

ГЛУБОКОВОДНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ ДЕТЕКТОР В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

А. В. Аврорин^а, А. Д. Аврорин^а, В. М. Айнутдинов^{а*}, В. А. Аллахвердян^а, П. Банаш^а,
З. Бардачова^а, И. А. Белолептиков^а, И. В. Борина^а, В. Б. Бруданин^а, Н. М. Буднев^а,
А. Р. Гафаров^а, К. В. Голубков^а, Н. С. Горшков^а, Т. И. Гресь^а, Р. Дворницки^а,
Ж.-А. М. Джилкибаев^{а**}, В. Я. Дик^а, Г. В. Домогацкий^{а***}, А. А. Дорошенко^а,
А. Н. Дячок^а, Т. В. Елжов^а, Д. Н. Заборов^а, М. С. Катулин^а, К. Г. Кебкал^а,
О. Г. Кебкал^а, В. А. Кожин^а, М. М. Колбин^а, К. В. Конищев^а, К. А. Копански^а,
А. В. Коробченко^а, А. П. Кошечкин^а, М. В. Круглов^а, М. К. Крюков^а, В. Ф. Кулепов^а,
П. Малецки^а, Ю. М. Малышкин^а, М. Б. Миленин^а, Р. Р. Миргазов^а, В. Назари^а,
Д. В. Наумов^а, В. Нога^а, Д. П. Петухов^а, Е. Н. Плисковский^а, М. И. Розанов^а,
В. Д. Рушай^а, Е. В. Рябов^а, Г. Б. Сафронов^а, А. Э. Сиренко^а, А. В. Скурихин^а,
А. Г. Соловьев^а, М. Н. Сорокинов^а, А. П. Стромаков^а, О. В. Суворова^{а****},
Е. О. Сушенок^а, В. А. Таболенко^а, Б. А. Таращанский^а, Л. Файт^а,
С. В. Фиалковский^а, Е. В. Храмов^а, Б. А. Шайбонов^а, М. Д. Шелепов^а,
Ф. Шимкович^а, И. Штекл^а, Э. Эцкерова^а, Ю. В. Яблокова^а, С. А. Яковлев^а

^а Authors and Affiliations see below

Поступила в редакцию 12 октября 2021 г.,
после переработки 10 декабря 2021 г.
Принята к публикации 10 декабря 2021 г.

Нейтринный телескоп Baikal-GVD является глубоководным черенковским детектором элементарных частиц масштаба кубического километра, развертывание которого ведется начиная с 2016 г. на озере Байкал. Телескоп формируется из отдельных блоков — кластеров оптических модулей, что позволяет вести научные исследования уже на ранних этапах его развертывания. В конфигурации 2021 г. детектор содержит 8 кластеров с общим числом оптических модулей 2304 и является самым большим нейтринным телескопом в Северном полушарии. Приводится описание конструкции и основные характеристики системы сбора данных Baikal-GVD, рассматриваются вопросы глубоководной инженерии, связанные с развертыванием детектора, и представлен ряд физических результатов, полученных на установке.

Статья для специального выпуска ЖЭТФ, посвященного 100-летию А. Е. Чудакова

DOI: 10.31857/S0044451022040034

EDN: DPLJJM

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокий уровень прозрачности воды, значительная глубина и возможность использования ледяного покрова для развертывания глубоководной аппаратуры предоставляют уникальные возможности для создания крупномасштабного нейтринного телескопа в озере Байкал. Такую задачу в начале 1980-х гг.

* E-mail: aynutdin@yandex.ru

** E-mail: djilkib@yandex.ru

*** E-mail: domogats@yandex.ru

**** E-mail: suvorova@inr.ru

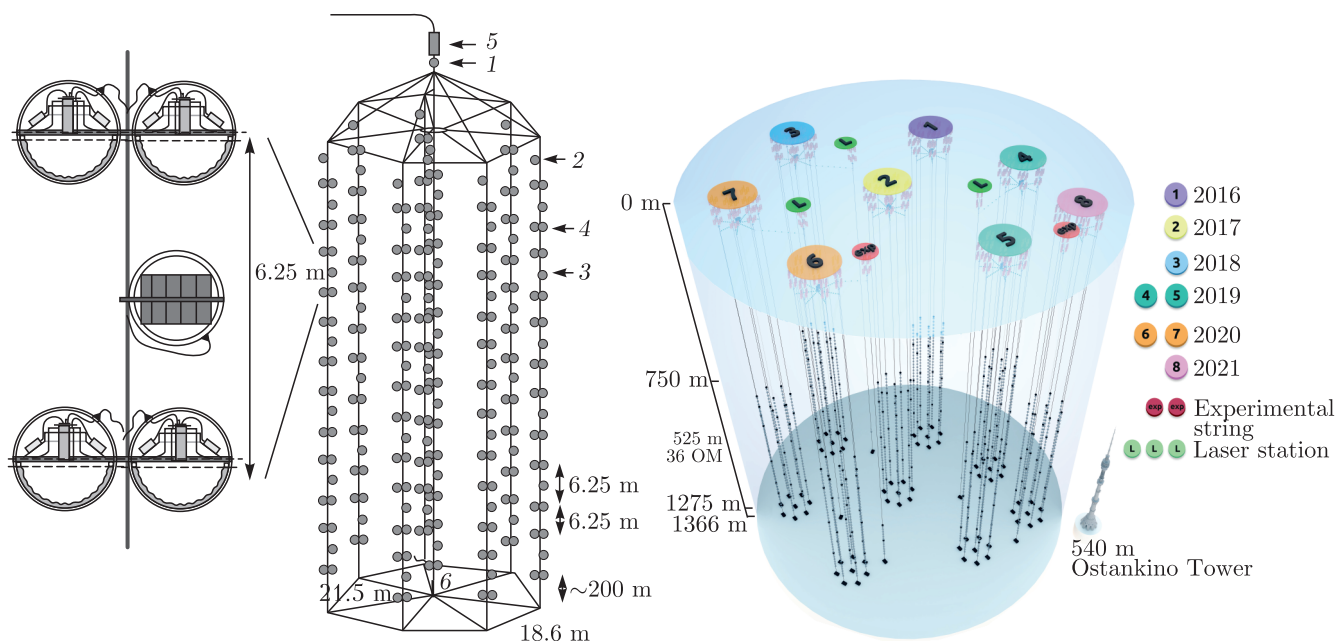


Рис. 1. Слева: Схематичное изображение телескопа NT200: отдельно слева показана структурная единица телескопа — «связка» оптических модулей, состоящая из двух пар ОМ и модуля электроники; 1 — блок электроники детектора; 2 — блок электроники гирлянды; 3 — системный модуль; 4 — пара ОМ; 5 и 6 — калибровочные лазеры. Справа: Восемь кластеров Baikal-GVD в конфигурации 2021 г., станции с калибровочными лазерными источниками света и экспериментальные гирлянды телескопа (подробнее в тексте). Сезон начала функционирования каждого кластера показан справа. Схема оптического модуля приведена на рис. 4

предложил решить своим коллегам, ученым Института ядерных исследований, А. Е. Чудаков в рамках реализации идеи М. А. Маркова [1] о регистрации природных потоков нейтрино в естественных водоемах. Задача была решена наименее затратным способом с помощью фотодетекторов, погружаемых на глубину озера Байкал со льда. Исторически первые в мире подводные нейтрино были зарегистрированы в середине 1990-х гг. глубоководным нейтринным телескопом в озере Байкал NT200 [2]. К началу 2000-х гг. объем байкальского телескопа составлял около 100 кт и телескоп имел наилучшую чувствительность к нейтринным потокам с энергиями выше десятка гигаэлектронвольт. Современные крупномасштабные телескопы чувствительны к потокам нейтрино вплоть до энергий свыше десятков петаэлектронвольт [3].

Успешная работа NT200 на протяжении более 10 лет во многом была обусловлена уникальными разработками в области глубоководной инженерии, которые обеспечили эффективное развертывание и эксплуатацию установки. На основе опыта создания NT200 в 2011 г. было начато проектирование крупномасштабного нейтринного телескопа Baikal-GVD. Телескоп расположен в южной части озера Байкал

на 106 км Кругобайкальского участка ВСЖД. Географические координаты места расположения комплекса Байкальского нейтринного телескопа составляют $51^{\circ}50'$ С.Ш., $104^{\circ}20'$ В.Д. Нейтринный телескоп расположен на расстоянии порядка 4 км от берега. Глубина озера в месте расположения установки составляет 1366 м. Принципиальным требованием к конструкции телескопа являлась его модульная структура, которая обеспечивает возможность проведения физических исследований уже на ранних стадиях развертывания установки. Первый полномасштабный модуль телескопа (кластер фотодетекторов или оптических модулей, ОМ) был включен в режиме постоянной экспозиции в 2016 г., а к весне 2021 г. было введено в эксплуатацию восемь аналогичных кластеров с суммарным эффективным объемом 0.4 км^3 в задаче регистрации каскадов, генерируемых астрофизическими нейтрино с энергией выше 100 ТэВ. Развертывание новых кластеров телескопа и ремонтные работы на функционирующих кластерах проводятся в течение 8–10 недель с конца февраля по начало апреля с ледового покрова озера. После ввода в эксплуатацию каждый кластер телескопа ведет непрерывный круглосуточный набор данных. При необходимости ремонтные работы

на кластере проводятся в период зимней экспедиции на озеро Байкал. Для сравнения масштабов установок, первого глубоководного телескопа NT200 и современного телескопа Baikal-GVD из восьми кластеров, на рис. 1 схематично показаны структуры и размеры каждого из них. Гирлянды с оптическими модулями телескопа Baikal-GVD, расположенными на глубинах от 750 до 1275 м, по длине на порядок превышают 72-метровые гирлянды с ОМ первого телескопа NT200 [2].

Первые события от диффузного потока нейтрино астрофизического происхождения были зарегистрированы телескопом IceCube на Южном полюсе [4]. Всего за 7.5 лет наблюдений в данных IceCube выделено 60 кандидатов астрофизических нейтрино с энергией выше 60 ТэВ с вершиной взаимодействия во внутреннем объеме установки 0.4 км^3 [5]. Однако источники этих нейтрино не идентифицированы. Действующие крупномасштабные установки: Baikal-GVD, IceCube, ANTARES [6] и строящийся KM3NeT [7] в Средиземном море, объединяют усилия в решении фундаментальной задачи идентификации нейтринных источников, формируя мировую сеть нейтринных телескопов GNN (Global Neutrino Network) и участвуя в программе многоканальных астрономических наблюдений (мульти-мессенджер) с оповещениями о сигнале в реальном времени на разных длинах волн и в разных энергетических диапазонах.

В статье рассматриваются инженерные решения, связанные с технологией развертывания и эксплуатации крупномасштабного нейтринного телескопа Baikal-GVD, особенности регистрации черенковского излучения и представлен ряд первых физических результатов в поиске нейтрино с энергией выше 100 ТэВ.

2. МЕТОД ГЛУБОКОВОДНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Исследование природных потоков нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в экспериментах на глубоководных (или подледных) нейтринных телескопах основывается на методе регистрации черенковского излучения вторичных высокоэнергичных частиц, образующихся в нейтринных взаимодействиях в воде, набором фотодетекторов, размещенных на достаточно больших расстояниях: от десятков до сотен метров друг от друга. Возникающие при рассеянии нейтрино на нуклонах в реакциях заряженного и нейтрального тока мюоны и элек-

тромагнитные или адронные ливни частиц с энергией от сотен ГэВ и выше представляют собой два типа источников черенковского излучения высокой интенсивности, регистрируемых на нейтринных телескопах. От релятивистского мюона, рожденного в заряженных токах и распространяющегося прямолинейно, фотоны излучаются в конусе с углом θ_c относительно направления движения частиц. Значение черенковского угла θ_c , определяемого из выражения $\cos(\theta_c) = 1/\beta n$, составляет примерно 42° для воды и льда, где n — фазовый показатель преломления света в среде, зависящий от длины волны фотона λ , а $\beta = v/c$ — скорость частицы относительно скорости света в вакууме. Спектральное распределение черенковских фотонов, излучаемых с единицы длины траектории частицы с единичным зарядом, определяется следующим выражением:

$$\frac{dn_c}{d\lambda} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2},$$

где $\alpha \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры. Абсолютное значение скорости черенковских фотонов $v_c(\lambda)$ определяется групповой скоростью распространения света соответствующей длины волны в среде (подробнее см. [8] и ссылки в ней). Групповая скорость распространения света в воде и во льду увеличивается с ростом длины волны фотонов, что приводит к размытию светового сигнала черенковского излучения во времени. Рабочим диапазоном длин волн фотонов, детектируемых в глубоководных экспериментах, является интервал от 350 нм до 600 нм. Границы этого интервала обусловлены видом спектра черенковского излучения, диапазоном спектральной чувствительности фотокатодов фотомножителей, величиной окна прозрачности воды и поглощением света стеклянным корпусом фотодетекторов. Черенковское излучение электромагнитных и адронных ливней формируется фотонами, испущенными заряженными частицами ливня (в основном электронами и позитронами) и определяется их пространственным, угловым и временным распределением. Характерное угловое распределение черенковских фотонов, просуммированное по траекториям всех заряженных частиц ливня, представлено на рис. 2 [9].

