

На правах рукописи

Шелепов Марк Дмитриевич

Выделение событий от ливней высоких энергий и восстановление параметров ливней в экспериментах на первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Научный руководитель:

Суворова Ольга Васильевна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Роганова Татьяна Михайловна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, лаборатория теории электронно-фотонных ливней, заведующий лабораторией.

Рябов Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, дирекция, заместитель директора по научной работе.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ».

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИЯИ РАН по адресу:

<https://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html#slp>

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета Д002.119.01,

кандидат физ.-мат. наук,

С. В. Демидов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Актуальной задачей для развития физики и астрофизики высоких энергий на сегодняшний день является создание в Северном полушарии детектора способного вести исследования природных потоков нейтрино на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube. Эффективнее всех в решении этой задачи на сегодняшний день продвинулась Байкальская коллаборация. Глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD, строящийся в озере Байкал с 2011 года, в настоящее время является крупнейшим нейтринным телескопом в Северном полушарии. С апреля 2021 года его эффективный объем составляет $0,4 \text{ км}^3$ для регистрации ливней от взаимодействия нейтрино в байкальской воде с энергией выше 100 ТэВ. Первый демонстрационный кластер телескопа — «Дубна», был запущен в 2015 году. Эффективный объем отдельного кластера в его проектной конфигурации соответствует $0,05 \text{ км}^3$. В 2020 году установка включала 7 кластеров с 2016 оптическими сенсорами (модулями) [1], а в период зимней экспедиции 2021 года был развернут еще один кластер. В результате суммарное число оптических модулей составило 2304 [2]. Чувствительность, достигнутая на телескопе Baikal-GVD из 8 кластеров, вплотную приблизилась к чувствительности IceCube в задаче регистрации нейтрино по каскадной моде. Соответственно, набор событий от нейтрино высоких энергий на Baikal-GVD в совокупности с данными IceCube позволит приблизить решение задач астрофизики, нейтринной астрономии и космологии, перспективы которых были открыты первыми результатами регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий, а также в исследованиях последних лет в поисках нейтрино от астрофизических источников, диффузных потоков нейтрино и первых результатов построения нейтринной карты неба.

За последние несколько лет астрономия и астрофизика получили значительное развитие благодаря созданию роботизированной сети телескопов, регистрирующих электромагнитное излучение в широком спектре длин волн — от радио до гамма-излучения, детек-

торов частицы космических лучей и нейтрино, и антенн-интерферометров, улавливающих гравитационные волны. Оптимизированная система связи между установками обеспечивает быстрый обмен оповещениями о регистрации сигнала на одной из них и наблюдения его на всех остальных. В настоящее время сформирована международная программа по много-канальному («мульти-мессенджер») поиску источников космического излучения на разных длинах волн. Коллаборация Baikal-GVD участвует в мульти-мессенджер программе с декабря 2018 [3]. Задача участников экспериментов состоит в том, чтобы реализовать глобальный и комплексный анализ данных в момент и в направлении астрофизических событий, рожденных в разных физических процессах генерирующих потоки частиц и излучения по разным каналам одновременно (либо в теоретически ожидаемом временном окне). Такой метод наблюдения дает уникальную возможность изучать физику высоких и сверхвысоких энергий, исследовать отдаленные участки Вселенной, отслеживать такие явления, как рождение черных дыр и столкновение нейтронных звезд в двойных системах, идентифицировать источники излучения, которые могут выделять огромное количество энергии как в виде электромагнитного излучения, так и в виде нейтрино и гравитационных волн. Прорывом в данной области стал алерт (оповещение) 17 августа 2017 года, известного как событие GW170817 [4], от двух гравитационных интерферометров LIGO/VIRGO о регистрации гравитационной волны, возникшей при слиянии двух нейтронных звезд в галактике NGC4993, и последовавшее наблюдение вспышки электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне на орбитальных телескопах и наземных установках. В то же время на действующих нейтринных телескопах, в том числе и на двух работавших в 2017 году кластерах Baikal-GVD, корреляций с событием GW170817 не обнаружили [5].

Первым кандидатом на космическое нейтрино от идентифицированного источника, стало нейтринное событие IC170922A [6], зарегистрированное телескопом IceCube 22-ого сентября 2017 года и соотносимое на уровне 3 сигма с блазаром TXS 0506+056 в период его активности, наблюдаемой в гамма, рентгене, оптическом,

инфракрасном и радио диапазонах [7]. Это обнаружение еще предстоит подтвердить измерениями на других крупномасштабных телескопах в направлении таких источников, как блазары, и тем не менее, само событие отрывает первую страницу нейтринной астрономии высоких энергий.

Нейтрино представляют особый интерес в астрофизике высоких энергий как носители (мессенджеры) информации о физических процессах в звездных системах. У нейтрино ничтожно малая масса и потому скорости их распространения релятивистские. Нейтрино не имеют заряда, стабильны во времени и слабо взаимодействуют с веществом. В отличие от космических лучей траектория движения нейтрино от источника до наблюдателя не искажается магнитными полями, галактическими или межгалактическими. Наконец, в отличие от фотонов, они не взаимодействуют с космическим микроволновым и инфракрасным фоновым излучением. Таким образом, детектирование нейтрино астрофизического происхождения прямо указывает на источники и процессы рождения нейтрино в них. Высокоэнергетические нейтрино могут образовываться при взаимодействии заряженных космических лучей с межзвездной средой, окружающей астрофизические источники. Перспективными кандидатами для испускания нейтрино высоких энергий рассматриваются транзиентные (преходящие) явления, такие как гамма-всплески, коллапс ядра сверхновых или активные ядра галактик. Поскольку высокоэнергетические вспышки происходят за короткие временные интервалы, фон от атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино в данном случае резко понижается, что значительно увеличивает чувствительность нейтринных телескопов при поиске таких источников излучения. Кроме того, сопоставление данных от различных установок позволяет более точно определять координаты источника. Современный подход мульти-канального поиска источников излучения совместно на нейтринных телескопах, гравитационных интерферометрах и детекторах электромагнитного излучения различных длин волн, расширяет возможности идентификации высокоэнергетических источников нейтрино и космических лучей, и актуален в понимании механизмов ускорения частиц в этих источниках.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы является восстановление параметров ливней высоких энергий (каскадов), рожденных во взаимодействии нейтрино в байкальской воде и отобранных триггером событий на нейтринном телескопе Baikal-GVD. Задача включает в себя разработку алгоритма выделения ливней из фоновых событий от прохождения атмосферных мюонов и мюонных групп из верхней полусферы; проверку гипотезы ливня с определением координат вершины взаимодействия нейтрино, направления развития ливня и его энергии. В режиме мульти-мессенджер целью является анализ данных и определение верхнего предела на плотность потока от выделенного вероятного источника нейтрино астрофизического происхождения.

