно обсуждается в третьей главе диссертации. В области  $\theta > 90^\circ$  выделено 8 экспериментальных событий, в хорошем соответствии с 12 событиями, ожидаемыми от атмосферных мюонов сверху, которые восстанавливаются как события снизу из-за неточности процедуры восстановления. Пунктирная гисто-

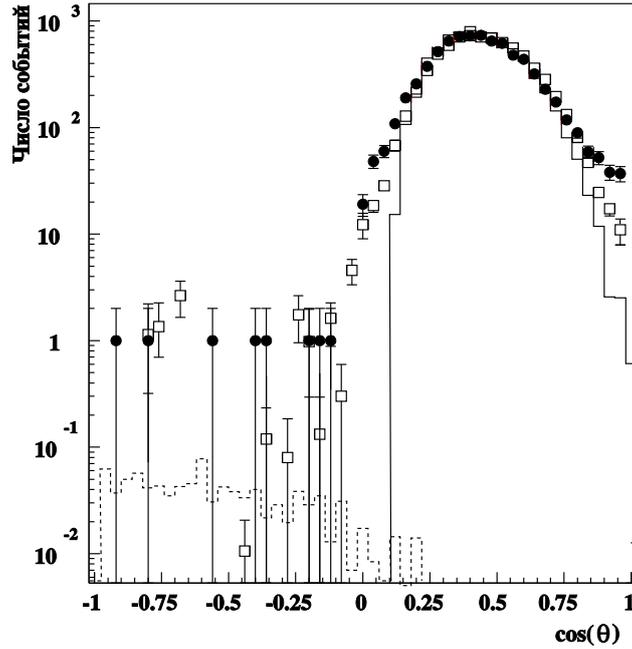


Рис. 4. Угловое распределение экспериментальных событий (точки), а также угловые распределения разыгранных (гистограмма) и восстановленных (прямоугольники) событий от атмосферных мюонов. Пунктирная гистограмма описывает ожидаемое распределение восстановленных событий от атмосферных нейтрино.

грамма в области  $\theta > 90^\circ$  соответствует ожидаемому распределению по зенитному углу событий от атмосферных нейтрино. Полное число ожидаемых событий от атмосферных нейтрино составляет примерно 1 событие.

На рис. 5 приводится энергетическое распределение экспериментальных событий (точки), а также генерированные (гистограмма) и восстановленные (прямоугольники) распределения событий, ожидаемые от атмосферных мюонов, в области зенитных углов  $\theta > 40^\circ$ . При углах  $\theta < 90^\circ$  экспериментальное распределение заполняет область энергий  $E_{sh} < 130$  ТэВ и хорошо согласуется с ожидаемым распределением для ливней от атмосферных мюонов. В области зенитных углов  $\theta > 90^\circ$  экспериментальные события распределены в энер-

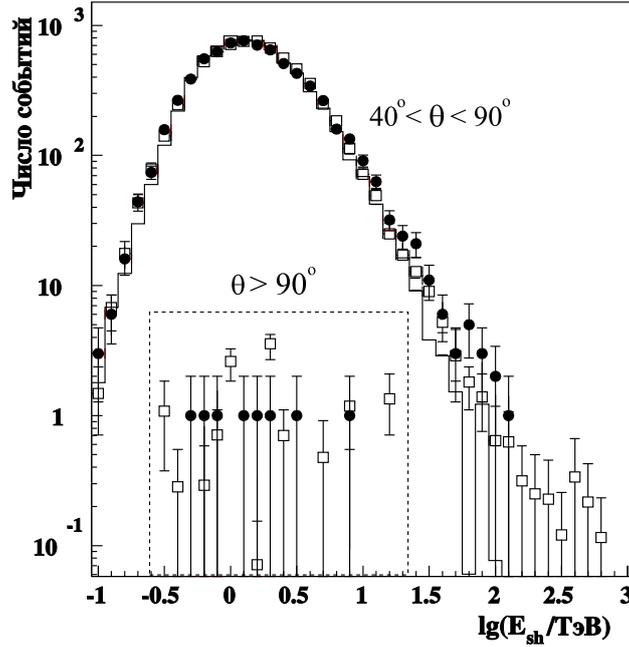


Рис. 5. Энергетическое распределение экспериментальных событий (точки), а также распределения разыгранных (гистограмма) и восстановленных (прямоугольники) событий от атмосферных мюонов. Внутри области, ограниченной пунктирной линией, приводятся распределения событий, восстановленных как события снизу.