При моделировании отклика оптического модуля нейтринного телескопа Baikal-GVD на черенковское излучение ливней используется аналитическая аппроксимация продольного распределения заряженных частиц в электромагнитных и адронных ливнях [10]. Методика восстановления параметров ливней рассматривается ниже, после представления опти-

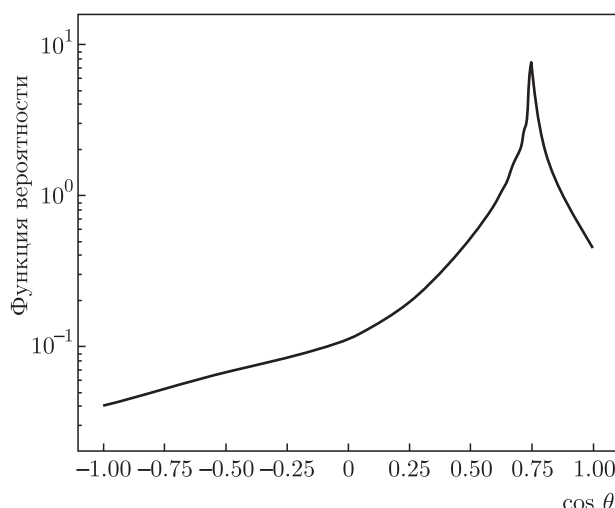


Рис. 2. Суммарное по всем траекториям $e^\pm$ угловое распределение черенковского излучения от электромагнитных ливней высоких энергий

ческих характеристик среды и систем регистрации черенковского излучения.

3. ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБИННЫХ ВОД БАЙКАЛА

Распространение черенковского излучения ливней от источника до фотоприемника обусловлено процессами поглощения и рассеяния света в воде. Тем самым эффективность метода регистрации зависит от гидрооптических свойств среды постановки эксперимента. Основными оптическими параметрами среды, определяющими распространение черенковского излучения мюонов и ливней в естественных средах, являются показатель поглощения, показатель рассеяния и индикатриса рассеяния. Из анализа данных многолетних измерений оптических параметров глубинных вод озера Байкал следует, что длина поглощения L_a — обратная величина показателя поглощения, является достаточно стабильным параметром с характерным значением 20–24 м в окне прозрачности воды ($\lambda = 480$ –500 нм). Сезонные изменения длины поглощения, как правило, не превышают 20 %. В отличие от длины поглощения, длина рассеяния байкальской воды меняется в существенно более широких пределах. При характерных значениях $L_s = 30$ –50 м в окне прозрачности воды в отдельные периоды измерений наблюдались значения длины рассеяния от 15–20 м до 70 м. Индикатриса рассеяния для байкальской воды является

сильно анизотропной функцией, со средним косинусом угла рассеяния порядка 0.9–0.94.

Долговременный мониторинг оптических свойств байкальской воды в районе расположения нейтринного телескопа проводится с помощью специализированного измерительного комплекса Baikal-5D [11]. На рис. 3 приводятся спектральные распределения длины поглощения и рассеяния света на разных глубинах в районе разворачивания нейтринного телескопа Baikal-GVD, измеренные в течение 2020 г.

4. РЕГИСТРАЦИИ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Регистрация черенковского излучения в установке Baikal-GVD осуществляется оптическими модулями. Конструкция оптического модуля Baikal-GVD [12] представлена на рис. 4. В качестве светочувствительного элемента используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) R7081-100 с диаметром фотокатода 10 дюймов. Область спектральной чувствительности фотокатода 300–650 нм, максимальная квантовая эффективность около 35 %. ФЭУ размещается в сферическом стеклянном глубоководном корпусе VITROVEX из боросиликатного стекла диаметром 42 см. Оптический контакт между фотокатодом и стеклянным корпусом обеспечивается при помощи силиконового двухкомпонентного геля SilGel 612A/B. Для уменьшения влияния магнитного поля Земли на работу фотоэлектронного умножителя используется защитный экран (сетка) из отожженного пермаллоя. Блок электроники оптического модуля монтируется непосредственно на цоколь ФЭУ. В состав электроники ОМ входят источник высоковольтного напряжения TRACO POWER PHV12-2.0K2500P, делитель напряжения с сопротивлением 18 МОм, усилитель сигналов ФЭУ, модуль управления (контроллер ОМ) и светодиодная калибровочная система.

Угловая и спектральная чувствительности оптического модуля во многом определяют эффективность регистрации черенковского излучения ливня оптическим модулем детектора. Информация об отклике ОМ на излучение от каскада необходима для вычисления вероятности срабатывания ОМ при восстановлении параметров каскадов. Для измерения угловых характеристик оптических модулей был создан специальный стенд, в состав которого входили поворотный механизм для вращения ОМ, погруженного в бак с водой, и импульсный источник света.

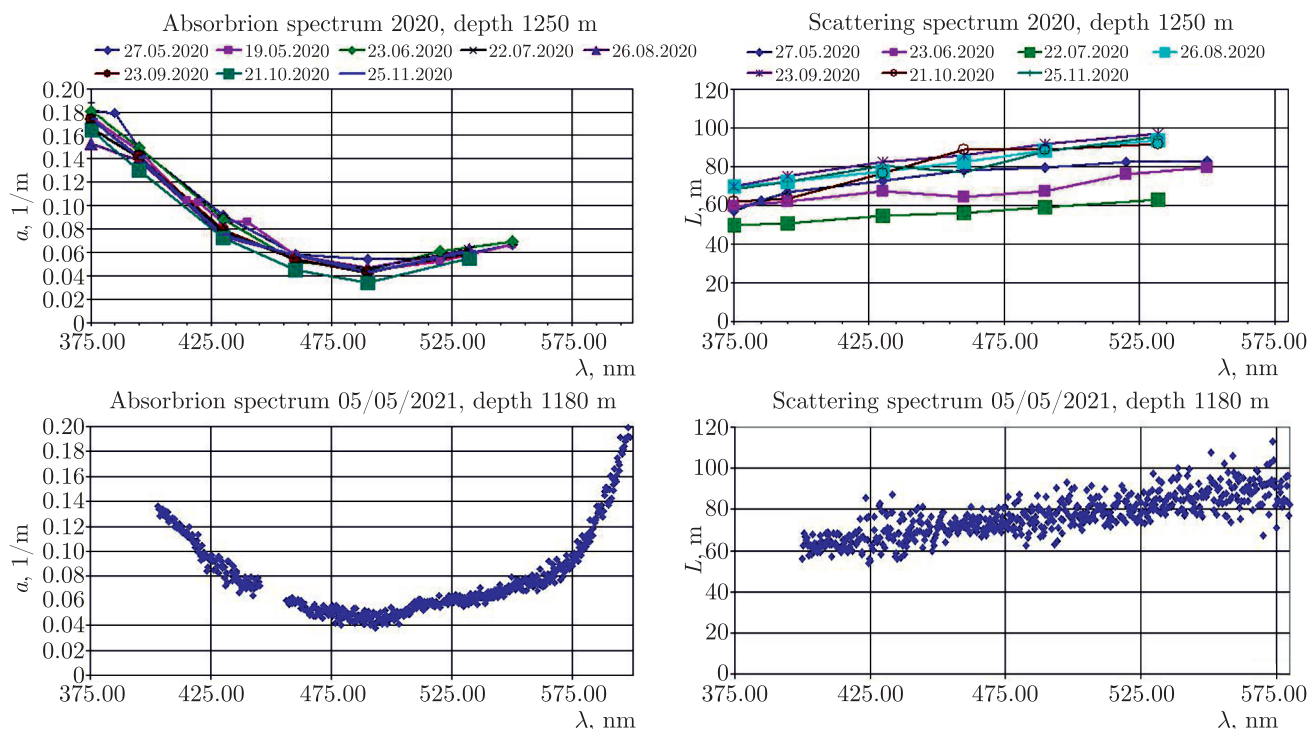


Рис. 3. (В цвете онлайн) Спектральные зависимости длины поглощения света в воде (слева) и длины рассеяния (справа), измеренные в течение 2020 г. прибором BAIKAL-5D на глубине 1180 м и 1250 м

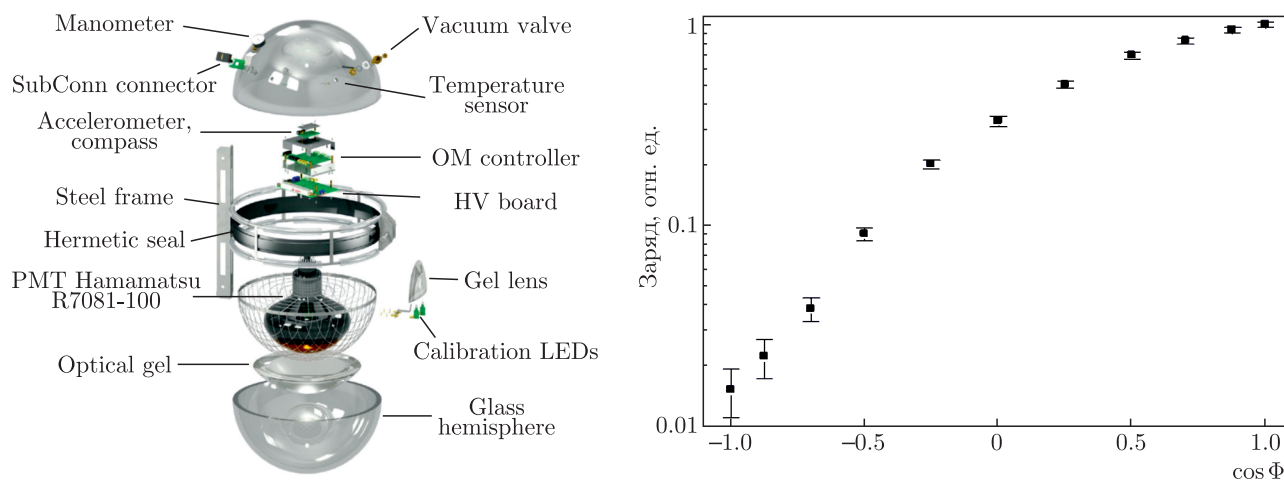


Рис. 4. Слева: Схема конструкции оптического модуля Baikal-GVD. Справа: Угловая зависимость отклика оптического модуля Baikal-GVD

Результаты измерения зависимости отклика ОМ от угла падения света относительно оси ФЭУ представлены на рис. 4 (справа).