Для достижения поставленных целей определены следующие задачи:

1. Разработка методов калибровки измерительных каналов телескопа в режиме подводного функционирования установки.

2. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для автоматизированной калибровки всех измерительных каналов за короткий срок на всех кластерах установки, для любого количества оптических модулей.

3. Моделирование отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде.

4. Выделение ливневых событий и восстановление их параметров при обработке данных телескопа за 2019–2020 годы.

5. Анализ ливневых событий по триггеру оповещения от других установок в системе мульти-мессенджер.

6. Определение ограничения на поток нейтрино от предполагаемых астрофизических источников.

Методы исследования

Исследования выполнялись в глубоководных условиях озера Байкал на нейтринном телескопе с системой регистрации черенковского излучения. Алгоритмы подавления шума и выбор необходимых сигналов для анализа выполнялись с использованием

численных методов, включая метод максимального правдоподобия и метод Монте-Карло. При обработке импульсов использовался метод дискриминации событий по времени прихода импульсов в соответствии со скоростью распространения света в воде озера Байкал.

Научная новизна

1. Впервые разработаны и применены новые алгоритмы калибровки оптических модулей нейтринного телескопа Baikal-GVD в режиме штатного подводного функционирования установки.

2. Впервые создана база данных ливневых событий на Baikal-GVD и среди них выделены первые ливни с энергией выше 100 ТэВ.

3. Впервые проведен анализ данных Baikal-GVD в рамках международной программы мультимессенджер.

4. Впервые получено ограничение сверху на плотность потока нейтрино от галактики NGC4993, в пределах которой возникла гравитационная волна, в известном гравитационном событии GW170817.

Практическая значимость

1. Разработанные методы и алгоритмы калибровки измерительных каналов позволяют в короткие сроки проводить калибровку большого количества оптических модулей и использовать полученные калибровочные коэффициенты для обработки данных телескопа.

2. Эффективность алгоритма реконструкции ливневых событий позволяет анализировать данные в режиме on-line.

3. Полученные результаты могут применяться для изучения диффузного потока нейтрино астрофизического происхождения.

4. Полученное ограничение на поток нейтрино от столкновения нейтронных звезд может использоваться для проверки гипотез о физической природе высокоэнергетических процессов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработаны методы калибровки оптического модуля, позволяющие проводить калибровку в режиме подводного функционирования установки.

2. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для автоматизированной калибровки, позволяющие в короткие сроки проводить калибровку оптических модулей на всех кластерах установки, при любом их количестве.

3. Результаты измерений точности калибровки и эффективности алгоритма восстановления параметров ливней высоких энергий, проводимых путем восстановления координат лазерного калибровочного источника.

4. Проведено моделирование отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде.

5. Получено ограничение на поток нейтрино из направления прихода события GW170817.

Личный вклад автора

- Автор принимал участие в экспериментальных исследованиях, обработке и анализе данных, полученных на первых семи кластерах нейтринного телескопа Baikal-GVD. Им получен верхний предел на плотность потока нейтрино в известном гравитационном событии GW170817A в направлении галактики NGC4993.
- Автор участвовал в экспериментах на озере Байкал с 2013 года. В период зимних экспедиций на оз. Байкал отвечал за монтаж глубоководных корпусов регистрирующей системы телескопа и высокое качество проводимых тестов, связанных с обеспечением стабильности работы аппаратуры нейтринного телескопа с момента запуска и набора данных.
- Разработал и включил в процесс автоматической обработки программные алгоритмы измерения амплитудных и временных калибровочных коэффициентов, исследовал и учел амплитудный эффект в коррекции погрешности временной калибровки, что обеспечило точность реконструкции мюонных треков лучше одного градуса.
- Контролировал стабильность работы спектрометрических каналов телескопа и, в конечном итоге, обеспечивал возможность участия в международной программе много-канального анализа алерт-событий.

- Автор выполнил анализ отклика оптического модуля телескопа Baikal-GVD на черенковское излучение ливней высоких энергий и выработал критерии подавления фоновых событий от атмосферных мюонов.

Достоверность полученных результатов

В диссертации развиты новые подходы к калибровке временных параметров измерительных каналов на основе использования калибровочных источников света, расположенных в оптических модулях. Автором приведены результаты измерений точности калибровки и эффективности алгоритма восстановления параметров ливней высоких энергий, проводимых путем восстановления координат лазерного калибровочного источника и подтверждающих как корректность методики калибровки, так и моделирование отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде.

Апробация работы

Основные результаты, приведенные в диссертации, докладывались автором на Международной школе-конференции «Evolution of galaxies and stars» /Россия, Сочи, 15-27 Июля 2019/; на Международной школе Понтекорво по нейтринной физике /Румыния, Синая, 1-10 Сентября 2019/; на Международной конференции «Very Large Volume Neutrino Telescopes» VLVT2018 / Россия, Дубна, 2–4 октября 2018/; на VII Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» /Россия, Москва, 16-21 апреля 2018, Национальный исследовательский ядерный университет, МИФИ/; на Международной конференции VLVT2021/Spain Valencia May 18-21, 2021; а также на регулярных рабочих совещаниях Международной коллаборации Baikal-GVD.

Список публикаций по теме диссертации

Основные положения и результаты диссертации М.Д. Шелепова опубликованы в десяти печатных работах в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. A.D. Avrorin, ..., M.D .Shelepov, ... et al. // High-Energy Neutrino Follow-up at the Baikal-GVD Neutrino Telescope, Astron.Lett. 47, 2, 94-104 (2021).
2. A.D. Avrorin, ..., M.D .Shelepov, ... et al. // Search for cascade events with Baikal-GVD, PoS ICRC2019, 873, e-Print: 1908.05430, (2019).
3. A.D. Avrorin, ..., M.D .Shelepov, ... et al. //Calibrating the Measuring Channels of the Baikal-Gvd Neutrino Telescope, Instrum. Exp.Tech. 63 4, 551-560, (2020).
4. A.D. Avrorin, ..., M.D .Shelepov, ... et al. // Baikal-GVD experiment, Phys.Atom.Nucl. 83, 6, 916-921, (2020).
5. A.D. Avrorin, ..., M.D .Shelepov, ... et al. // Recent progress of the Baikal-GVD project, PoS EPS-HEP2019 (2020) 050 (2020).
6. A.D. Avrorin, ..., M.D .Shelepov, ... et al. // Time calibration of the neutrino telescope Baikal-GVD, EPJ Web Conf. 207, 07003, (2019).
7. A.D. Avrorin, ..., M.D .Shelepov, ... et al. // Baikal-GVD: cascades, EPJ Web Conf. 207, 05001, 4pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920705001, (2019).
8. A.D. Avrorin , ..., M.D .Shelepov, ... et al. // Baikal-GVD: first results and prospects, EPJ Web Conf. 209, 01015. DOI: 10.1051/epjconf/201920901015, (2019).
9. A.D. Avrorin , ..., M.D .Shelepov, ... et al. // Search for High-energy Neutrinos from GW170817 with the Baikal-GVD Neutrino Telescope, JETP Lett. 108 no.12, 787-790; e-Print:1810.10966, (2018).
10. A. Allakhverdyan, ..., M.D .Shelepov, ... et al. // The Baikal-GVD neutrino telescope: search for high-energy cascades, PoS(2021)1144, DOI: <https://doi.org/10.22323/1.395.1144>; e-Print:2108.01894, (2021).