В энергетическом интервале  $E_{sh} < 10$  ТэВ, в хорошем согласии с распределением, ожидаемым от ливней от атмосферных мюонов, обусловленным неточностью процедуры восстановления. Анализ энергетического и углового распределений экспериментальных событий, с учетом статистических и систематических неопределенностей, не выявил статистически значимого отклонения от распределений, ожидаемых от ливней от атмосферных мюонов.

Исходя из этого результата и выбирая дополнительные критерии отбора нейтринных событий, существенно подавляющие фон от атмосферных мюонов, можно получить ограничение на поток нейтрино высоких энергий. В качестве дополнительных критериев отбора событий от нейтрино высоких энергий в области зенитных уг-

лов  $40^\circ < \theta \leq 180^\circ$  были использованы следующие ограничения на энергию ливней от нейтрино -  $E_{sh} > 130$  ТэВ при  $40^\circ < \theta < 90^\circ$  и  $E_{sh} > 10$  ТэВ при  $\theta > 90^\circ$ . Кроме того, в качестве кандидатов на события от нейтрино рассматривались также события, для которых эти условия не выполняются, но которые удовлетворяют критериям отбора, применявшимся нами в работе V. Aynutdinov et al., *Astropart. Phys.*, V. 25, P. 140 (2006).

В эксперименте не зарегистрированы события, удовлетворяющие перечисленным условиям отбора. Число ожидаемых фоновых событий составляет  $2.3 \pm 1.2$  события, с учетом статистических и систематических неопределенностей оценки фона. Верхний предел на число событий от нейтрино высоких энергий на 90% доверительном уровне, полученный с использованием методики, предложенной в работах J. Conrad et al., *Phys. Rev. D*67, P. 012002 (2003), G. Feldman and R. Cousins, *Phys. Rev. D*57, P. 3873 (1998), B.P. Roe and M.B. Woodroffe, *Phys. Rev.*, D60, P. 053009 (1999), составляет  $n_{90\%} = 2.4$ .

Число ожидаемых событий  $N_{mod}$  от изотропного диффузного потока нейтрино, предсказываемого в рамках определенной теоретической модели, за время наблюдения  $T$  описывается следующим выражением:

$$N_\nu = T \int d\vec{\Omega} \int dE_{sh} V_{eff}(\vec{\Omega}, E_{sh}) \sum_k \int N_A \rho_{H_2O} \frac{d\sigma_{\nu k}}{dE_{sh}} \Phi_\nu(\vec{\Omega}, E_\nu, X) dE_\nu, \quad (4)$$

$$X(\vec{\Omega}) = \int_0^L \rho_{earth}(l) dl,$$

где  $\Phi_\nu(\vec{\Omega}, E_\nu, X)$  - поток нейтрино с энергией  $E_\nu$  в направлении  $\vec{\Omega}$  в точке взаимодействия в воде с координатой  $X$ ,  $E_{sh}$  - энергия ливня в вершине нейтринного взаимодействия,  $X(\vec{\Omega})$  - оптическая толщина вещества, через которую проходит нейтрино до взаимодействия в воде,  $V_{eff}(\vec{\Omega}, E_{sh})$  - эффективный объем регистрации ливня. Индекс  $\nu$  характеризует нейтрино либо антинейтрино разного типа, индекс  $k$  со-

ответствует суммированию по СС- и НС-взаимодействиям,  $N_A$  - число Авогадро. Поток нейтрино удовлетворяют граничным условиям  $\Phi_{\nu_i}(E, 0) = A_{\nu_i} f_{\nu_i}(E)$ , где  $f_{\nu_i}(E)$  - спектры диффузных нейтрино в окрестности Земли, предсказываемые в рамках теоретических моделей, описывающих процессы в источниках космических лучей либо других источниках диффузных нейтрино,  $A_{\nu_i}$  - нормировочный множитель. В данной работе предполагается для определенности, что в окрестности Земли выполняется соотношение  $\nu_e:\nu_\mu:\nu_\tau = 1 : 1 : 1$ , отношение потоков нейтрино и антинейтрино  $\nu/\bar{\nu} = 1$  и энергетические спектры нейтрино разного типа описываются единым распределением  $f_\nu(E)$ .

Степень соответствия экспериментальных измерений и теоретических предсказаний характеризуется параметром  $\eta = n_{90\%}/N_{mod}$ . Значение параметра  $\eta < 1$  указывает на несоответствие предсказаний теоретической модели результатам эксперимента.