Отклик ОМ на черенковское излучение ливней моделировался с учетом угловой и спектральной чувствительности ФЭУ, а также дополнительным ослаблением светового потока в стекле сферическо-

го корпуса ОМ. Методика розыгрыша Монте-Карло в моделировании распространения света в прозрачной среде позволяет получить пространственное, угловое и временное распределения фотонов от ливней, например в приближении точечного источника [13]. На рис. 5 представлены области чувствительности ОМ к черенковскому излучению ливней раз-

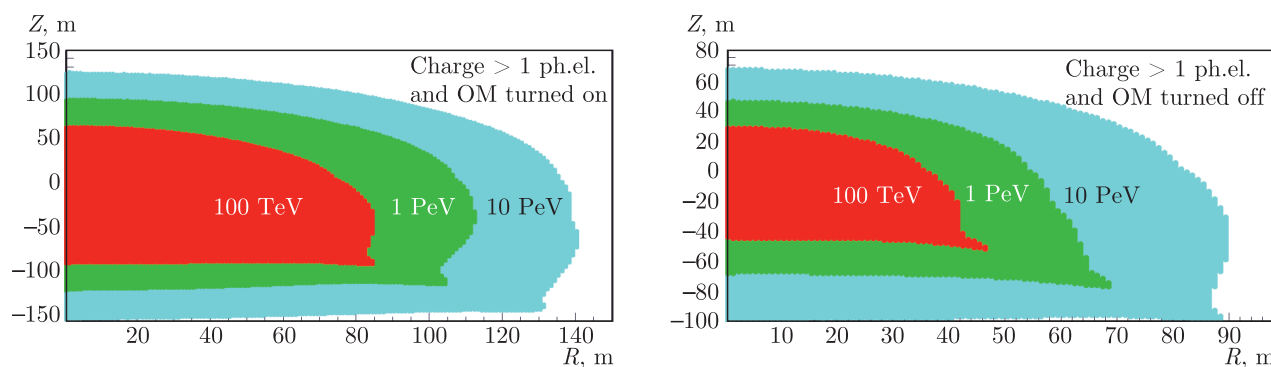


Рис. 5. (В цвете онлайн) Области чувствительности ОМ телескопа Baikal-GVD, ориентированных на каскад (слева) и отвернутых от каскада (справа), к ливням разных энергий

ной энергии (100 ТэВ, 1 ПэВ, 10 ПэВ). Эти области соответствуют средним зарядам $Q > 1$ ф.э. В случае ориентации ОМ на ливень (рис. 5 слева) ливни с энергией 100 ТэВ, 1 ПэВ и 10 ПэВ регистрируются до расстояний соответственно 90 м, 110 м и 130 м от оси ливня. В случае ОМ, отвернутых от ливня (рис. 5 справа), соответствующие расстояния составляют 50 м, 70 м и 90 м. Анализ отклика оптических модулей Baikal-GVD позволил оптимизировать расположение ОМ на гирлянде и в кластере из восьми гирлянд, а также расстояние между кластерами, как показано на рис. 1 справа. Также на схеме показано размещение экспериментальных гирлянд, которые используются для испытания новых узлов детектора перед их включением в рабочую конфигурацию телескопа.

Оптические модули крепятся на несущие конструкции (буйрепы), закрепленные якорями на дне озера, формируя гирлянды. Гирлянды сгруппированы в кластеры. Оптимизация конфигурации кластеров оптических модулей с точки зрения обеспечения максимальной эффективной площади регистрации астрофизических нейтрино была выполнена для длины поглощения байкальской воды 22 м. Оптимизированный кластер включает в свой состав центральную гирлянду и семь гирлянд, равномерно расположенных по окружности радиусом 60 м. Каждая гирлянда состоит из 36 оптических модулей, размещенных с шагом 15 м на глубинах от 750 до 1275 м. Все ОМ ориентированы фотокатодами вниз, что повышает эффективность регистрации событий из нижней полусферы и предотвращает потери излучения из-за накопления слоя осадков в верхней части стеклянного корпуса. В период с 2016 по 2021 гг. в озере Байкал введено в эксплуатацию восемь таких кластеров, содержащих в общей сложности 2304 ОМ.

Развертывание крупномасштабных нейтринных телескопов представляет собой сложную инженерную задачу, решение которой требует разработки специальных методов и применения уникальных технических решений. Методика развертывания телескопа со льда озера Байкал в значительной степени определяет конфигурацию системы регистрации черенковского излучения установки и размещение станций с калибровочными лазерными источниками света, как показано на рис. 1 справа. Калибровка Baikal-GVD описана в работе [14] и заключается в измерении относительных временных задержек сигналов на каналах установки при помощи калибровочных источников света (временная калибровка) и измерении амплитудных калибровочных коэффициентов. Для временной калибровки используются источники света, разработанные на основе светодиодов Kingbright L7113 с длиной волны в максимуме излучения 470 нм и длительностью импульса ~ 5 нс. Интенсивность их излучения регулируется от единиц фотонов до 10^8 на вспышку. Световой импульс формируется в конусе с раствором 15° и может быть зарегистрирован оптическим модулем на расстояниях до 100 м от источника излучения.

5. СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ И СБОРА ДАННЫХ ТЕЛЕСКОПА BAIKAL-GVD

Для реконструкции физических событий помимо калибровочной информации необходимы данные о координатах оптических модулей в момент регистрации событий. Гирлянды с оптическими модулями имеют положительную плавучесть и крепятся якорями ко дну озера. Под воздействием течений они могут отклоняться от вертикали, что приводит к тому, что положение оптических модулей изменяется с течением времени. Для определения коор-

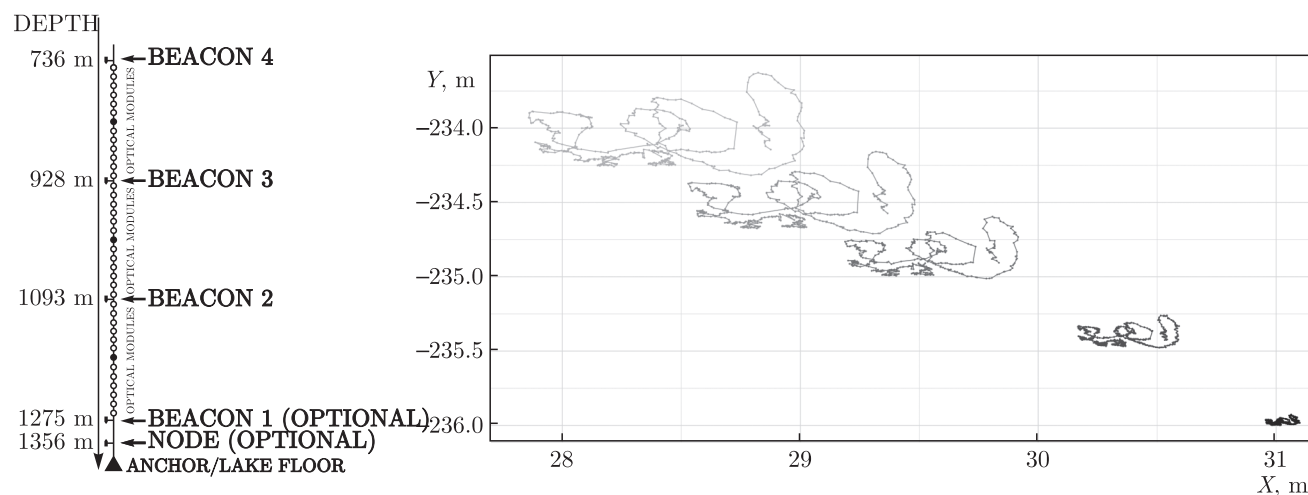


Рис. 6. Положение акустических модемов на гирлянде и пример траекторий их перемещений (измерения с 1 по 5 июля 2019 г.)

динат оптических модулей используется акустическая система позиционирования, состоящая из набора акустических модемов (АМ), оснащенных гидрофонами, излучающими и принимающими сигналы в ультразвуковом диапазоне [15]. На каждой гирлянде размещаются 4 акустических модема: beacon 1, ..., beacon 4 (см. рис. 6), точность измерения координат которых составляет 15–20 см. Интерполяция координат АМ позволяет определить положение оптических модулей, расположенных между ними, с точностью 25–30 см. В правой части рис. 6 показан пример перемещений акустических модемов, расположенных на четырех горизонтах, в течение 5 дней работы установки.

Системы сбора данных (ССД) формируется из электронных модулей управления кластерами, гирляндами и секциями оптических модулей [16]. Модули управления размещаются в таких же глубоководных корпусах, как и ОМ. Секция является базовым структурным блоком ССД, в состав которого входят 12 ОМ, 2 АМ системы позиционирования и модуль управления секцией. Оптические модули и акустические модемы подключаются к центральному электронному модулю, функциями которого являются управление, сбор и первичная обработка данных секции. Схема организации ССД кластера Baikal-GVD и ее характеристики подробно описаны в работе [16]. В настоящее время в качестве триггера кластера используется совпадение сигналов любой пары соседних оптических модулей секций во временном окне 100 нс. Величина триггерных порогов каналов устанавливается на уровне ~ 1.5 ф.э.

и ~ 4 ф.э., что соответствует частоте формирования триггера 30–150 Гц в зависимости от световой активности озера Байкал. Точность измерения времени и заряда импульсов зависит от характеристик используемого аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и способа оценки величины этих параметров. Для 12-разрядного АЦП с частотой дискретизации 200 МГц точность определения времени формирования сигнала составляет около 0.5 нс. Такая точность достигается за счет использования интерполяции формы импульсов, поступающих с ФЭУ. Точность синхронизации каналов кластера при тактовой частоте управляющей электроники секций 200 МГц составляет величину ~ 2 нс.

6. АНАЛИЗ ТРЕКОВЫХ СОБЫТИЙ

Взаимодействия мюонных нейтрино с веществом, проходящие посредством реакции заряженного тока, ведут к образованию мюонов. Мюоны также могут образовываться в результате взаимодействия τ -нейтрино, если распад τ -лептона проходит по лептонной моде. В диапазоне энергий, характерном для событий, регистрируемых установкой Baikal-GVD ($E > 100$ ГэВ), пробег мюона в воде составляет более 200 м, что позволяет наблюдать протяженный треко-подобный след таких событий. Большая длина пробега мюона имеет важное значение как для эффективности регистрации таких событий (например, можно регистрировать мюоны от нейтринных взаимодействий, произошедших далеко за пределами установки), так и для точности восстановления

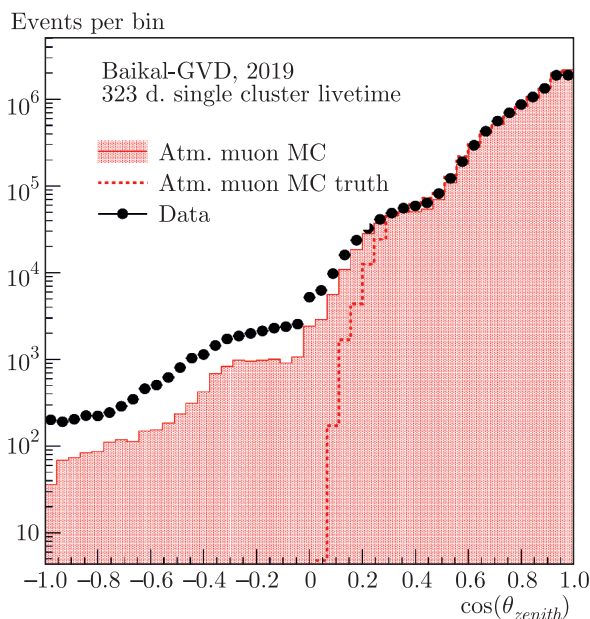


Рис. 7. (В цвете онлайн) Распределение реконструированных треков по зенитному углу (однокластерные события, до отбора по качеству подгонки направления). Данные с Baikal-GVD 2019 г. (5 кластеров, 323 дня живого времени в пересчете на один кластер) показаны черными точками. Распределение реконструированных треков МК-событий показано красной гистограммой. Дополнительно красной пунктирной линией показано распределение разыгранных МК-событий

направления нейтрино (чем длиннее видимая часть трека, тем выше точность). Поэтому в контексте нейтринной астрономии регистрация трековых событий играет особую роль. Помимо нейтрино, детектор Baikal-GVD регистрирует огромное количество трековых событий сверху, связанных с прохождением атмосферных мюонов и мюонных групп через установку.

Для реконструкции трековых событий в Baikal-GVD был разработан специальный алгоритм, в основе которого лежит метод минимизации χ^2 [17]. Алгоритм включает в себя предварительную оценку, где направление движения мюона оценивается с помощью векторной суммы, и основную подгонку направления. В основной подгонке направления минимизируемая функция определена как сумма двух членов: χ^2 временных остатков (разницы между ожидаемым и наблюдаемым временем срабатывания оптического модуля) и дополнительного члена, учитывающего убывание яркости светового потока с увеличением расстояния. Данный алгоритм обеспечивает точность реконструкции направления трека до 0.5° (достигается при длине трека более 400 м).