Основное содержание диссертации

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, описана задача поиска природных источников нейтрино высоких энергий и метод совместной регистрации сигнала в разных каналах излучения (гамма, нейтрино и гравитационные волны). Формулируются основные задачи, решаемые в диссертации, и результаты, выносимые на защиту.

В Главе 1 приводится описание структуры нейтринного телескопа Baikal-GVD. Телескоп Baikal-GVD имеет модульную структуру, формируемую из функционально независимых установок — кластеров вертикальных гирлянд оптических модулей (ОМ) (рис.1). Расстояние между центрами кластеров составляет 300 метров. Каждый кластер Baikal-GVD представляет собой детектор черенковского излучения, состоящий из 288 оптических модулей. Оптические модули содержат фотоэлектронные умножители (ФЭУ) Hamamatsu R7081-100 с полусферическим фотокатодом диаметром 10 дюймов и квантовой эффективностью около 35%. Кластер является функционально законченной установкой, оснащенной независимой системой сбора данных и соединенной с береговым центром управления отдельной электрооптической линией электропитания и связи. Кластеры телескопа содержат по 8 гирлянд ОМ — одной центральной и семи периферийных, размещенных равномерно по окружности радиусом 60 м. Длина гирлянды 525 метров. Вдоль нее через каждые 15 метров размещены ОМ. Каждая гирлянда установки включает в свой состав три секции оптических модулей (12 ОМ в секции) и 4 акустических модема гидроакустической системы позициониро-

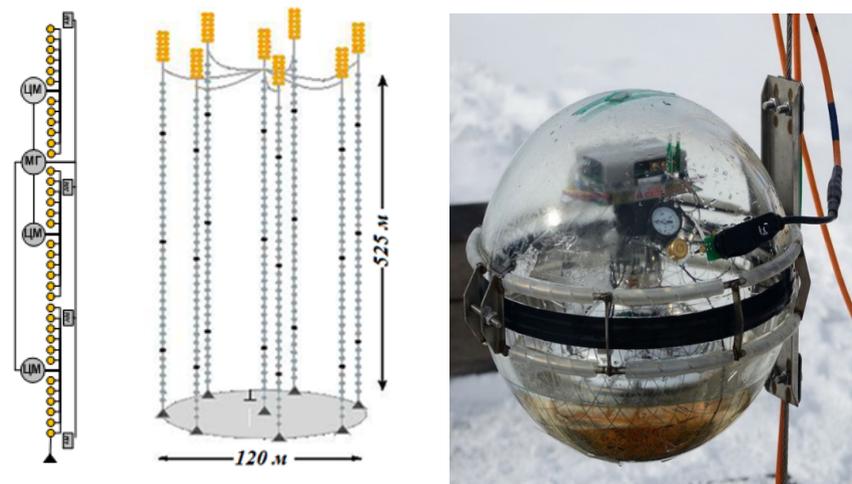


Рис.1. Схема гирлянды оптических модулей и кластера (слева), внешний вид ОМ (справа)

вания. Акустическая система позиционирования обеспечивает определение пространственных координат ОМ с точностью около 10 см. В центральном модуле каждой секции осуществляется непрерывное сканирование аналоговых выходов двенадцати оптических модулей 12-битными АЦП с частотой дискретизации 200 МГц. При реализации триггерных условий формируются временные кадры каналов — преобразованные в цифровой код последовательные наборы амплитуд входных сигналов. Каждый кадр содержит информацию о сигналах, поступивших с канала в интервале времени 5 мкс.

В Главе 2 описываются методы и процедуры калибровки измерительных каналов.

Для калибровки каналов и определения их относительных временных задержек используются светодиодные калибровочные источники, размещенные как непосредственно внутри оптических модулей, так и в отдельных глубоководных корпусах на гирляндах. Лазерный источник света позволяет осуществлять комплексную оценку эффективности временной и амплитудной калибровки каналов, точности позиционирования ОМ и корректности синхронизации кластеров.

Амплитудная калибровка каналов основана на методике измерения одно-фотоэлектронных спектров (о.ф.с.) фотоэлектронных умножителей – амплитудных распределений, полученных в режиме регистрации единичных фотоэлектронов. Аппроксимация одно-фотоэлектронного пика распределением Гаусса позволяет определить средний заряд одного фотоэлектрона Q_{Ie} , выраженный в отсчетах АЦП. В условиях подводного эксперимента для постоянного мониторинга Q_{Ie} всех каналов установки используется подход, основанный на регистрации шумовых импульсов, обусловленных, главным образом, естественным свечением байкальской воды.

Для восстановления энергии каскадных ливней высокой энергии требуется измерять заряды сигналов в диапазоне нелинейного отклика каналов: 10^2 – 10^5 ф.э. Метод измерения основан на сопоставлении сигналов калибруемого канала с сигналами на каналах, удаленных от источника света, для которых выполняется условие линейности. Для этого в условиях подводного эксперимента про-

дится специальный калибровочный сеанс. На рисунке 2 представлены примеры градуировки выборочных каналов установки, полученных в лаборатории и в условиях подводного эксперимента.

Временная калибровка каналов заключается в измерении их относительных временных сдвижек. В разработанном алгоритме

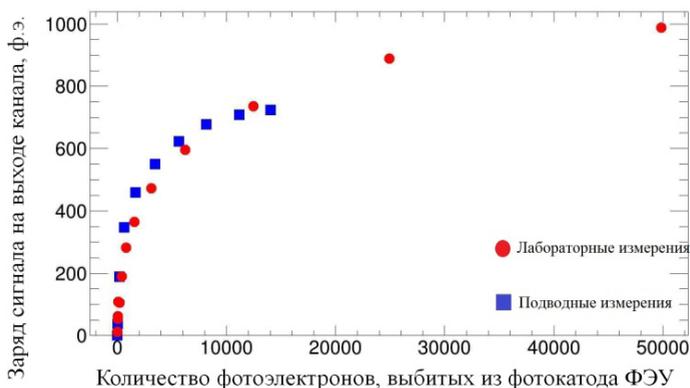


Рис.2. Примеры зарядовых градуировочных кривых каналов, измеренные в лаборатории (красный) и под водой (синий).