В таблице 1 приводятся суммарное по всем типам нейтрино ожидаемое число событий  $N_{mod}$ , область энергий, в которой ожидается 90% событий  $\Delta E_{90\%}$ , средняя энергия ожидаемых нейтрино  $\bar{E}_\nu$  и значения параметра  $\eta$  для диффузных потоков нейтрино, предсказываемых рядом моделей астрофизических источников. Нейтринный спектр, предложенный Ф. Стеккером (Phys. Rev., D72, P. 107301 (2005), модель 'S05' в табл. 1), получен в рамках модели, описывающей генерацию нейтрино в центральной области квазаров. Остальные данные представленные в табл. 1 относятся к моделям генерации нейтрино в струях активных ядер галактик (AGN). Модели 'P  $p\gamma$ ' (R. Protheroe, arXiv:[astro-ph]9607165) и 'M  $pp + p\gamma$ ' (K. Mannheim, Astropart. Phys., V. 3, P. 295 (1995)) предполагают рождение нейтрино в результате, соответственно,  $p\gamma$  и  $pp + p\gamma$  взаимодействий в струях блазаров. Спектр 'SeSi' (D. Semikoz and G. Sigl arXiv:[hep-ph]0309328) представляет собой характерный ожидаемый нейтринный спектр от блазаров. Распределение 'MPR' (К.

Таблица 1. Число ожидаемых событий  $N_{mod}$ , область энергий  $\Delta E_{90\%}$ , в которой ожидается 90% событий, средняя энергия ожидаемых нейтрино  $\bar{E}_\nu$  и фактор  $\eta = n_{90\%}/N_{mod}$  для разных моделей астрофизических источников.

Модель	БАИКАЛ				AMANDA
	$N_{mod}(\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau)$	$\Delta E_{90\%}$ , ТэВ	$\bar{E}_\nu$ , ПэВ	$n_{90\%}/N_{mod}$	$n_{90\%}/N_{mod}$
S05	0.7	$1.0 \times 10^2 \div 3.0 \times 10^4$	2	3.4	1.6
P $p\gamma$	4.4	$3.2 \times 10^2 \div 1.6 \times 10^5$	6	0.5	0.3
M $pp + p\gamma$	1.7	$2.0 \times 10^1 \div 5.0 \times 10^5$	15	1.4	1.2
MPR	1.4	$1.6 \times 10^2 \div 1.0 \times 10^5$	3	1.8	0.9
SeSi	2.4	$1.0 \times 10^3 \div 5.0 \times 10^4$	10	1.0	-

Mannheim et al., Phys. Rev., D63, P. 023003 (2000) ) является совокупностью максимально возможных потоков нейтрино от струй AGN в широком энергетическом диапазоне. Для сравнения, в таблице 1. также приводятся значения параметра  $\eta$ , полученные из анализа данных эксперимента AMANDA (M. Ackermann et al., Astrophys. J., V. 675, P. 1014 (2008), A. Ackermann et al., Phys. Rev. D76, P. 042008 (2007)). Как видно из таблицы 1, величина потока диффузных нейтрино, предсказываемая в рамках модели 'P  $p\gamma$ ', не согласуется с нашими экспериментальными данными. Согласие с экспериментом может быть достигнуто при уменьшении нормировочного коэффициента данного потока в два раза. Для апробации остальных рассматриваемых моделей требуется повышение чувствительности Байкальского эксперимента примерно в 2-3 раза.

Для степенного энергетического спектра  $\Phi_{\nu_i} \propto E_{\nu_i}^{-2}$  ограничение на диффузный поток любого из трех типов нейтрино равно:

$$\Phi_{\nu_i+\tilde{\nu}_i} E^2 < 9.7 \times 10^{-8} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ ГэВ}. \quad (5)$$

Ограничение на суммарный поток всех типов нейтрино в три раза выше чем ограничение (5):

$$\Phi_\nu E^2 < 2.9 \times 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ ГэВ}. \quad (6)$$

Это ограничение относится к интервалу энергий  $20 \text{ ТэВ} < E_\nu <$

$2 \times 10^4$  ТэВ, содержащему 90% ожидаемых нейтринных событий.

На рис. 6 приводятся существующие в настоящее время экспериментальные ограничения на величину дифференциального и интегрального ( $E^{-2}$ ) диффузного потока нейтрино одного типа (пределы на суммарный по всем типам нейтрино поток уменьшены в три раза) полученные из анализа данных Байкальского нейтринного телескопа (данная работа), эксперимента AMANDA, а также экспериментов Auger, HiRes, GLUE, FORTE, RICE, ANITA-lite и ANITA. Ограничения на величину диффузного потока нейтрино для разных