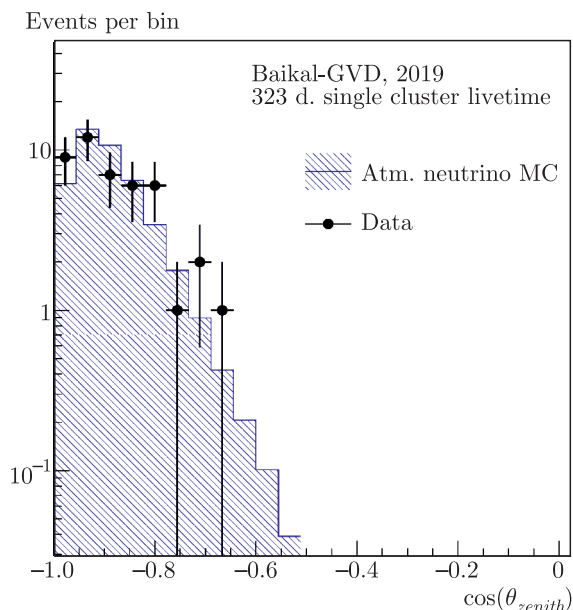


Рис. 8. (В цвете онлайн) Распределение событий по реконструированному зенитному углу после применения критериев отбора, оптимизированных для поиска атмосферных нейтрино. Данные с Baikal-GVD 2019 г. (5 кластеров, 323 дня живого времени в пересчете на один кластер) показаны черными точками. Предсказание МК-моделирования для атмосферных нейтрино показано синей гистограммой

Разработанный алгоритм был применен к комбинированному набору данных, набранных с первых пяти работающих кластеров детектора Baikal-GVD в апреле–июне 2019 г., с общим эквивалентным живым временем 323 дня в пересчете на один кластер. В результате было реконструировано 9.8 миллиона однокластерных событий, в большинстве своем атмосферных мюонов [18]. Зенитное распределение реконструированных событий (без отбора по качеству подгонки направления) приведено на рис. 7. Там же приведено ожидаемое распределение событий от атмосферных мюонов по результатам моделирования методом Монте-Карло (МК). Можно отметить, что в области зенитных углов, где доминируют корректно реконструированные события ($\cos \theta > 0.25$), наблюдается хорошее согласие данных с результатами МК-моделирования. В то же время предсказание для количества мюонов, ошибочно реконструированных как летящие вверх или горизонтально ($\cos \theta < 0.25$), весьма сильно отличается от наблюдаемой величины. Однако, учитывая что этот фон практически полностью устраняется дальнейшим отбором событий, данным несоответствием можно пренебречь.

Для выделения нейтринных событий был разработан относительно несложный набор критериев от-

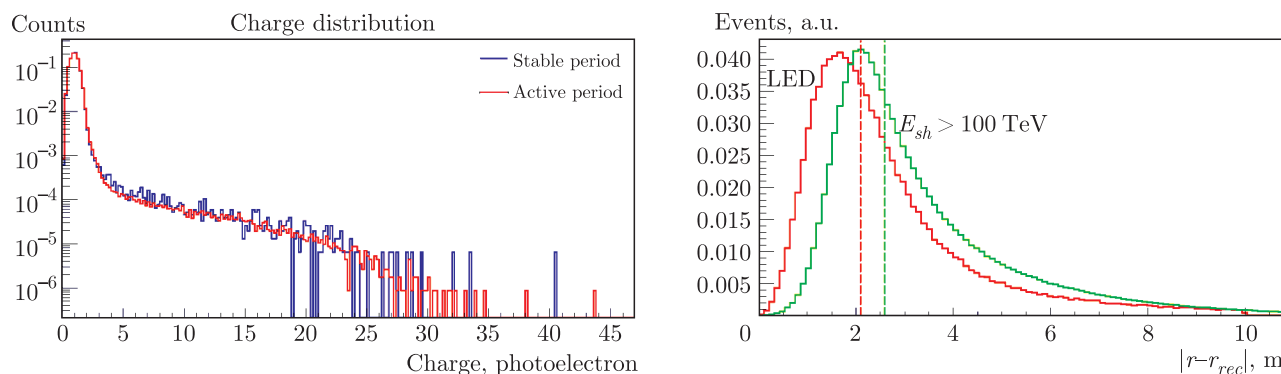


Рис. 9. (В цвете онлайн) Слева: Нормированное зарядовое распределение импульсов одного ОМ в спокойный период (синяя гистограмма) и в период повышенной светимости воды (красная гистограмма). Справа: Распределение расстояния между истинным и восстановленным положениями вершины ливня. Красная гистограмма соответствует восстановлению положения калибровочного источника света. Зеленая гистограмма соответствует распределению, усредненному по пространству и направлениям ливней с энергией выше 100 ТэВ. Вертикальные линии соответствуют медианным значениям распределений

бора, включающий в себя отбор по зенитному углу (используются только события из-под горизонта), качеству подгонки и различным вспомогательным переменным. Критерии отбора были оптимизированы для выделения атмосферных нейтрино. Данный анализ был применен к упомянутому выше набору данных. В результате выделено 44 события, что хорошо согласуется с ожидаемым числом событий от атмосферных нейтрино 43.6 ± 6.6 (стат.) при ожидаемом фоне от атмосферных мюонов ≤ 1 . Распределение выделенных событий по зенитному углу приведено на рис. 8. Данный анализ включает в себя лишь однокластерные события. Анализ мультикластерных событий будет выполнен отдельно.

7. СТРАТЕГИЯ ПОИСКА СОБЫТИЙ ОТ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ТЕЛЕСКОПЕ BAIKAL-GVD

Наиболее значимым и ярким событием для развития нейтринной астрофизики является обнаружение в эксперименте IceCube диффузного потока нейтрино астрофизической природы [4]. Как уже отмечалось ранее, в результате анализа экспериментального набора данных, накопленного за 7.5 года живого времени функционирования телескопа, было выделено 102 события-кандидата на нейтрино астрофизической природы [5]. Из них 75 событий являются каскадами и 27 — треками мюонов. В области энергий выше 60 ТэВ выделено 60 событий. Эти результаты, помимо своей неоспоримой научной ценности, демонстрируют высокую эффективность

регистрации астрофизических нейтрино по каскадной моде. Байкальская коллаборация обладает многолетним опытом исследований природных потоков мюонов и нейтрино по каскадной моде регистрации событий. Результаты поиска сигнала от нейтрино высоких энергий, основанные на анализе данных байкальского нейтринного телескопа первого поколения NT200, приводятся в публикациях [19, 20]. Телескоп Baikal-GVD обладает высокой эффективностью регистрации каскадов в области энергий выше десятков тераэлектронвольт, и каскадная мода регистрации в настоящее время успешно используется в задаче регистрации астрофизических нейтрино.

Поиск нейтрино высоких энергий астрофизической природы по каскадной моде предполагает выделение и восстановление параметров вторичных ливней высоких энергий, возникающих при взаимодействии нейтрино с веществом в чувствительном объеме телескопа. Интенсивность черенковского излучения электромагнитных и адронных ливней пропорциональна их энергии. В случае электромагнитных ливней число черенковских фотонов пропорционально энергии ливня с коэффициентом пропорциональности порядка 10^8 фотонов/ТэВ. Это обстоятельство, наряду с высокой прозрачностью байкальской воды, позволяет вести поиск событий от нейтрино с энергией $E_\nu > 10$ ТэВ в эффективном объеме порядка 0.05 км^3 вокруг каждого кластера телескопа.

Собственное свечение глубинных вод озера является фоном при решении задач по регистрации природных потоков элементарных частиц. Общий темп

счета фоновых импульсов ОМ от свечения воды составляет порядка (20–40) кГц в спокойные периоды и может достигать более 100 кГц из-за погружения слоев воды с повышенной светимостью с поверхности озера на большие глубины. Было установлено, что свечение глубинных вод озера соответствует в основном засветке ОМ на уровне одного фотоэлектрона, а многофотоэлектронные импульсы обусловлены процессами в фотоэлектронном умножителе, стимулированными первичным фоновым импульсом [21]. На рис. 9 (слева) представлены нормированные распределения по заряду импульсов от собственного свечения озера в спокойный и активный периоды свечения. Как видно из рисунка, нормированные зарядовые распределения совпадают. Как будет показано ниже, поиск событий от астрофизических нейтрино с энергией порядка сотни ТэВ и выше предполагает анализ событий с большой множественностью сработавших оптических модулей. В этом случае эффективным методом подавления фоновых событий от собственного свечения глубинных вод озера является ограничение снизу на величину заряда импульсов ФЭУ. Результаты, которые обсуждаются в этой статье, получены с использованием ограничения $Q > 1.5$ ф. э. Такое ограничение позволяет подавить число фоновых импульсов от свечения воды более чем на порядок величины. Для дальнейшего подавления шумовых импульсов используются следующие критерии отбора: в событии должны сработать хотя бы 6 ОМ на трех или более гирляндах; времена импульсов на всех сработавших ОМ должны удовлетворять критерию причинности:

$$t_i - t_j < \frac{d_{ij}}{v} + \delta t,$$

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 обратной скорости света в воде, $\delta t = 20$ нс.

Алгоритм реконструкции параметров ливней основан на анализе времени и заряда импульсов сработавших ОМ с использованием координат ОМ, полученных из анализа данных акустической системой позиционирования [22]. Восстановление параметров ливней осуществляется в два этапа (подробнее см., например, в работах [23, 24]). На первом этапе проводится итерационная процедура восстановления координат ливня r_{sh} в модели точечного источника, с использованием временной информации сработавших каналов телескопа. Точность процедуры восстановления координат ливней иллюстрирует рис. 9 (справа), где представлены распределения рассто-

ятий между разыгранным и восстановленным положениями вершин ливней. Красная кривая соответствует восстановлению положения калибровочной светодиодной матрицы, расположенной на центральной гирлянде первого кластера телескопа и являющейся точечным квазиимпульсным источником света. Медианное значение этого распределения равно 2.1 м. Зеленая гистограмма представляет собой распределение, усредненное по координатам и направлениям ливней с энергией выше 100 ТэВ разыгранным методом Монте-Карло с учетом протяженности ливня в детектирующем объеме кластера. Медианное значение этого распределения равно 2.6 м. В случае протяженного ливня в результате применения данного алгоритма восстанавливается положение максимума ливня, которое отстоит от точки зарождения ливня на расстоянии, пропорциональном логарифму энергии ливня. Это обстоятельство обуславливает относительное смещение красной и зеленой кривых на рис. 9 (справа).

На втором этапе проводится восстановление энергии и направления развития ливня с применением метода максимального правдоподобия и с использованием восстановленных на первом этапе координат ливня. Точность восстановления энергии и направления ливня оценивалась при восстановлении событий из набора данных, разыгранных методом Монте-Карло в детектирующем объеме кластера Baikal-GVD [23]. На рис. 10 (слева) приводится распределение логарифма отношения восстановленной энергии каскада к разыгранной энергии. Точность восстановления энергии существенно зависит от энергии каскада и от его положения и ориентации относительно кластера и составляет (10–30) %. На рис. 10 (справа) приводится распределение угла между разыгранным и восстановленным направлениями развития ливня. Точность восстановления направления ливня также зависит от его энергии, положения и ориентации и составляет 2°–4° (медианное значение).

Основным источником фона в задаче поиска нейтрино высоких энергий по каскадной моде является поток атмосферных мюонов сверху от распада π , K -мезонов, а также других короткоживущих частиц. Фоновые события представляют собой каскады высоких энергий, образующиеся в результате взаимодействия мюона со средой, либо события, содержащие группу мюонов и формирующие отклик телескопа, близкий к отклику на черенковское излучение каскада. Оценка ожидаемого числа фоновых событий была получена из расчета потока атмосферных мюонов на уровне установки и моде-

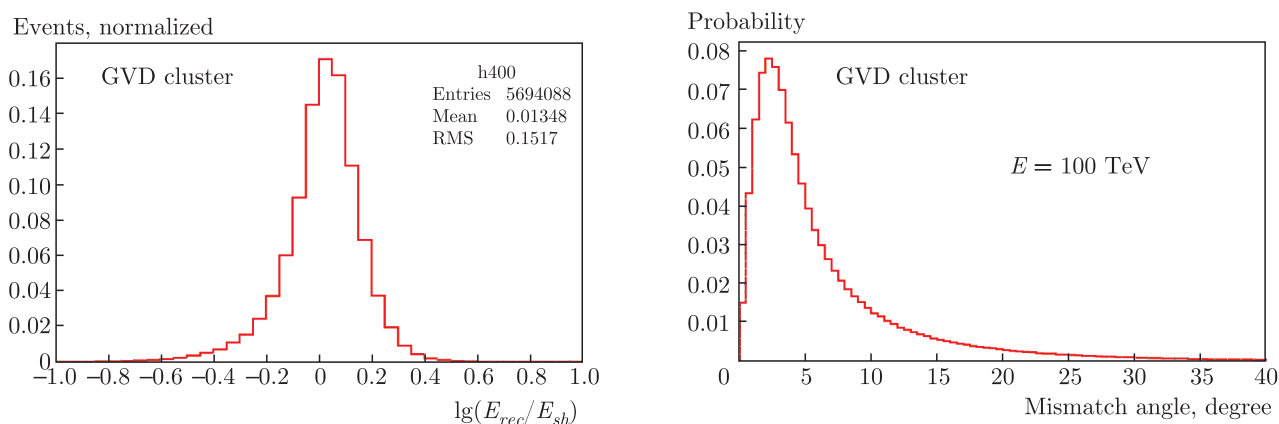


Рис. 10. Слева: Распределение логарифма отношения восстановленной энергии ливня к разыгранному значению. Справа: Распределение угла отклонения восстановленного направления ливня от разыгранного