временной калибровки используются вспышки светодиодов ОМ, регистрируемые двумя ФЭУ каналов секции. При известном расстоянии между соседними ОМ на гирлянде 15 м и скорости света в воде 0,218 м/нс, ожидаемая задержка между сигналами соседних каналов гирлянды $dt_0 = 68,7$ нс. Относительная временная сдвижка пары каналов определяется как разность между ожидаемой dt_0 и измеренной dt временной задержкой сигналов $dT_{LED} = dt - dt_0$.

Для определения временных сдвижек между каналами секций, расположенных на разных гирляндах, использовались матрицы светодиодов, размещенные в отдельных глубоководных корпусах. Для определения координат светодиодной матрицы и оптических модулей используются данные, полученные при помощи акустической системы позиционирования. Относительные временные сдвижки секций определяются как разность между ожидаемыми dT_0 и измеренными dT временными задержками между сигналами, зарегистрированными на каналах, расположенных в разных секциях.

Важным фактором, влияющим на точность измерения времени регистрации каналов, является зависимость этого параметра от амплитуды сигнала. Эта зависимость обусловлена тем, что в «области насыщения» канала (~ 100 ф.э. и выше), меняются характеристики переднего фронта сигнала, в то время как временная отметка вычисляется на половине высоты импульса. Для определения зависимости временных сдвижек каналов от амплитуды сигнала, было проведено измерение заряда и времени сигнала от светодиода, который находится внутри ОМ, при различных интенсивностях засветки. На рисунке 3 представлены амплитудные зависимости временных сдвижек для двух каналов измеренные в лаборатории и в натурных условиях.

Для комплексной проверки установки во всех режимах ее функционирования использовались два лазерных калибровочных источника света. Они позволили проверить корректность калибровочных процедур, работу гидроакустической системы позиционирования, методику реконструкции событий, регистрируемых нейтринным телескопом. Лазерный источник является квазиточечным, импульсным источником света близким по своим характеристикам ливням высоких энергий, регистрируемых нейтринным телескопом. Применяя процедуру восстановления координат ливней высоких энергий для восстановления положения лазерного источника и

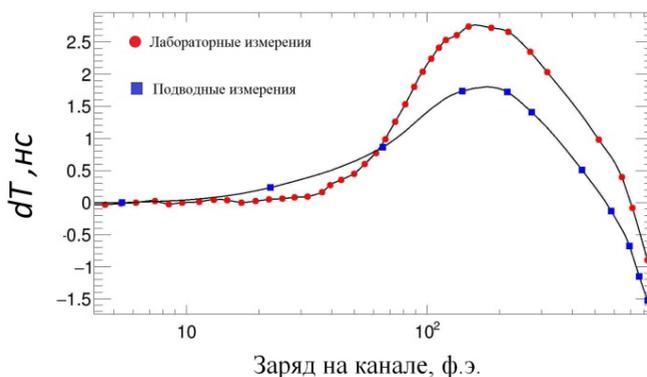


Рис. 3. Примеры амплитудной зависимости временных сдвижек для двух каналов измеренные в лаборатории и под водой

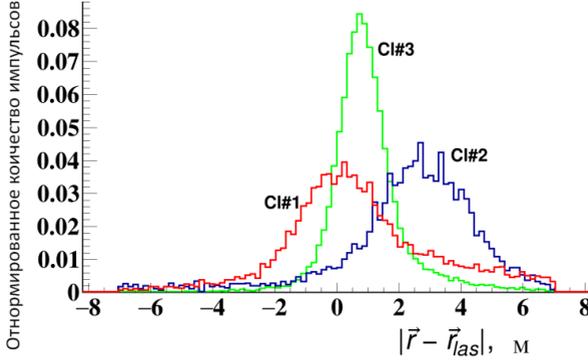


Рис. 4. Распределение расстояний между реальным и восстановленным положениями лазерного источника

проводя сравнение с данными акустической системы позиционирования можно оценить эффективность временной калибровки измерительных систем кластеров телескопа. На рисунке 4 представлены распределения относительного смещения координат лазерного источника, полученные из данных нейтринного телескопа и акустической системы позиционирования.

В Главе 3 описывается процедура восстановления параметров каскадных событий.

Раздел 3.1 посвящен моделированию отклика ОМ на излучение от каскада.

Благодаря высокой прозрачности среды черенковское излучение ливней высоких энергий регистрируется с расстояний, существенно превышающих продольную длину ливня. Поэтому, во многих случаях при моделировании светового потока от ливней, можно пользоваться моделью точечного ливня для которого функция источника единичной мощности I_0 имеет вид:

$$I_{0sh} = \frac{\Psi_0(\vec{\Omega} * \vec{z})}{4\pi} f_{ch}(\lambda) \delta(\vec{r} - \vec{r}_0)(t - t_0) \quad (1)$$

где $f_{ch}(\lambda)$ и $\Psi_0(\Omega \cdot z)$ определяют, соответственно, спектральное и угловое распределение фотонов источника. Решение кинетического уравнения распространения светового потока (уравнение 3.18 в диссертации с полным описанием) с функцией источника

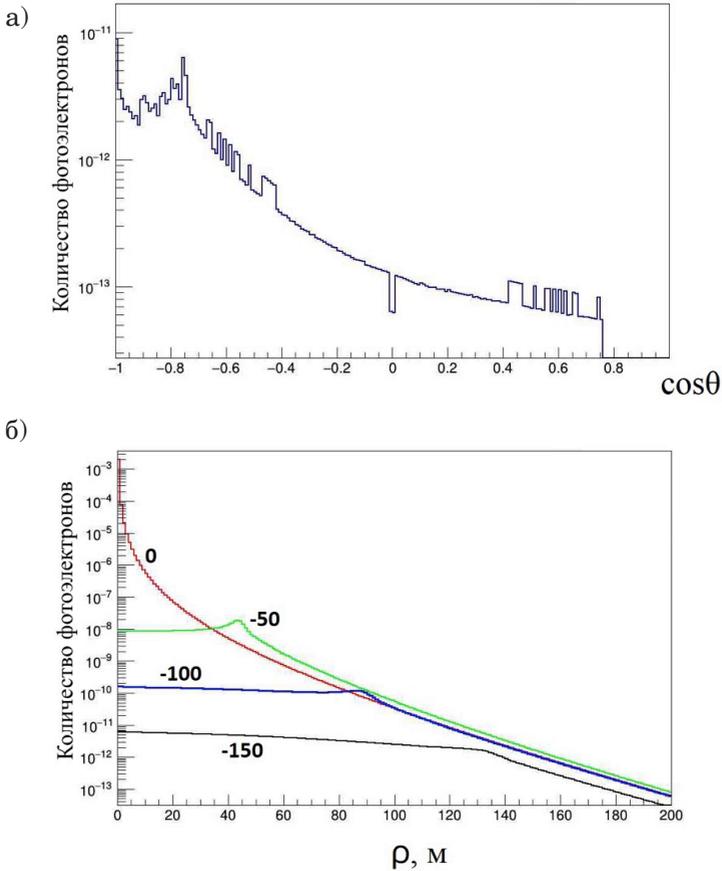


Рис.5. Зависимость амплитуды сигнала от косинуса полярного угла ОМ на расстоянии 200 м (а), Зависимость амплитуды сигнала от расстояния до каскада для различных z при ориентации ОМ против каскада (б)