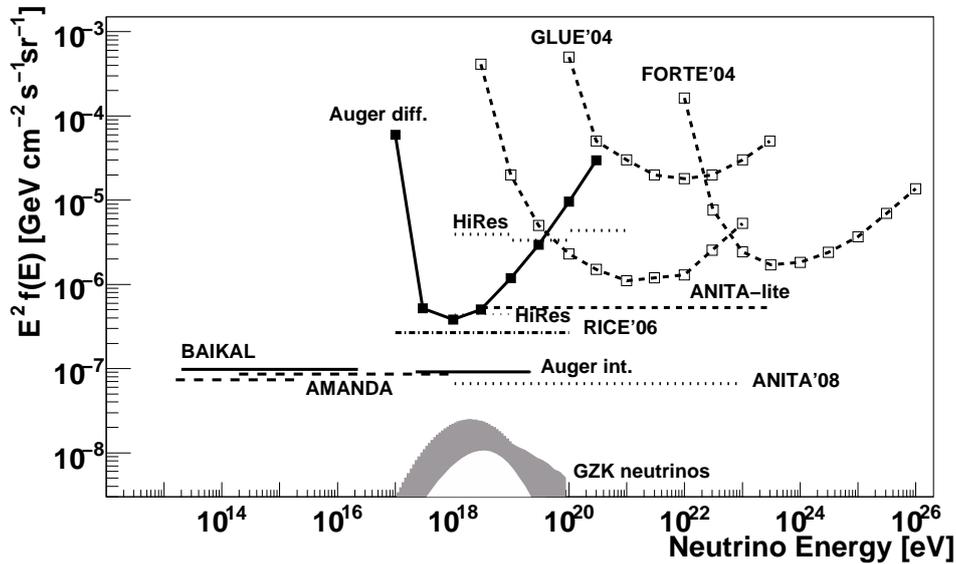


Рис. 6. Экспериментальные ограничения на величину диффузного потока нейтрино высоких энергий (комментарий к рисунку приводится в тексте).

энергетических спектров  $f(E_\nu)$  (в частности, значения предельных потоков (5) и (6)), наряду с пределами, полученными в эксперименте AMANDA, принадлежат к числу наиболее сильных из существующих в настоящее время экспериментальных ограничений.

**В четвертой главе** исследуется эффективность регистрации ливней высоких энергий проектируемым в настоящее время нейтринным телескопом следующего поколения НТ-1000 на оз. Байкал. Ней-

тринный телескоп НТ-1000 на оз. Байкал нацелен на решение широкого круга задач астрофизики и физики элементарных частиц – поиска локальных нейтринных источников, исследования диффузного потока нейтрино, поиска проявлений темной материи, поиска магнитных монополей и других экзотических частиц. Концептуально НТ-1000 будет представлять из себя решетку оптических модулей на глубине 800–1300 м в объеме порядка 1 кубического километра и будет иметь гибкую модульную структуру, формируемую из независимых кластеров вертикальных гирлянд оптических модулей. С учетом оптических свойств и уровня собственного свечения водной среды оз. Байкал, конфигурация телескопа должна обеспечить высокую эффективность регистрации мюонов ( $>10$  ТэВ) и ливней ( $>100$  ТэВ) высоких энергий, генерируемых при взаимодействии нейтрино с веществом.

Архитектура нейтринного телескопа НТ-1000, обусловленная особенностями измерительных и коммуникационных систем телескопа, а также технологиями монтажа оборудования, имеет следующий вид. Рассматриваемая в настоящее время в качестве базовой версия установки будет включать в себя 2304 оптических модулей, содержащих фотодетекторы и сопутствующую электронику. Оптические модули размещаются на вертикальных грузонесущих кабель–тросах на расстоянии  $h = 15 \div 20$  м друг от друга и образуют 96 гирлянд оптических модулей. Гирлянды объединены в 12 кластеров (по 8 гирлянд в одном кластере). Каждый кластер содержит одну центральную гирлянду и семь периферийных, размещенных равномерно по окружности радиуса  $R$  вокруг центральной гирлянды. Центральные гирлянды соседних кластеров расположены на расстоянии  $H$  друг от друга.

С целью исследования чувствительности телескопа к черенковскому излучению мюонов и ливней в зависимости от значений геометрических параметров его конфигурации, были выполнены со-

ответствующие модельные расчеты, позволившие определить оптимальные значения этих параметров. Геометрическими параметрами, которые варьировались в процессе оптимизации конфигурации телескопа, являются:

- $h$  – расстояние между оптическими модулями на каждой гирлянде;
- $R$  – расстояние между центральной и периферийными гирляндами кластера;
- $H$  – расстояние между центральными гирляндами соседних кластеров.