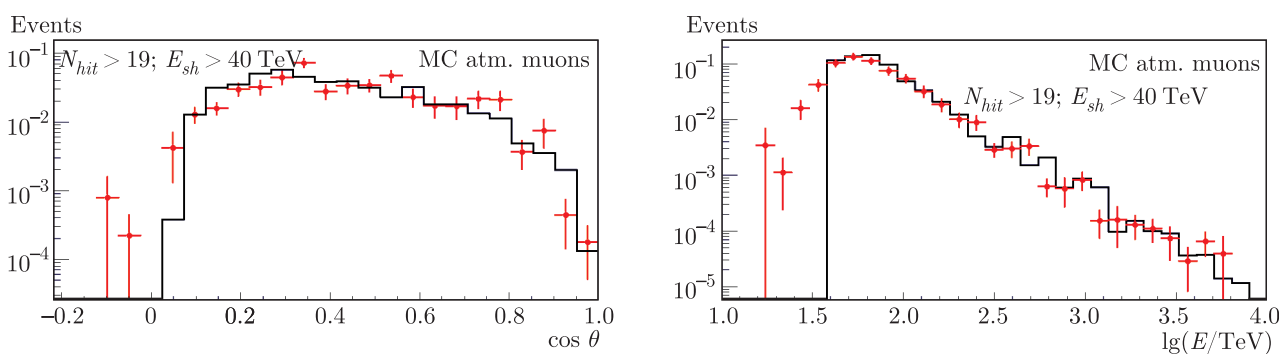


Рис. 11. Слева: Распределения событий по косинусу зенитного угла: данные (крестики), атмосферные мюоны (гистограмма). Справа: Распределение событий по разыгранной и восстановленной энергиям ливней от атмосферных мюонов. Разыгранные события — гистограмма, восстановленные — точки

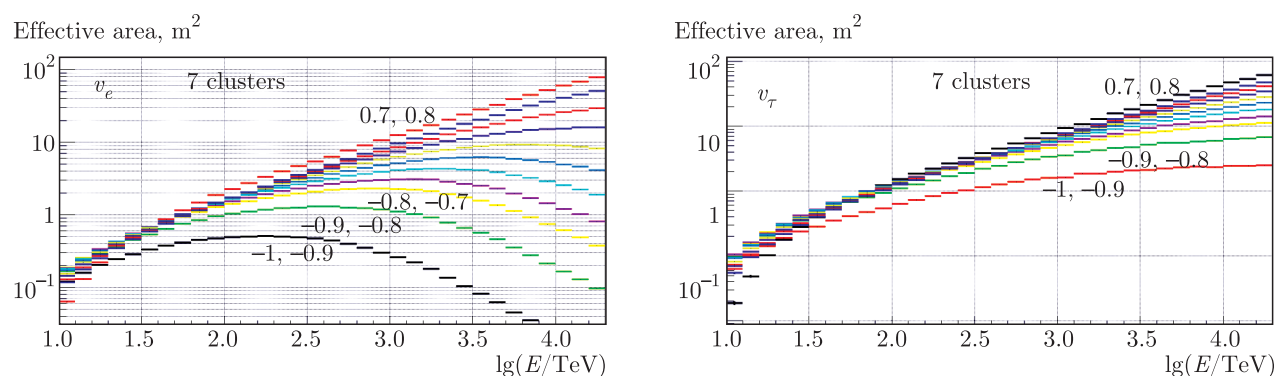


Рис. 12. (В цвете онлайн) Слева: Эффективные площади регистрации нейтрино по каскадной моде для разных значений зенитного угла для электронных нейтрино. При энергиях выше 100 ТэВ существенное уменьшение эффективной площади связано с эффектом поглощения нейтрино в Земле. Справа: Эффективные площади регистрации нейтрино по каскадной моде для разных значений зенитного угла для τ -нейтрино

лирования отклика телескопа на эти мюоны. Расчет потока мюонов на уровне моря от взаимодействия космических лучей в атмосфере Земли проводился по программе CORSIKA7.74 [25] с использованием спектра протонов, предложенного в работе [26]. Розыгрыш первичного взаимодействия протонов в атмосфере Земли проводился по модели SIBYLL 2.3с, с энергией протонов $E_p > 100$ ТэВ [27]. Распространение мюонов в воде до уровня установки моделировалось по программе MUM [28]. Использовалась процедура ускорения моделирования и набора большей статистики. Принимая во внимание, что наименьшая энергия протонов в разыгранных событиях составляет 100 ТэВ, в дальнейшем анализе мы учитывали лишь события с энергией ливня $E_{sh} > 40$ ТэВ. Из результатов моделирования отклика телескопа на поток атмосферных мюонов следует, что каскадоподобные события, сформированные мюонами из группы мюонов имеют малую множественность сработавших каналов и практически полностью подавлены при ограничении множественности $N_{hit} > 19$ ОМ. Подавление каскадных событий от мюонов может быть достигнуто за счет повышения порога по энергии регистрируемых каскадов в связи с тем, что показатель спектра атмосферных мюонов по абсолютной величине примерно на единицу больше аналогичного значения для спектра нейтрино астрофизической природы. Результаты восстановления направления и энергии ливней от атмосферных мюонов при множественности $N_{hit} > 19$ ОМ и энергии ливней $E > 40$ ТэВ приводятся на рис. 11. На левом рисунке представлено распределение по косинусу зенитного угла разыгранных ливней (гистограмма) и распределение, полученное в результате восстановления (точки). В распределении присутствуют события, восстановленные как ливни из-под горизонта с отрицательными значениями косинусов зенитных углов. Эти события являются результатом ошибочного восстановления направлений ливня и являются фоном в задаче поиска нейтрино. Распределения разыгранных (гистограмма) и восстановленных (точки) энергий ливней в событиях, удовлетворяющих критериям отбора, представлены на рис. 11 (справа). Приведенные результаты иллюстрируют достаточно высокую эффективность методов выделения каскадных событий и процедуры восстановления параметров ливней.

Оценка эффективности регистрации нейтринных событий по каскадной моде кластером телескопа Baikal-GVD была получена в результате моделирования прохождения нейтрино через Землю и

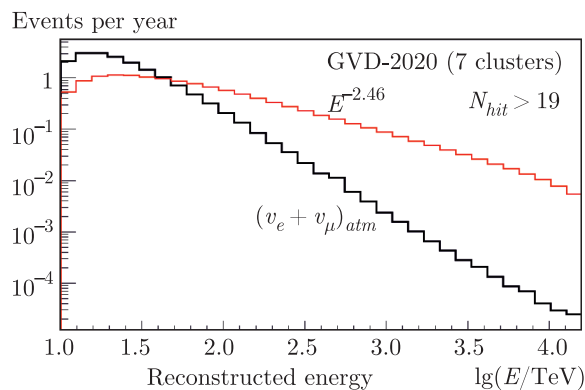


Рис. 13. (В цвете онлайн) Ожидаемое число событий в год от астрофизического диффузного потока нейтрино для семи кластеров (красная гистограмма). Черная гистограмма соответствует ожидаемому числу событий от фонового потока атмосферных нейтрино

взаимодействия в чувствительном объеме установки с использованием нейтринных сечений из работ [29, 30], сечений распада τ -лептона из работы [31] и модели профиля Земли из работы [32]. Моделирование отклика телескопа на черенковское излучение ливней от нейтринных взаимодействий в чувствительном объеме телескопа проводилось с учетом продольного развития ливня, а также поглощения и рассеяния света в воде и с учетом дисперсии скорости света в воде. В результате моделирования процессов распространения нейтрино в Земле и взаимодействия в чувствительном объеме телескопа были рассчитаны эффективные площади регистрации нейтрино по каскадной моде регистрации. На рис. 12 представлены эффективные площади регистрации нейтрино по каскадной моде для конфигурации из 7 кластеров и разных значений зенитного угла для электронных нейтрино (слева) и для тау-нейтрино (справа). В случае электронных нейтрино при энергиях выше 100 ТэВ наблюдается существенное уменьшение эффективной площади, вызванное эффектом поглощения нейтрино в Земле. В случае тау-нейтрино этот эффект менее выражен, так как для тау-нейтрино в СС-взаимодействиях происходит лишь эффективная потеря энергии. Наибольшие значения эффективной площади достигаются в интервале зенитного угла 35° – 45° , что обусловлено конфигурацией установки, в которой все ОМ ориентированы вниз, и угловым распределением излучения фотонов относительно оси ливня.

Полученные значения эффективной площади для разных типов нейтрино были использованы для оценки ожидаемого числа событий от диффузного нейтринного потока астрофизической приро-

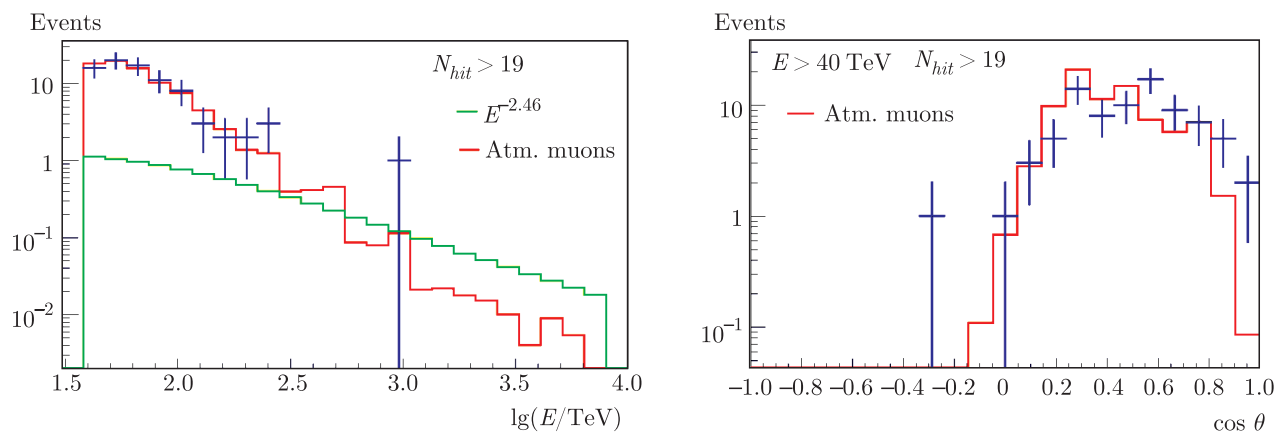


Рис. 14. (В цвете онлайн) Слева: Распределения событий по энергии с $N_{hit} > 19$, где приведены данные (крестики), атмосферные мюоны (красная гистограмма) и астрофизические нейтрино (зеленая гистограмма). Справа: Распределения событий по косинусу зенитного угла: данные (крестики), атмосферные мюоны (гистограмма)

ды, зарегистрированного в эксперименте IceCube. На рис. 13 представлено распределение ожидаемого числа событий в год в конфигурации телескопа из семи кластеров (красная гистограмма) от суммарного потока трех типов нейтрино в предположении их равной доли в потоке со спектром и нормировкой, представленной в работе IceCube [33]: $F = 1.7 \cdot 10^{-10} E^{-2.46} \text{ ТэВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Черная гистограмма на рис. 13 соответствует ожидаемому числу фоновых событий от атмосферных электронных и мюонных нейтрино [34]. В области энергий каскадов выше 100 ТэВ ожидается 0.3–0.5 события в год от астрофизического диффузного потока и примерно 0.08 событий от атмосферных нейтрино.

8. АНАЛИЗ КАСКАДНЫХ СОБЫТИЙ

В период с апреля 2019 г. по февраль 2020 г. нейтринный телескоп Baikal-GVD функционировал в конфигурации из 5 кластеров, а с апреля 2020 г. по февраль 2021 г. телескоп состоял из 7 кластеров. Система синхронизации телескопа, позволяющая объединять данные разных кластеров для реконструкции общих событий, проходила апробацию в течение 2019 г. В данной работе приводятся предварительные результаты анализа данных отдельных кластеров как независимых установок.

