

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ЭКСПЕРИМЕНТ Baikal-GVD

© 2020 г. А. В. Аврорин¹⁾, А. Д. Аврорин¹⁾, В. М. Айнутдинов¹⁾, Р. Баннаш⁹⁾, З. Бардачова⁷⁾, И. А. Белолоптиков²⁾, В. Б. Бруданин²⁾, Н. М. Буднев³⁾, А. Р. Гафаров³⁾, К. В. Голубков¹⁾, Н. С. Горшков²⁾, Т. И. Гресь³⁾, Р. Дворницкий^{2),7)}, Г. В. Домогацкий¹⁾, А. А. Дорошенко¹⁾, Ж.-А. М. Джилкибаев¹⁾, В. Я. Дик²⁾, А. Н. Дячок³⁾, Д. Н. Заборов¹⁾, Р. А. Иванов²⁾, М. С. Катулин²⁾, К. Г. Кебкал⁹⁾, О. Г. Кебкал⁹⁾, В. А. Кожин⁴⁾, М. М. Колбин²⁾, К. В. Конищев²⁾, А. В. Коробченко²⁾, А. П. Кошечкин¹⁾, М. В. Круглов²⁾, М. К. Крюков¹⁾, В. Ф. Кулепов⁵⁾, М. Б. Миленин¹⁾, Р. А. Миргазов³⁾, В. Назари²⁾, Д. В. Наумов²⁾, **А. И. Панфилов¹⁾**, Д. П. Петухов¹⁾, Е. Н. Плисковский²⁾, М. И. Розанов⁶⁾, В. Д. Рушай²⁾, Е. В. Рябов³⁾, Г. Б. Сафронов^{1)*}, Ф. Шимкович^{2),7),8)}, А. В. Скурихин⁴⁾, А. Г. Соловьев²⁾, М. Н. Сороковиков²⁾, И. Штекл⁸⁾, О. В. Суворова¹⁾, Е. О. Сушенок²⁾, В. А. Таболенко³⁾, Б. А. Таращанский³⁾, Л. Файт⁸⁾, С. В. Фиалковский⁵⁾, Е. В. Храмов²⁾, Б. А. Шайбонов²⁾, М. Д. Шелепов¹⁾, Е. Эцкерова⁷⁾, С. А. Яковлев⁹⁾

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.; после доработки 16.07.2020 г.; принята к публикации 16.07.2020 г.

Baikal-GVD — это глубоководный детектор нейтрино кубокилометрового масштаба. Он спроектирован для детектирования астрофизических нейтрино с энергиями до 100 ПэВ. Развертывание установки началось весной 2015 г. С апреля 2020 г. телескоп включает в себя семь кластеров, каждый из которых состоит из восьми струн, несущих суммарно 288 оптических модулей, расположенных на глубинах от 750 до 1275 м. К концу первой фазы создания детектора, в 2024 г., планируется развернуть 15 кластеров, что позволит достигнуть эффективного объема для детектирования каскадов высоких энергий в 0.75 км³. В работе представлены устройство и статус установки Baikal-GVD, а также избранные результаты анализа данных.

DOI: 10.31857/S0044002720060045

1. ВВЕДЕНИЕ

Разместить фотодетекторы в естественных водоемах для регистрации нейтрино высоких энергий было предложено в 1960 г. М.А. Марковым [1]. В этой методике черенковское излучение продуктов взаимодействия нейтрино регистрируется в разре-

женных детекторах с чувствительными объемами масштабов кубического километра. Такие установки могут быть использованы для широкого круга исследований с природными потоками нейтрино в диапазоне энергий 10^{10} – $\sim 10^{17}$ эВ, однако их основное назначение — исследование потока астрофизических нейтрино с энергиями от ~ 100 ТэВ до ~ 100 ПэВ и выше. В настоящее время функционируют три крупномасштабных нейтринных телескопа — это ANTARES в Средиземном море, IceCube в Антарктическом ледяном щите на Южном полюсе и Baikal-GVD в озере Байкал, кроме того, ведутся работы по созданию нейтринного телескопа KM3NeT в Средиземном море. IceCube является первым нейтринным телескопом с геометрическим объемом порядка 1 км³, на котором в течение 2011–2013 гг. были зарегистрированы первые события от диффузного потока нейтрино астрофизической природы [2]. В данных IceCube за 7.5 лет наблюдений выделено 60 астрофизических нейтрино с энергией выше 60 ТэВ с вершиной взаимодействия во внутреннем объеме установки [3],

¹⁾ Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

²⁾ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

³⁾ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия.

⁴⁾ Институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва, Россия.

⁵⁾ Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия.

⁶⁾ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия.

⁷⁾ Comenius University, Bratislava, Slovakia.

⁸⁾ Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic.

⁹⁾ EvoLogics GmbH, Berlin, Germany.