В случае ливней высоких энергий, оптимизируемой величиной являлся эффективный объем телескопа. С целью исследования зависимости эффективного объема регистрации ливней высоких энергий от геометрических параметров установки было выполнено моделирование откликов 12-ти различных конфигураций телескопа. Результаты исследований показывают, что эффективный объем регистрации ливней слабо зависит как от вариации расстояния между оптическими модулями на гирлянде, так и от изменения расстояния между центральной и периферийными гирляндами кластера, при равных значениях остальных геометрических параметров. Сравнение результатов моделирования различных конфигураций указывает на существенную зависимость эффективного объема регистрации ливней от величины расстояния между соседними кластерами установки.

Исходя из результатов анализа зависимости эффективного объема регистрации ливней и эффективной площади для регистрации мюонов от значений геометрических параметров телескопа в качестве оптимальной была выбрана конфигурация, для которой расстояние между оптическими модулями на каждой гирлянде  $h = 15$

м, расстояние между центральной и периферийными гирляндами кластера  $R = 60$  м, и расстояние между центральными гирляндами соседних кластеров  $H = 300$  м. Выбранная конфигурация телескопа обеспечивает эффективный объем для регистрации ливней порядка 0.2–0.7 кубических километра в интервале энергий  $10^5$ – $10^9$  ГэВ.

С целью исследования энергетического и углового разрешения телескопа в задаче регистрации ливней высоких энергий было проведено восстановление параметров ливней из соответствующего набора разыгранных событий с использованием методики, описанной ранее в диссертации. В результате было показано, что точность восстановления положения максимума каскадной кривой составляет порядка 2–4 м в зависимости от энергии ливня. Точность восстановления энергии ливня составляет 20–35 %. Точность восстановления направления ливня практически не зависит от энергии ливня и составляет 5–7 градусов.

Таким образом, конфигурация телескопа, выбранная в результате исследований эффективности регистрации ливней высоких энергий, обладает энергетическим и угловым разрешением адекватным требованиям исследований энергетического спектра, глобальной и локальной анизотропии и состава по типам нейтрино природных нейтринных потоков.

**В заключении** формулируются основные результаты работы:

1. Разработана методика восстановления параметров ливней высоких энергий – энергии, направления развития и координат ливня с использованием амплитудно–временной информации фотодетекторов нейтринного телескопа.
2. Выполнен анализ данных, накопленных за период с апреля 1998 года по февраль 2003 года в экспериментах на нейтринном телескопе НТ-200 с целью выделения событий от ливней высоких энергий. Распределения выделенных событий по параметрам, характеризующим ливневые события – энергии и

направления развития ливня, в пределах экспериментальных и теоретических неопределенностей хорошо согласуются с ожидаемыми распределениями событий от атмосферных мюонов.

3. Получено ограничение на величину суммарного (по всем типам нейтрино) диффузного потока нейтрино высоких энергий внеземного происхождения в области энергий  $20 \text{ ТэВ} \div 10^4 \text{ ТэВ}$  в предположении  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1$  для степенного дифференциального спектра нейтрино  $E^{-2}$ :

$$F_\nu E^2 < 2.9 \times 10^{-7} \text{ ГэВ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}.$$

Это ограничение, наряду с близким по величине ограничением, полученным в эксперименте AMANDA, является одним из двух наиболее сильных из существующих на сегодняшний день экспериментальных ограничений в этой области энергий.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. А.В. Аврорин, ..., Б.А. Шайбонов и др.. Поиск нейтрино высоких энергий в Байкальском нейтринном эксперименте. // Письма в астрономический журнал, 2009, т. 35, №10, с. 723–735.
2. А.В. Аврорин, ..., Б.А. Шайбонов и др.. Статус Байкальского нейтринного эксперимента. // Известия РАН, серия физическая, 2009, т. 73, №5, с. 682–684.
3. V. Aynutdinov, ..., B. Shoibonov et al.. Search for a diffuse flux of high-energy extraterrestrial neutrinos with the NT-200 neutrino telescope. // Astropart. Phys., 2006, V. 25, P. 140–150.
4. A. Avrorin, ..., B. Shoibonov et al.. Search for a diffuse flux of high-energy neutrinos with the Baikal neutrino telescope NT-200. // Proc. of the 31st ICRC, Lodz, Poland, July 2009; arXiv:0909.5562.

5. A. Avrorin, ..., B. Shoibonov et al.. The BAIKAL neutrino telescope and km<sup>3</sup> perspective. // Proceedings of 13th International Workshop on Neutrino Telescopes, Ed. by Milla Baldo Ceolin, Venice, Italy, March 10-13, 2009, p. 195–204.
6. A. Avrorin, ..., B. Shoibonov et al.. The Baikal experiment – from Megaton to Gigaton. // Journal of Physics, Conference Series, 2010, v. 203, 012123.