(1) можно получить с помощью численного метода Монте Карло. Методика, лежащая в основе программы МК-моделирования распространения света в прозрачной среде, позволяет получить пространственное, угловое и временное распределение фотонов от ливней (в приближении точечного источника). Затем, учитывая параметры ФЭУ в оптическом модуле, можно получить пятимерный массив $\Phi_{sh}(l, m, n, k, i)$, элементами которого являются амплитуды сигнала ОМ в точках с параметрами (l, m, n, k, i) , т.е. отклик ОМ на излучение от каскада. Здесь бины массива: l — полярного угла ОМ;

m — азимутального угла ОМ; n — времени прихода фотона относительно первого нерассеянного фотона; k, i — бины координат ОМ в цилиндрической системе координат. Информация об отклике ОМ на излучение от электромагнитного каскада необходима для вычисления вероятности срабатывания ОМ при восстановлении параметров каскадов. Ранее для подобных расчетов использовалась модель откликов для ФЭУ Квazar-370, которые устанавливались в НТ-200. Использование в расчетах новых модельных данных позволит повысить точность реконструкции параметров ливней высоких энергий. На рис. 5(а) представлена зависимость амплитуды сигнала от косинуса полярного угла ОМ на расстоянии 200 м от каскада для Baikal-GVD. При этом ОМ всегда ориентирован на каскад.

На рис.5(б) представлена зависимость амплитуды сигнала от расстояния до каскада для различных z при ориентации ОМ против каскада.

В разделе 3.2 описывается метод вычисления координаты, направления развития и энергии ливня.

В алгоритме реконструкции ливней используются времена и амплитуды импульсов на сработавших ОМ, а также координаты ОМ, полученные акустической системой позиционирования. Для фильтрации шумовых срабатываний используются следующие критерии: в событии должны сработать хотя бы 6 ОМ на 3 различных гирляндах; времена импульсов на всех сработавших ОМ должны удовлетворять критерию причинности:

$$|t_i - t_j| < \frac{d_{ij}}{v} + \delta t \quad (2)$$

где t_i, t_j — времена срабатываний i -го и j -го модулей, d_{ij} — расстояние между модулями, $v^{-1} = 4,58$ нс/м — величина обратная скорости света в воде, $\delta t = 20$ нс.

Восстановление параметров ливней осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится восстановление координат ливня rsh с использованием временной информации сработавших каналов телескопа. В качестве координат ливня x, y, z выбираются значения параметров, соответствующих минимальному значению функционала χ^2 :

$$\chi_i^2 = \frac{1}{(N_{hit} - N_{par})} \sum_{i=1}^{N_{hit}} \frac{(T_i(\overline{r_{sh}}, t_0) - t_i)^2}{\sigma_{ti}^2} \quad (3)$$

где t_i и T_i — измеренное и теоретически ожидаемое время срабатывания i -го канала, t_0 — время зарождения ливня, $\sigma_{ti} = 4$ нс — неопределенность измерения времени, N_{hit} — число сработавших каналов, $N_{par} = 4$ — количество степеней свободы. В качестве первоначальной координаты ливня выбирается координата модуля с наибольшим зарядом, затем проводится перебор координат по пространственной сетке и минимизация функционала. Затем в качестве кандидатов на нейтринные события отбираются те, для которых $\chi^2 < 3$. Проверка точности восстановления проводилась при восстановлении координат лазерного калибровочного источника, описанном в предыдущей главе. Медианное значение ошибки составляет 2,5 м.

На втором этапе проводится восстановление энергии и направления развития ливня с применением метода максимального правдоподобия, и с использованием восстановленных на первом этапе координат ливня. В качестве полярного и азимутального углов, характеризующих направление развития ливня, и энергии ливня выбираются значения θ , φ и E_{sh} , соответствующие минимальному значению функционала:

$$L_A = -\sum_{i=1}^{N_{hit}} \ln p_i(A_i, E_{sh}, \overline{\Omega_{sh}}(\theta, \varphi)) \quad (4)$$

где p_i — вероятность регистрации сигнала с амплитудой A_i на i -ом канале от каскада с энергией E_{sh} и направлением Ω_{sh} :

$$p_i = \sum_{n=1}^{\infty} \ln P\left(\frac{n}{\bar{n}_{pe}}\right) \int_{A_i - \frac{\alpha}{2}}^{A_i + \frac{\alpha}{2}} \xi_i(A, n) dA \quad (5)$$

где P — вероятность регистрации n фотоэлектронов при среднем \bar{n}_{pe} для распределения Пуассона, $\xi_i(A, n)$ — плотность вероятности регистрации амплитуды A при уровне засветки в n фотоэлектронах, α — цена деления амплитудного кодировщика в фотоэлектронах. Средние значения \bar{n}_{pe} определяются в результате моделирования откликов оптических модулей на черенковское излучение ливня

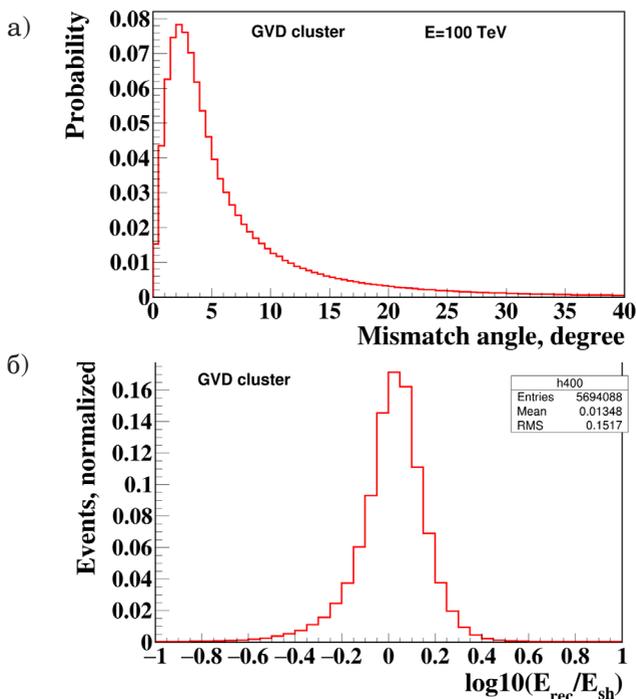


Рис.6. Распределение ошибок восстановления направления ливня по данным Монте-Карло (а), распределение отношений восстановленной энергии к реальной (б)

с энергией E_{sh} и направлением Ω_{sh} , с учетом распространения света в воде, ориентации модулей относительно ливня, и эффективной чувствительности оптических модулей. В качестве кандидатов на нейтринные события отбираются те, для которых $L_A < 10$.