В течение 2915 дней эффективного набора данных телескопом Baikal-GVD, в период с апреля 2019 г. по февраль 2021 г., было зарегистрировано $1.5 \cdot 10^{10}$ событий по базовому триггеру телескопа. В результате применения критериев отбора каскад-

ных событий и восстановления параметров ливней было отобрано 72 события с восстановленной энергией $E > 40$ ТэВ и множественностью $N_{hit} > 19$ ОМ, из них 10 событий с $E > 100$ ТэВ. На рис. 14 (слева) приводятся распределения этих событий по восстановленной энергии ливней, а также ожидаемые распределения от атмосферных мюонов (красная гистограмма) и от астрофизического потока, измеренного в эксперименте IceCube со спектром $E^{-2.46}$ (зеленая гистограмма). Следует отметить, что в этом наборе данных присутствует событие с энергией порядка 1 ПэВ. Это первое событие с энергией такого масштаба, выделенное из набора данных телескопа Baikal-GVD.

Распределение отобранных экспериментальных событий по косинусу зенитного угла направления ливня (точки), а также ожидаемое распределение событий от атмосферных мюонов (красная гистограмма) представлено на рис. 14 (справа). В наборе экспериментальных данных присутствует одно событие с зенитным углом $\theta = 109^\circ$ и энергией каскада $E_{sh} = 91$ ТэВ, являющееся надежным кандидатом на событие от нейтрино из-под горизонта.

Число выделенных экспериментальных событий и их пространственно-угловое распределение и распределение по энергии согласуются с ожидаемыми от потока атмосферных мюонов. Для дальнейшего подавления фона от атмосферных мюонов в задаче регистрации нейтрино астрофизической природы были разработаны дополнительные критерии отбора событий, основанные на анализе временного распределения сигналов на каждом ОМ и их классификации с точки зрения принадлежности к электро-

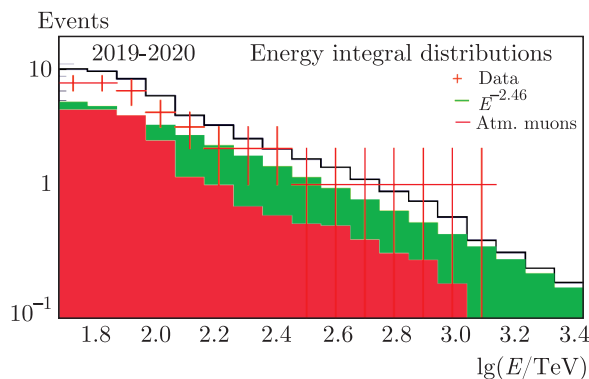


Рис. 15. (В цвете онлайн) Интегральные распределения выделенных событий по энергии (крестики) и ожидаемых событий от атмосферных мюонов (коричневая гистограмма) и от диффузного потока астрофизических нейтрино (зеленая гистограмма)

магнитному сопровождению атмосферных мюонов [24]. Дополнительные критерии отбора выбраны таким образом, что в результате их применения выделяется набор событий, в котором ожидается равная доля событий от нейтрино астрофизической природы и фоновых событий от атмосферных мюонов. В результате применения дополнительных критериев отбора было выделено семь событий-кандидатов от нейтрино астрофизической природы с энергией выше 60 ТэВ и множественностью сработавших каналов $N_{hit} > 19$ ОМ. Интегральное распределение этих событий приводится на рис. 15 (крестики). На том же рисунке приводятся ожидаемые распределения от атмосферных мюонов (коричневая гистограмма) и от потока астрофизических нейтрино со спектром $E^{-2.46}$ и нормировкой IceCube (зеленая гистограмма).

В результате применения дополнительных критериев подавления фоновых событий к набору данных 2018 г., соответствующему 690 дням эквивалентного набора данных одним кластером телескопа, с энергией выше 100 ТэВ, было выделено дополнительно 3 события. Таким образом, число кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы составило 10 событий. Напомним, что в этом наборе данных число фоновых событий от атмосферных мюонов ожидается на уровне 50 %. Оценка энергии ливня, сферические координаты в горизонтальной и экваториальной системах координат, а также расстояние от вертикальной оси кластера до вершины ливня десяти выделенных событий приведены в табл. 1. В табл. 2 приводятся интервалы значений угла между истинным и восстановленным направлениями ливней, соответствующие вероятно-

сти регистрации 50 %, 68 %, 90 % и 95 %. Медианное значение точности восстановления направления варьируется от 1.8° до 3.5° .

На рис. 16 приведена карта распределения γ -источников на небесной сфере и расположение 10 нейтринных кандидатов Baikal-GVD. Окружности вокруг событий соответствуют вероятности регистрации 68 % и 95 % для каждого события. Координатная сетка на рисунке соответствует экваториальной системе координат.

9. ПОИСК ИСТОЧНИКОВ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ НЕЙТРИНО ПО ПРОГРАММЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время в астрофизике высоких энергий успешно развивается новый подход к исследованию астрофизических объектов в решении проблемы идентификации природных источников нейтрино. В рамках международной программы мультимессенджер реализуется поиск коррелированных по направлению и по времени событий на нескольких установках в пределах заданного временного окна, регистрирующих сигнал на разных длинах волн и в разных диапазонах энергий. Такой метод позволяет значительно снизить требования к уровню фона и тем самым повысить эффективность регистрации телескопа. Оповещение о сигнале (алерте) анализируется в реальном времени или в режиме быстрого алгоритма вычисления направления и энергии события. С декабря 2018 г. Baikal-GVD проводит анализ оповещений, формируемых автоматизированной системой TAToO нейтринного телескопа ANTARES [35]. В общей сложности было принято и проанализировано 48 оповещений. В настоящее время в рамках объединенных рабочих групп двух коллабораций проводится дополнительный совместный анализ трех оповещений от ANTARES, выделенных из-за совпадения с ними событий в реконструкции ливней на Baikal-GVD в пределах конуса 5° и временного окна ± 1 день [36]. Как обсуждалось выше, величина угла 5° соответствует медианному значению в распределении точности восстановления направлений ливней. В трековой моде реконструкции событий по критериям отбора восходящих направлений, как кандидатов на нейтрино (см. раздел о мюонных треках), в направлении алертов совпадений не выявлено. На рис. 17 (слева) показаны траектории видимости трех выделенных алертов от ANTARES в течение суток в соответствии с географическими координатами телескопа Baikal-GVD. Положения алер-

Таблица 1. Характеристики десяти событий-кандидатов на события от астрофизических нейтрино: восстановленная энергия каскада, зенитный и азимутальный углы в локальной системе телескопа, расстояние от вертикальной оси кластера до вершины ливня, координаты источника нейтрино в экваториальных координатах

	E , ТэВ	θ , град	φ , град	ρ , м	R.A.	Dec.
GVD2018_1_354_N	105	37	331	71	118.2	72.5
GVD2018_1_383_N	115	73	112	89	35.4	1.1
GVD2018_1_656_N	398	64	347	101	55.6	62.4
GVD2019_1_114_N	91	109	92	49	45.1	-16.7
GVD2019_2_112_N	1200	61	329	96	217.7	57.6
GVD2019_2_153_N	129	50	321	52	33.7	61.4
GVD2019_3_663_N	83	50	276	73	163.6	34.2
GVD2020_3_175_N	110	71	185	84	295.3	-18.9
GVD2020_3_332_N	74	92	9	19	223.0	35.4
GVD2020_6_399_N	246	57	49	80	131.9	50.2

Таблица 2. Интервалы значений угла между истинным и восстановленным направлениями ливней, соответствующие вероятности регистрации 50 %, 68 %, 90 % и 95 %

	$< \Psi_{50\%}$, град	$< \Psi_{68\%}$, град	$< \Psi_{90\%}$, град	$< \Psi_{95\%}$, град
GVD2018_1_354_N	2.3	2.9	4.5	5.1
GVD2018_1_383_N	2.5	3.1	4.5	5.6
GVD2018_1_656_N	3.3	4.2	6.9	7.6
GVD2019_1_114_N	2.2	3.1	4.5	5.0
GVD2019_2_112_N	2.0	2.4	3.0	3.4
GVD2019_2_153_N	3.5	4.0	5.5	5.9
GVD2019_3_663_N	2.1	2.4	3.3	4.0
GVD2020_3_175_N	2.0	2.9	7.9	9.3
GVD2020_3_332_N	1.8	2.9	5.1	6.5
GVD2020_6_399_N	1.6	2.3	3.6	4.4

тов отмечены цветными крестиками: выше линии горизонта (зеленый), ниже (синий) и вблизи горизонта (черный). Аналогичные суточные траектории наблюдения и фиксированные координаты оповещений от телескопа IceCube (категории “astrotrack”), полученные по каналу GCN [37], показаны на рис. 17 (справа). Алерты от IceCube отслеживаются и анализируются на Baikal-GVD с сентября 2020 г. в режиме квазионлайн [38]. Как иллюстрируют эти гра-

фики, для Baikal-GVD источники относятся к Северной небесной полусфере и в режиме онлайн наиболее эффективна реконструкция нисходящих ливней [38, 39].

В результате обработки оповещений от детектора IceCube были определены уровни фоновых событий в каждом направлении алерта и во временном окне ± 12 ч, как показано на рис. 18 (слева). Полученные ограничения на 90-процентном довери-

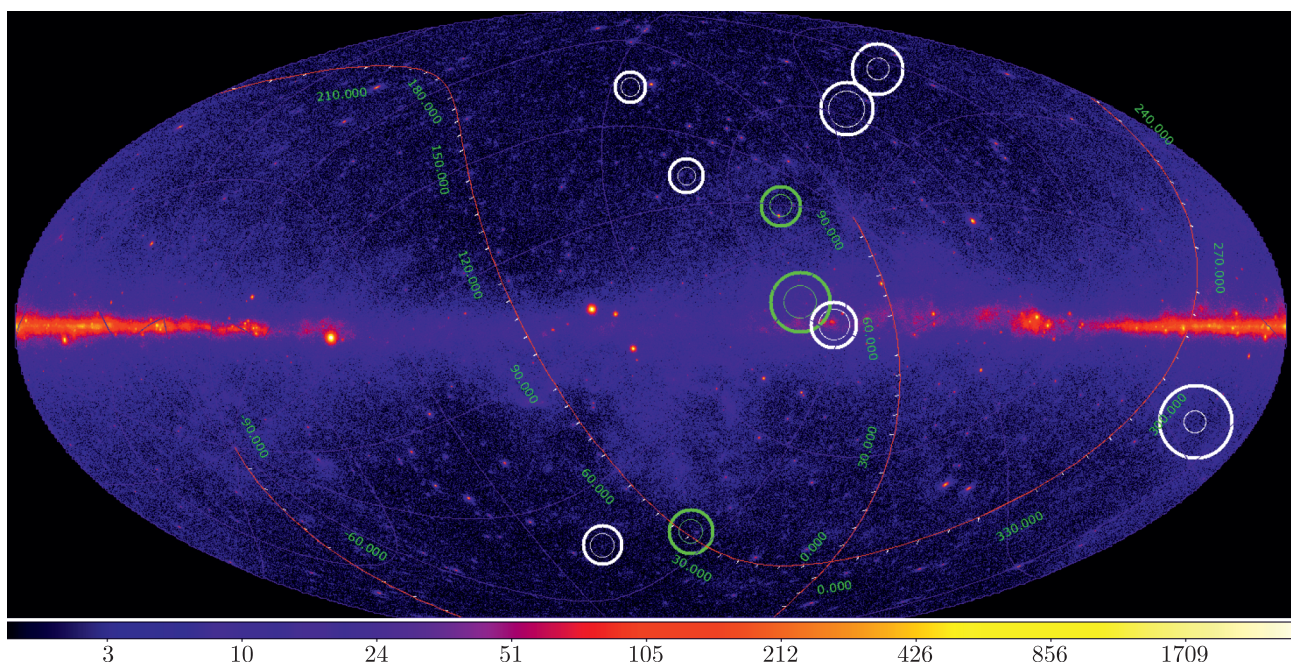


Рис. 16. Положение гамма-источников и первых десяти кандидатов на астрофизические нейтринные события Baikal-GVD на небесной сфере. Координатная сетка на рисунке соответствует экваториальной системе координат. Внутренняя и внешняя окружности вокруг событий соответствуют вероятности регистрации 68 % и 95 %