Точность восстановления энергии и направления ливня оценивалась при восстановлении событий из набора данных, смоделированных методом Монте-Карло. Для оценки использовались разыгранные события с энергиями выше 100 ТэВ. Результаты проверки точности показаны на рис. 6. Для направления медианное значение ошибки составило 3,50. Для энергии медианное значение ошибки составило 30%.

В Главе 4 описывается анализ экспериментальных данных и анализ каскадных событий по триггеру от других установок в системе мульти-мессенджер.

В течение 2915 дней эффективного набора данных в период с 2019 по 2020 годы на нейтринном телескопе Baikal-GVD было зарегистрировано $6,34 \cdot 10^9$ событий. После процедуры восстановления ливневых событий и наложения ограничений на количество сработавших каналов в событии больше 19 и на энергию ливня больше 40 ТэВ, было выделено 72 каскадных события. На рис. 7 показаны распределение этих событий по энергиям (а) и по косинусу зенитного угла (б).

Для дополнительного подавления фона от групп мюонов, был предложен метод, основанный на анализе временного распределе-

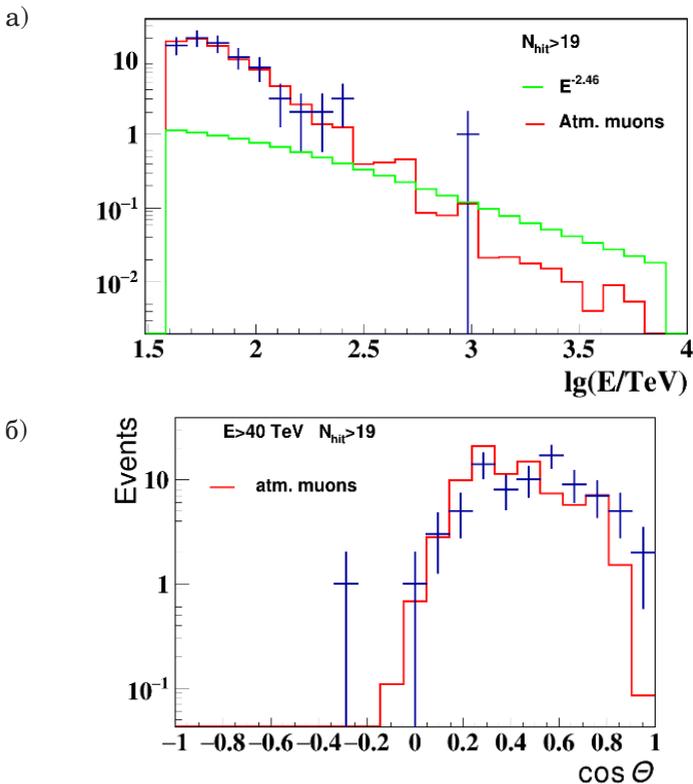


Рис.7. (а) распределения событий по энергии: данные (крестики), атмосферные мюоны (красная гистограмма), астрофизические нейтрино (зеленая гистограмма); (б) распределения событий по косинусу зенитного угла: данные (крестики), атмосферные мюоны (гистограмма)

ния сигналов на каждом ОМ и их классификации. Процедура дополнительного подавления фоновых событий предполагает ограничение числа импульсов от мюонов, не совпадающих с импульсами от ливня в выделенных событиях. В результате применения данной процедуры было выделено семь событий – кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы с энергией выше 60 ТэВ и ножественностью сработавших каналов $N_{hit} > 19$ ОМ. Интегральное распределение этих событий приводится на рис. 8 (крестики). На том же рисунке приводятся ожидаемые распределения от атмосферных мюонов и от потока астрофизических нейтрино со спектром $E^{-2,46}$ нормировкой IceCube.

В результате применения процедуры дополнительного подавления фоновых событий к набору данных 2018 года, с энергией выше 100 ТэВ, было выделено дополнительно 3 события. Таким образом, число кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы составило 10 событий.

Одно из этих событий имеет восстановленную энергию порядка 1 ПэВ. Одно событие восстановлено как событие из-под горизонта с зенитным углом 109°. Расположение первых 10 нейтринных кан-

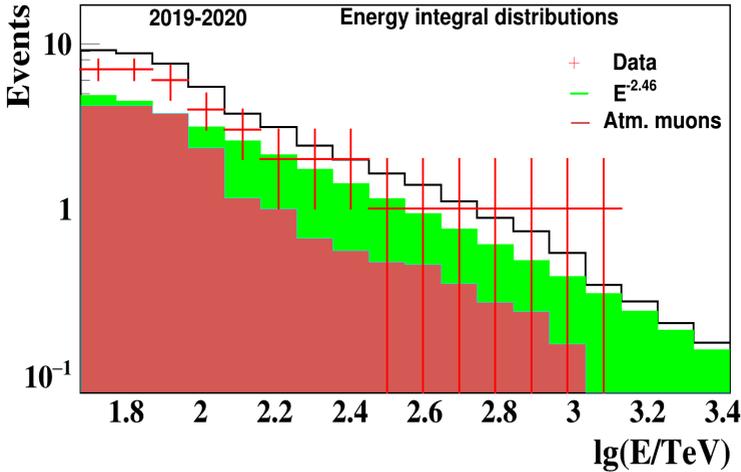


Рис.8. Интегральные распределения выделенных событий по энергии (крестики) и ожидаемых событий от атмосферных мюонов (коричневая гистограмма) и от диффузного потока астрофизических нейтрино (зеленая гистограмма)

дидатов Baikal-GVD на карте небесной сферы показано на рисунке 4.24 в диссертации с иллюстрацией на фоне распределения γ -источников каталога эксперимента FERMI-LAT.