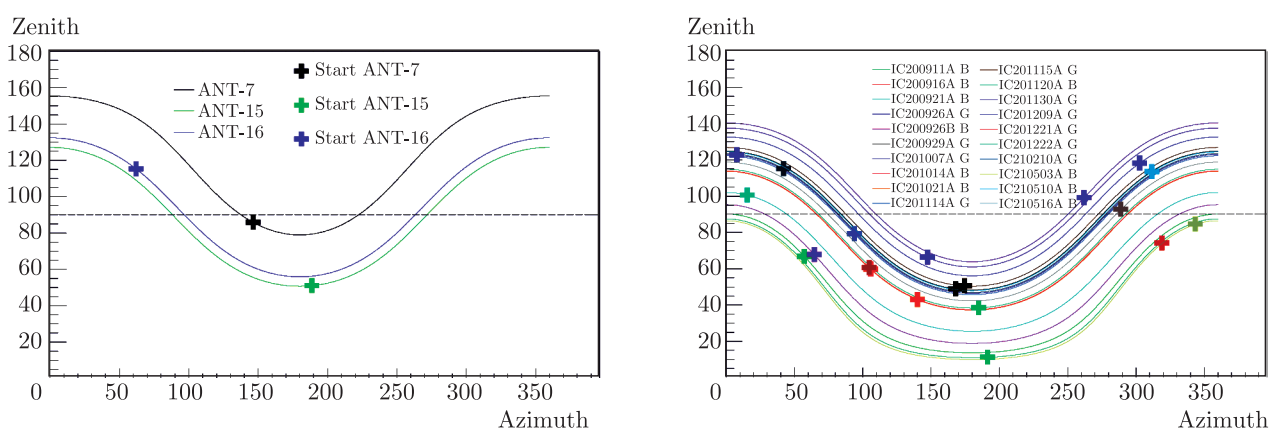


Рис. 17. (В цвете онлайн) Суточные траектории фиксированных экваториальных направлений алертов от двух нейтринных телескопов ANTARES и IceCube в горизонтальных координатах телескопа Baikal-GVD. Слева: три выделенных алерта 2019 г. от ANTARES. Справа: алерты от IceCube двух категорий G ("gold") и B ("bronze"), отслеживаемые на Baikal-GVD осенью 2020 г.

тельном уровне (д.у.) на поток нейтрино на уровне $1.5\text{--}2.5\text{ ГэВ/см}^2$ в диапазоне энергий $1\text{ ТэВ--}10\text{ ПэВ}$ представлены на правом графике рис. 18. Расчеты были проведены в предположении спектра нейтрино E^{-2} и равной доли всех типов нейтрино.

В настоящее время в эксперименте Baikal-GVD формирование собственных алертов в реальном времени от ливней с энергией выше 60 ТэВ и мюонов, регистрируемых из нижней полусферы, реализова-

но на уровне внутренних оповещений о событии в режиме 12-часового набора данных и их передачи по интернету в хранилище данных на сервер вычислительного центра в Дубне ОИЯИ (подробнее см. [40]). Ведется работа по сокращению времени сбора и обработки данных от нескольких часов до нескольких минут от момента регистрации данных до реконструкции событий на базе пофайлового (10-минутного) набора данных [40, 41].

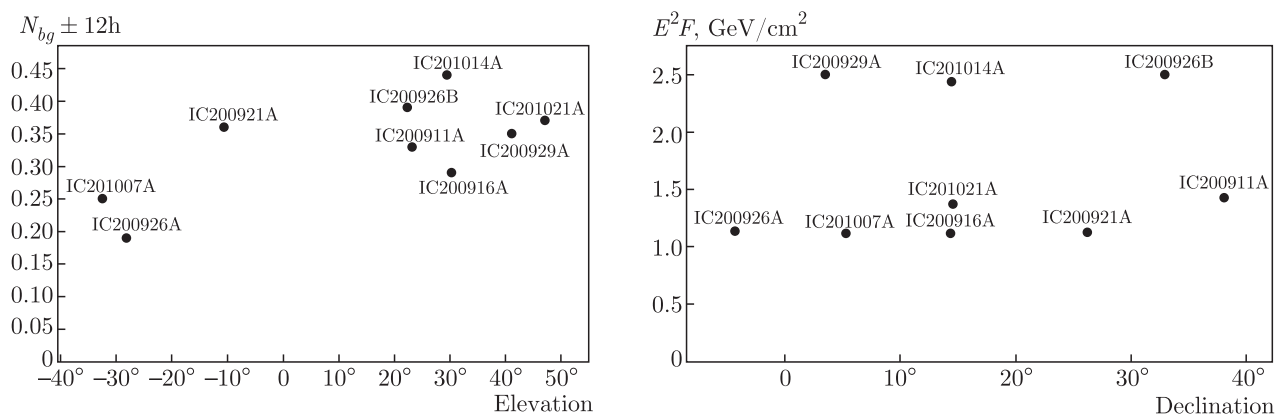


Рис. 18. Уровень фоновых событий во временном окне ± 12 часов в направлении алертов от IceCube в зависимости от их положения над горизонтом для Baikal-GVD (слева) и полученные на Baikal-GVD ограничения на 90 % д.у. на поток нейтрино, коррелирующих с оповещениями IceCube (справа)

Подтвержденными источниками в наблюдении мультиволновых сигналов являются магнетары, представляющие собой нейтронные звезды, подпитываемые диссипацией энергии магнитного поля звезды. Часто они обнаруживаются как источники повторяющегося мягкого гамма-излучения (SGRS). В апреле 2020 г. эксперимент INTEGRAL обнаружил новый период активности объекта SGR 1935+2154 [42], зарегистрировав десятки всплесков за короткий промежуток времени 27–28 апреля 2020 г., впервые подтвердив связь между быстрыми радиовсплесками (FRB) и источником всплесков высокой энергии. Магнетар SGR 1935+2154 лежит в плоскости Галактики (долгота 57.25° , широта $+0.82$) и может быть связан с остатком сверхновой G57.2+0.8 на расстояниях менее 12.5 кпк. В эксперименте Baikal-GVD оповещения от INTEGRAL были отслежены и данные анализировались в направлении остатка сверхновой G57.2+0.8. Наш метод поиска был близок к методу отслеживания предупреждений о нейтрино. С данными за первые 100 дней после оповещения от INTEGRAL мы проанализировали каскады, распределенные по кластерам в нескольких конусах: менее 20, 15, 10 и 5 град, и два уровня критериев отбора событий [24]. В результате было выделено два ливня в 5 град вокруг источника, удовлетворяющих всем условиям отбора. Ожидаемый фон был оценен как 0.35 из анализа реальной выборки данных сезона 2016 и 2018 гг. Оценка вероятности фонового происхождения двух выделенных событий соответствует 4.9 %. По направлению магнетара был получен верхний предел для потока нейтрино со спектром E^{-2} и с равной долей всех типов нейтрино на уровне $2.0 \text{ ГэВ} \cdot \text{см}^{-2}$ [38].

В соответствии с оценками ряда теоретических моделей предсказываются наблюдения сигналов класса мультимессенджер с потоком нейтрино по направлению всплеск с соответствующим радиоизлучением. Хорошо известен нейтринный алерт IC170922A с энергией выше 300 ТэВ, зарегистрированный телескопом IceCube в направлении блазара TXS 0506+05 в период его активности в 2017 г. [43]. Это было первое нейтринное оповещение с подтверждением в мультиволновых наблюдениях [44] и оно остается пока единственным. Недавние оценки потоков нейтрино от радиоактивных блазаров в классе активных ядер Галактик показывают, что их доля не превышает 30 % в диффузном потоке нейтрино [45, 46]. Совместный анализ первых нейтринных алертов телескопа Baikal-GVD с энергией выше 60 ТэВ (см. табл. 1) с данными наблюдений активных галактических ядер 600-метрового радиотелескопа ПАТАН [47] и 40-метрового телескопа радиообсерватории долины Оуэнс (OVRO) [48] представлен в работе [24]. В качестве примера на рис. 19 показаны кривые блеска радиоисточников по данным ПАТАН и данным OVRO, ближайших к положению нейтринных алертов Baikal-GVD (менее 1.5°), и время алертов (синяя линия). Оба нейтринных события попадают на возрастающую часть кривых блеска радиоисточников. Для других алертов эта тенденция также отмечается в [24].

Предварительный анализ идентификации источников вблизи всех направлений астрофизических событий Baikal-GVD (см. табл. 1) был также представлен в работе [24]. На рис. 20 для двух близких по угловому расстоянию (10°) алертов GVD2018_1_656_N (398 ТэВ) и GVD2019_2_153_N (129 ТэВ) показаны их об-

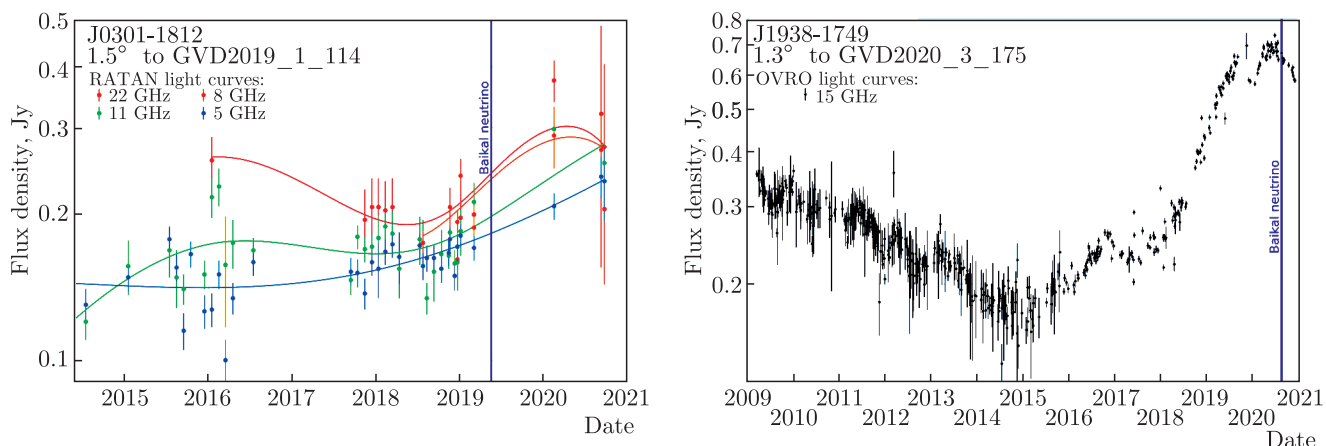


Рис. 19. (В цвете онлайн) Кривые блеска (плотность потока в Ян) радиоисточников, ближайших по координатам к нейтринным алертам Baikal-GVD, по данным радиотелескопов и время алерта (синяя линия). Слева: алерт GVD2019_1_114_N и данные PATAN по источнику J0301-1812 на частотах 22 ГГц, 11 ГГц, 8 ГГц и 5 ГГц. Справа: алерт GVD2020_3_175_N и данные обсерватории OVRO по радиоисточнику J1938-1749 на частоте 15 ГГц

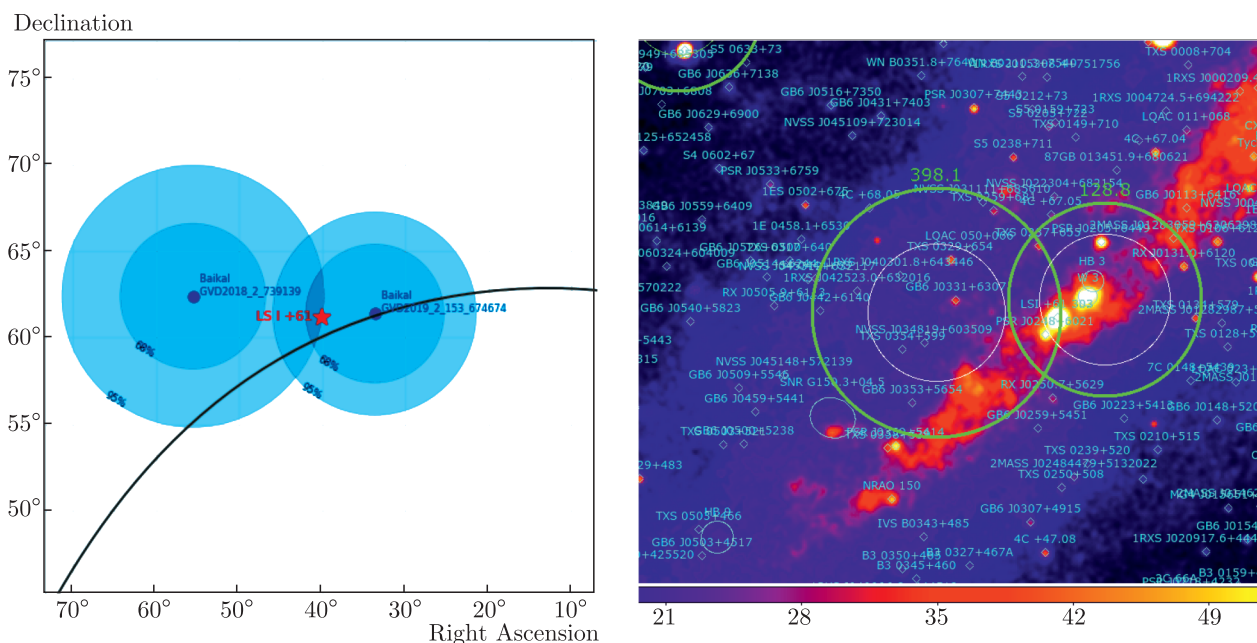


Рис. 20. Слева: Положение двух нейтринных алертов GVD2018_1_656_N и GVD2019_2_153_N в экваториальной системе координат и их области видимости объектов в окружностях 68 % и 95 %. Красной звездочкой отмечены координаты микроквара LSI+63 303. Справа: Карта неба источников гамма-излучения по каталогу Fermi FGL4 и окружности 68 % и 95 % вокруг восстановленных позиций алертов

ласти 95 % и 68 % восстановления сигнального направления. Видно, что в область пересечения кругов 95 % попадает весьма интересный объект: микрокварз LSI+61 303, представляющий собой двойную систему с массивной звездой и компакт-

ным объектом и известный как яркий источник в диапазоне от радио- и до гамма-излучения в области высоких энергий (свыше тераэлектрон-вольт). Орбитальный период бинарных объектов системы LSI+61 303 измерен (26.496 дней) и, более

того, в работе [49] предсказан суперорбитальный период (1667 дней) в адронной модели генерации потока нейтрино. На сегодняшний день известно о существовании лишь четырех подобных бинарных систем в нашей Галактике.

В заключение этого раздела отметим, что при анализе данных Baikal-GVD особое внимание было уделено поиску нейтринных сигналов, ассоциированных с классом объектов, известных как оптические транзиенты, с происходящими в них катастрофическими гравитационными явлениями (слияние черных дыр, черной дыры и компактного объекта, взрыв сверхновой и другие), в результате которых возможно образование струй релятивистских частиц в сторону наблюдателя. В известном мультиволновом событии GW170817A на Baikal-GVD (в конфигурации двух кластеров 2017 г.) были получены ограничения сверху на 90-процентном доверительном уровне на поток нейтрино от источника гравитационной волны в двух режимах наблюдения [50]: прямом (± 500 с) и после вспышки в течение 14 суток, для спектра нейтрино E^{-2} в интервале энергий от 10^3 ГэВ до 10^8 ГэВ. Первые результаты получены по транзиенту AT2019dsg, обнаруженному оптическим телескопом Цвики (ZTF, Zwicky Transient Facility) 4 апреля 2019 г. [51], с оценкой значимости выделенных ливней на уровне двух сигма [39].

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью проекта Baikal-GVD является создание глубоководного черенковского детектора объемом порядка кубического километра на озере Байкал. В настоящее время глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD является крупнейшим телескопом Северного полушария, в составе действующих 8 кластеров с суммарным эффективным объемом 0.4 км^3 для регистрации ливней от астрофизических нейтрино с энергией выше 100 ТэВ. Успешное развертывание телескопа обеспечивается за счет оптимальной адаптации конфигурации телескопа и методики монтажа установки к специфике проведения работ на озере Байкал. Модульная структура телескопа позволяет вести исследования природных потоков мюонов и нейтрино уже на ранних этапах его развертывания. В результате анализа данных пяти кластеров телескопа, накопленных в период с апреля по май 2019 г., выделено 44 нейтринных события из-под горизонта, что находится в хорошем согласии с ожидаемым числом событий от потока атмосферных нейтрино. В задаче поиска каскадов

высоких энергий результатом анализа данных за 2018–2020 гг. является выделение 10 событий — первых кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы. Поиск нейтринного сигнала в данных Baikal-GVD, ассоциированного с гравитационной волной GW170817, явился началом работ на Байкальском телескопе в рамках международной программы многоканальных исследований объектов и процессов во Вселенной. Поиск нейтринных событий, совпадающих с событиями нейтринных телескопов ANTARES и IceCube, ведется с 2019 г. Первые физические результаты Baikal-GVD демонстрируют высокий потенциал телескопа в решении задач по идентификации источников нейтрино высоких энергий и процессов их генерации. В течение ближайших трех–четырёх лет планируется удвоить эффективный объем Байкальского нейтринного телескопа.

Благодарности. Авторы искренне благодарны Ю. Ковалеву, А. Неронову, А. Плавину, Д. Семикозу и С. Троицкому за плодотворное сотрудничество.

Финансирование. Выполнение работ поддержано Министерством образования и науки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука» (грант № 075-15-2020-778).

Authors and Affiliations

А. В. Аврорин¹, А. Д. Аврорин¹,
В. М. Айнутдинов¹, В. А. Аллахвердян²,
П. Банаш³, З. Бардачова⁴, И. А. Белолаптиков²,
И. В. Борина², В. Б. Бруданин², Н. М. Буднев⁵,
А. Р. Гафаров⁵, К. В. Голубков¹, Н. С. Горшков²,
Т. И. Грес⁵, Р. Дворничи^{2,4},
Ж.-А. М. Джилкибаев¹, В. Я. Дик²,
Г. В. Домогацкий¹, А. А. Дорошенко¹,
А. Н. Дячок⁵, Т. В. Елжов², Д. Н. Заборов¹,
М. С. Катулин², К. Г. Кебкал³, О. Г. Кебкал³,
В. А. Кожин⁶, М. М. Колбин², К. В. Конищев²,
К. А. Копански⁷, А. В. Коробченко²,
А. П. Кошечкин¹, М. В. Круглов², М. К. Крюков¹,
В. Ф. Кулепов⁸, П. Малецки⁷, Ю. М. Малышкин²,
М. Б. Миленин¹, Р. Р. Миргазов⁵, В. Назари²,
Д. В. Наумов², В. Нога⁷, Д. П. Петухов¹,
Е. Н. Плисковский², М. И. Розанов⁹, В. Д. Рушай²,
Е. В. Рябов⁵, Г. Б. Сафронов¹, А. Э. Сиренко²,
А. В. Скурихин⁶, А. Г. Соловьев²,
М. Н. Сороковиков², А. П. Стромаков¹,
О. В. Суворова¹, Е. О. Сушенок²,
В. А. Таболенко⁵, Б. А. Таращанский⁵, Л. Файт¹⁰,

С. В. Фиалковский⁸, Е. В. Храмов²,
Б. А. Шайбонов², М. Д. Шелепов¹,
Ф. Шимковиц^{2,4,10}, И. Штекл¹⁰, Э. Эцкерова⁴,
Ю. В. Яблокова², С. А. Яковлев³

¹Институт ядерных исследований
Российской академии наук
117312, Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований
141980, Дубна, Московская обл., Россия

³EvoLogics GmbH
13355, Берлин, Германия

⁴Comenius University
81499, Братислава, Словакия

⁵Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, Россия

⁶Научно-исследовательский институт ядерной
физики им. Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Россия

⁷The Institute of Nuclear Physics of the Polish
Academy of Sciences (IFJ PAN) in Krakow
60179, Краков, Польша

⁸Нижегородский государственный технический
университет
603950, Нижний Новгород, Россия

⁹Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет
190008, Санкт-Петербург, Россия

¹⁰Czech Technical University in Prague
16000, Прага, Чешская Республика

ЛИТЕРАТУРА

1. M. A. Markov, *Proc. 10th ICHEP*, 572 (1960).
2. V. A. Balkanov et al., *Proc. 25th Int. Cos. Ray Conf.* **7**, 21 (1997).
3. M. G. Aartsen et al., *JINST* **12**, 03012 (2017).
4. M. G. Aartsen et al., *Science* **342**, 1242856 (2013).
5. I. Taboada, *XXVIII Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics*, Heidelberg (2018).
6. M. Ageron et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **656**, 11 (2011).
7. S. Adrian-Martinez et al., *J. Phys. G* **43**, 084001 (2016).
8. Ж.-А. М. Джилкибаев, Г. В. Домогацкий, О. В. Суворова, *УФН* **185**, 531 (2015).
9. A. Belyaev, I. Ivanenko, and V. Makarov, *Proc. DUMAND Summer Workshop*, 1979, ed. by A. Roberts **1**, 337 (1979).
10. С. З. Беленький, *Лавинные процессы в космических лучах*, Гостехиздат, Москва (1948).
11. E. V. Ryabov and B. A. Tarashansky, *PoS ICRC2021*, 1034 (2021).
12. A. D. Avrorin et al., *EPJ Web of Conf.* **116**, 01003 (2016).
13. Ж.-А.М. Джилкибаев, Дисс... докт. физ.-матем. наук, ИЯИ РАН, Москва (2005).
14. A. D. Avrorin et al., *Inst. Exp. Tech.* **63**, 551 (2020).
15. A. D. Avrorin et al., *PoS ICRC2019*, 1012 (2019).
16. A. D. Avrorin et al., *EPJ Web of Conf.* **116**, 5004 (2016).
17. V. A. Allakhverdyan et al., *PoS ICRC2021*, 1080 (2021).
18. A. D. Avrorin et al., *Phys. Atom. Nucl.* **84**, 513 (2021).
19. V. M. Aynutdinov et al., *Astropart. Phys.* **25**, 140 (2006).
20. A. V. Avrorin et al., *Astron. Lett.* **35**, 65 (2009).
21. V. A. Allakhverdyan et al., *PoS ICRC2021*, 1113 (2021).
22. V. A. Allakhverdyan et al., *PoS ICRC2021*, 1083 (2021).
23. A. D. Avrorin et al., *PoS ICRC2017*, 96 (2017).
24. V. A. Allakhverdyan et al., *PoS ICRC2021*, 1144 (2021).
25. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, *Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA-6019* (1998).
26. T. K. Gaisser et al., arXiv:1303.3565v1.
27. F. Riehn et al., arXiv:1912.03300.
28. E. V. Bugaev et al., *Phys. Rev. D* **64**, 074015 (2001).
29. H. L. Lai et al., *Phys. Rev. D* **55**, 1280 (1997).
30. R. Gandhi et al., *Astropart. Phys.* **5**, 81 (1996).
31. P. Lipari, *Astropart. Phys.* **1**, 195 (1993).
32. A. Dziewonski, *The Encyclopedia of Solid Earthgeophysics*, New York, 331 (1989).

- 33.** M. G. Aartsen et al., *Phys. Rev. D* **91**, 022001 (2015).
- 34.** Л. В. Волкова, *ЯФ* **31**, 1510 (1980).
- 35.** D. Dornic et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **S183**, 626 (2011).
- 36.** S. A. Garre et al., *PoS ICRC2021*, 1121 (2021).
- 37.** M. W. E. Smith, D. B. Fox, D. F. Cowena et al., *Astropart. Phys.* **45**, 56 (2013).
- 38.** A. D. Avrorin et al., *Astron. Lett.* **47**, 94 (2021).
- 39.** V. A. Allakhverdyan et al., *PoS ICRC2021*, 946 (2021).
- 40.** V. A. Allakhverdyan et al., *PoS ICRC2021*, 1040 (2021).
- 41.** V. A. Allakhverdyan et al., *PoS ICRC2021*, 002 (2021).
- 42.** S. Mereghetti et al., <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aba2cf> (2020).
- 43.** M. G. Aartsen et al., *Science* **361**, 147 (2018).
- 44.** M. G. Aartsen et al., *Science* **361**, issue 6398, eaat1378 (2018).
- 45.** A. Plavin et al., *Astrophys. J.* **894**, 101 (2020).
- 46.** A. Plavin et al., *Astrophys. J.* **908**, 157 (2021).
- 47.** Y. Y. Kovalev et al., *PASA* **19**, 83 (2002).
- 48.** J. Richards et al., *Astrophys. J. Suppl.* **194**, 29 (2011).
- 49.** A. Neronov and M. Ribordy, *Phys. Rev. D* **79**, 043013 (2009).
- 50.** A. D. Avrorin et al., *JETP Lett.* **108**, 787 (2018).
- 51.** ZTF, <https://www.wis-tns.org/object/2019> (2019).