В рамках международной программы мульти-мессенджер исследований проводился анализ девяти алерт событий нейтринного телескопа IceCube с начала сентября до конца октября 2020 г. Все девять алертов были трековыми событиями, с направлением снизу вверх для IceCube, с хорошей точностью восстановления направления мюона: около $0,5^\circ$ (категория “gold”) и до $2,5^\circ$ (“bronze”). Оценка энергии этих событий приводится в табл. 1, все они выше 100 ТэВ и два значения — выше 600 ТэВ. Нейтринные алерты являются хорошими кандидатами на астрофизические события, при том, что вероятность их внеатмосферного происхождения около 50% для категории “gold” и $\sim 30\%$ для “bronze”. Потоки нейтрино от источников северного неба на Baikal-GVD наблюдаются в большинстве случаев как события сверху. Соответственно, в направлении алертов от IceCube на Baikal-GVD восстановление ливневых событий эффективнее трековых, но фон в обоих случаях зависит от временного окна относительно оповещения. В настоящее время информация об алертах телескопа IceCube считывается по сообщениям циркуляра GCN. Суточные траектории наблюдения алертов в горизонтальных координатах Baikal-GVD показаны на рис.9, где фиксированные координаты алертов обозначены цветными символами “прямой крестик”. Как видно, для телескопа Baikal-GVD шесть событий находятся в верхней полусфере, три — в нижней.

В поиске событий на совпадение с алертами IC по каскадной моде из соответствующих наборов экспериментальных данных отбирались события, удовлетворяющие критериям отбора ливней с множественностью сработавших оптических модулей $N_{hit} > 7$, проводилась реконструкция направления и энергии ливней, и определялся угол ψ между направлением на положение источника нейтрино на небесной сфере и направлением на возможный источник выделенного каскада. В качестве событий, ассоциированных с соответствующим алертом IC, выбирались каскады со значением $\psi < 5^\circ$. В результате анализа были выделены три каскадных события для

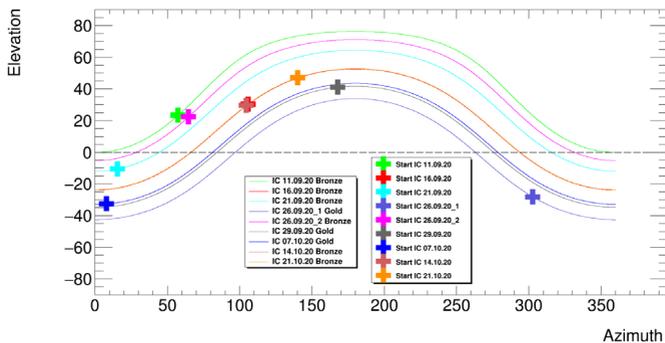


Рис. 9. Суточные траектории девяти алертов в локальной системе координат Baikal-GVD

алертов IC200926B, IC200929A и IC201014A во временных интервалах ± 12 ч, и не было выявлено событий во временных интервалах ± 1 ч. Основным источником фоновых событий в данном анализе являются группы атмосферных мюонов и каскады, генерируемые атмосферными мюонами высоких энергий. Ожидаемое число фоновых событий N_{bg} в конусе 5° для каждого алерта определялось по полному набору данных Baikal-GVD за 2019 г. (апрель 2019 г. — февраль 2020 г.), соответствующему 1495.19 дням эффективного набора данных одним кластером телескопа. Вероятность принадлежности к фону трех зарегистрированных событий для IC200926B, IC200929A и IC201014A составляет, соответственно, 0,32 (0.99 σ), 0,29 (1.11 σ) и 0,36 (0.85 σ). Таким образом, в данных Baikal-GVD не выявлено статистически значимого превышения числа зарегистрированных каскадных событий, ассоциированных с алертами IC, над ожидаемым числом фоновых событий.

В отсутствие статистически значимого превышения числа зарегистрированных событий над ожидаемым фоном, для каждого из IC алертов можно установить ограничение на число ожидаемых событий. Согласно статистике Фелдман-Кузинс, при нулевом числе измеренных событий в конусе на источник, предельное значение числа ожидаемых событий на 90% доверительном уровне (д.у.) составляет $n_{90\%} = 2,44$, а в случае алертов IC200926B, IC200929A и IC201014A, когда было зарегистрировано по одному событию, $n_{90\%} = 4,36$. Ис-

пользуя значения $n_{90\%}$ и эффективные площади регистрации нейтрино, были получены ограничения на 90% доверительном уровне на зависящий от энергии поток нейтрино одного типа $F(E)$ в единицах измерения $[\text{ТэВ}^{-1} \text{см}^{-2}]$ со спектром E^{-2} в предположении о равной доле типов нейтрино в полном потоке. Все полученные ограничения приведены в табл. 1 в направлении всех девяти алертов.

Таблица 1. Верхние пределы на потоки нейтрино $E^2 F(E)$ $[\text{TeV cm}^{-2}]$ из направлений прихода алертов для E^{-2} спектров нейтрино в источнике

Alert	Type	E , TeV	Elevation, degrees	Nobs, ± 12 h	Significance level	N_{bg} , per day	Flux limit, $E^2 F(E)$, TeV cm^{-2}
IC200911A	Bronze	111	23,2	–	–	0,33	$1,43 \times 10^{-3}$
IC200916A	Bronze	110	30,3	–	–	0,29	$1,12 \times 10^{-3}$
IC200921A	Bronze	117	10,6	–	–	0,36	$1,13 \times 10^{-3}$
IC200926A	Gold	671	28,2	–	–	0,19	$1,14 \times 10^{-3}$
IC200926B	Bronze	121	22,3	1	0,32	0,39	$2,5 \times 10^{-3}$
IC200929A	Gold	183	41,1	1	0,29	0,35	$2,5 \times 10^{-3}$
IC201007A	Gold	683	32,5	----	–	0,25	$1,12 \times 10^{-3}$
IC201014A	Bronze	147	29,5	1	0,36	0,44	$2,44 \times 10^{-3}$
IC201021A	Bronze	105	47,1	–	–	0,37	$1,37 \times 10^{-3}$

17 августа 2017 года детекторы LIGO и Virgo зарегистрировали сигнал гравитационной волны GW170817 от столкновения двух нейтронных звезд. Затем короткий всплеск гамма-излучения GRB170817A совпадающий по времени с GW170817 был зафиксирован детекторами Fermi-GBM и INTEGRAL. Последующие наблюдения в оптическом диапазоне позволили установить координаты источника гравитационной волны NGC 4993.

Для Baikal-GVD на момент регистрации GW170817 зенитный угол NGC 4993 составлял $93,3^\circ$. Поскольку обработка данных установки проводилась в фиксированных временных интервалах $+500$ секунд и $+14$ суток от времени регистрации гравитационной волны и были известны координаты источника, фон от атмосферных мюонов и нейтрино был ниже чем при обычной обработке данных, что позволяет применить более мягкие критерии отбора для выделения нейтринных событий. В окне $+500$ секунд было выде-

лено 731 событие, с условиями на количество засвеченных модулей больше 5. После процедуры реконструкции и наложения критериев отбора осталось два события. Однако они не совпали по направлению с NGC 4993. Ожидаемый уровень атмосферного фона составляет 5×10^{-2} события в данном временном окне. Из найденного ограничения на число событий согласно статистике Фелдман-Кузинс был определен верхний предел на поток одного аромата нейтрино для спектра E^{-2} с экспозицией источника на эффективной площади регистрации нейтрино. В диапазоне энергий от 5 ТэВ до 10 ПэВ на уровне достоверности 90% верхний предел на нейтринный поток со спектром E^{-2} составил $5,2 \times (E/\text{ГэВ})^{-2} \text{ГэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ для временного окна ± 500 секунд и $9 \times (E/\text{ГэВ})^{-2} \text{ГэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ для временного окна ± 14 суток от времени регистрации гравитационной волны (рис.10).

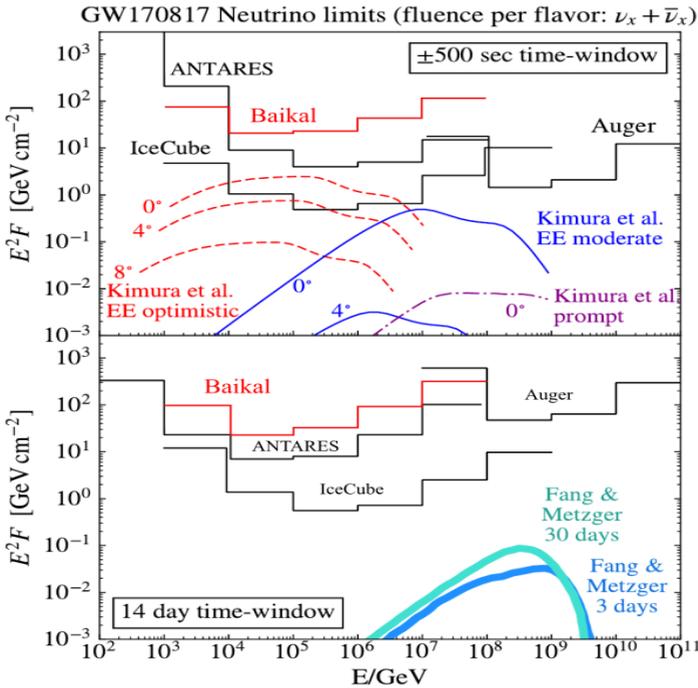


Рис.10. Верхний предел (на уровне достоверности 90%) на поток нейтрино от GW170817 во временных окнах ± 500 секунд (сверху) и ± 14 суток (снизу) от гравитационного триггера. Также показаны пределы, полученные на других нейтринных телескопах, и оценки на поток в моделях испускания нейтрино

В заключении сформулированы основные результаты работы и делается вывод, что разработанные эффективные процедуры калибровок измерительных каналов телескопа и методы тестирования алгоритма восстановления ливней позволили впервые по экспериментальным данным глубоководного телескопа Baikal-GVD создать базу данных ливневых событий высоких энергий и выделить первые ливни с энергией выше 100 ТэВ. Реконструкция ливневых событий на Baikal-GVD впервые была применена в мульти-канальном поиске источников нейтрино высокой энергии, и полученные ограничения сверху на плотность потока нейтрино в известном гравитационном событии GW170817A сопоставимы с результатами мировых экспериментов.

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. Разработаны методы калибровки оптического модуля, позволяющие проводить калибровку в режиме подводного (in-situ) функционирования установки с точностью ~ 2 нс, что обеспечивает точность реконструкции направления треков меньше градуса.

2. Разработаны новые алгоритмы и программное обеспечение для автоматической калибровки, позволяющие в короткие сроки проводить калибровку оптических модулей на всех кластерах установки, при любом их количестве.

3. Впервые для кластера Baikal-GVD сделана оценка точности калибровки и эффективности алгоритма восстановления параметров ливней высоких энергий путем восстановления координат лазерного калибровочного источника: точность восстановления координат ливня до 3 метров, медианное значение в определении направления 3.50 и 30% погрешность восстановления энергии ливня.

4. Впервые для кластера Baikal-GVD показана область направлений и расстояний от вершины взаимодействия нисходящих ливней с эффективностью регистрации не менее 90%, полученная из моделирования отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде.

5. Впервые по данным Baikal-GVD выделены нейтринные со-

бытия с энергией выше 60 ТэВ и выше 100 ТэВ, как кандидаты на события астрофизического происхождения.

6. Впервые по данным Baikal-GVD в квази-онлайн режиме обработки данных проведен анализ оповещений (алертов) от нейтринного телескопа IceCube. В отсутствии корреляций каскадов с алертами по направлению и времени в интервале времени ± 12 часов получены оценки чувствительности телескопа Baikal-GVD в композиции 5 кластеров к потоку нейтрино от источников Северного неба на уровне 1,1–2,5 ГэВ/см² для спектра нейтрино E^{-2} в диапазоне энергий нейтрино от 1 ТэВ до 10 ПэВ.

7. Получены ограничения сверху на 90% доверительном уровне на поток нейтрино от источника гравитационной волны в известном мульти-волновом событии GW170817A для двух кластеров Baikal-GVD в двух режимах наблюдения: прямом (± 500 с) и после вспышки в течение 14 суток, для спектра нейтрино E^{-2} в интервале энергий от 103 ГэВ до 108 ГэВ.

Цитированная литература

1. A.D. Avrorin, ..., M.D. Shelepov, ... et al. // Baikal-GVD experiment, Phys.Atom.Nucl. 83, 6, 916-921, (2020).
2. I. Belolaptikov and Z.A.M. Dzhilkibaev for Baikal-GVD Coll. // Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Nearest Future // PoS(2021)002 (2021); <https://pos.sissa.it/395/002/pdf>.
3. S. Alves Garre, ..., M.D. Shelepov, ... et al. // ANTARES offline study of three alerts after Baikal-GVD follow-up found coincident cascade neutrino events, Proc. of the 37th ICRC, PoS(ICRC2021)1121, (2021); arXiv:1207.14303v1.
4. B. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al. (LIGO Sci. Collab., Virgo Collab.) // GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017).
5. A. Albert, M. Andre, M. Anghinolfi, et al. (ANTARES Collab., IceCube Collab., Pierre Auger Collab.) // Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory// arXiv:1710.05839 (2017).

6. M. Aartsen, M. Ackermann, J.Adams et al., (IceCube Collab.)// Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert// Science 361, 147 (2018).
7. M.Aartsen (The IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S, INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 teams)), Science \textbf{361}, issue 6398, eaat1378, (2018b).-

Научное издание

Шелепов Марк Дмитриевич

Выделение событий от ливней высоких энергий
и восстановление параметров ливней в экспериментах
на первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,4 Зак. № 22476 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а