*E-mail: grigorybs@gmail.com

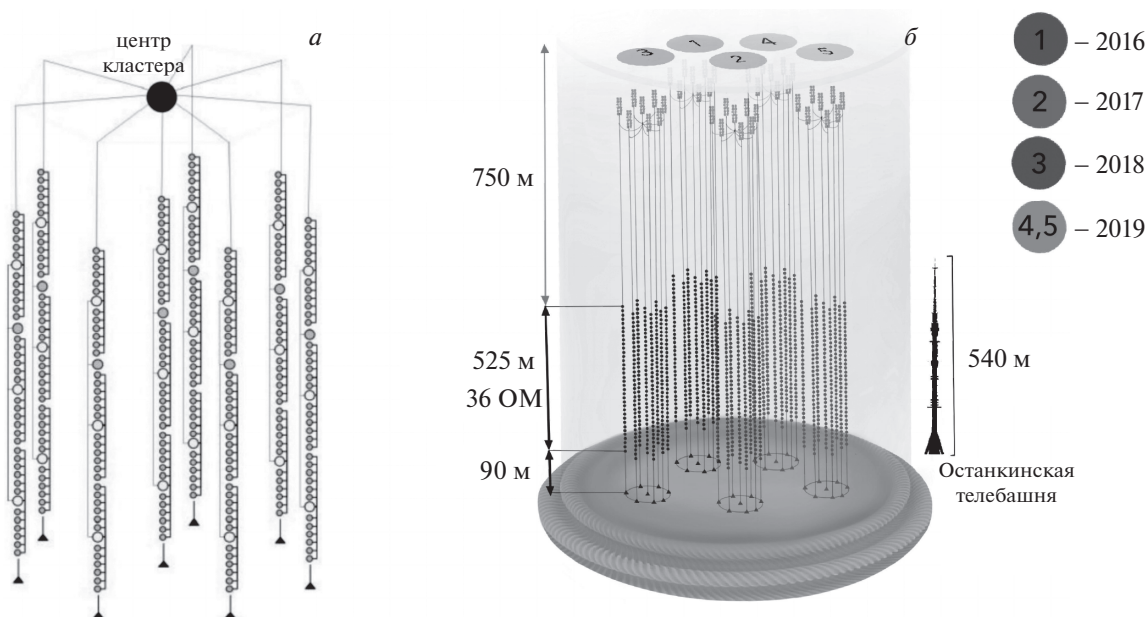


Рис. 1. Схематический вид кластера Baikal-GVD (а) и общий вид детектора в 2019 г. (б). Указаны основные размеры, справа показана очередность развертки кластеров.

однако достоверные указания на источники генерации этих нейтрино пока отсутствуют. Важным этапом в понимании происхождения астрофизических нейтрино является регистрация IceCube события, ассоциированного с блазаром TXS0506+056 на уровне 3σ [4]. Крупнейшим нейтринным телескопом в Северном полушарии в настоящее время является Baikal-GVD, набор событий от нейтрино высоких энергий в его данных в совокупности с данными IceCube позволит приблизиться к пониманию источников и процессов генерации астрофизических нейтрино.

Работы по созданию нейтринного телескопа на озере Байкал начались в 1980 г. В середине 1990-х гг. последовательно на детекторах НТ-36 и НТ-96, включающих 36 и 96 фотодетекторов соответственно, были зарегистрированы первые в мире подводные нейтрино [5, 6]. Работы по созданию телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD начались в 2011 г., и в 2015 г. был запущен в эксплуатацию первый демонстрационный кластер телескопа — «Дубна». В 2019 г. установка включала пять кластеров, несущих 1440 оптических модулей, а в зимней экспедиции 2020 г. были успешно установлены шестой и седьмой кластеры, в результате суммарное количество оптических модулей составило 2016. В этой работе представлены устройство и статус установки Baikal-GVD, а также избранные результаты анализа данных.

2. ДЕТЕКТОР Baikal-GVD

Телескоп расположен в южной части озера Байкал рядом с платформой 106 км Кругобайкаль-

ской железной дороги на расстоянии 3.6 км от берега. Глубина озера в этом районе постоянна и составляет 1366–1367 м. Каждый год в течение примерно 8 недель на озере устанавливается стабильный ледовый покров толщиной до 1 м, который выдерживает тяжелую технику. В это время проводится устранение неисправностей и сборка новых структурных единиц телескопа — кластеров. В течение остального времени года на телескопе ведется набор данных. Каждый кластер состоит из восьми гирлянд, несущих суммарно 288 фотодетекторов (рис. 1). Диаметр кластера составляет 120 м, а расстояние между центрами кластеров примерно 300 м. Гирлянда — это стальной трос с закрепленными на нем фотодетекторами и управляющей электроникой. Гирлянда прикреплена к системе поплавков на глубине 30 м и жестко закреплена на дне озера якорем. 36 фотодетекторов расположены на глубинах от 750 до 1275 м с шагом 15 м. Чувствительный элемент детектора — оптический модуль (ОМ) — это герметичная стеклянная сфера, включающая в себя фотоумножитель (ФЭУ) Hamamatsu R7081-100 с полусферическим фотокатодом диаметром 10 дюймов и квантовой чувствительностью 0.35, управляющую и считывающую электронику, а также набор датчиков, таких как акселерометр, инклинометр, компас, датчики давления и температуры. Кроме того, в состав ОМ входят два светодиода для временной калибровки оптических модулей. Каждая гирлянда несет 36 ОМ, которые объединены в секции по 12 ОМ в каждой. Оцифровка данных каждой секции осуществляется в центральном модуле секции (ЦМ)

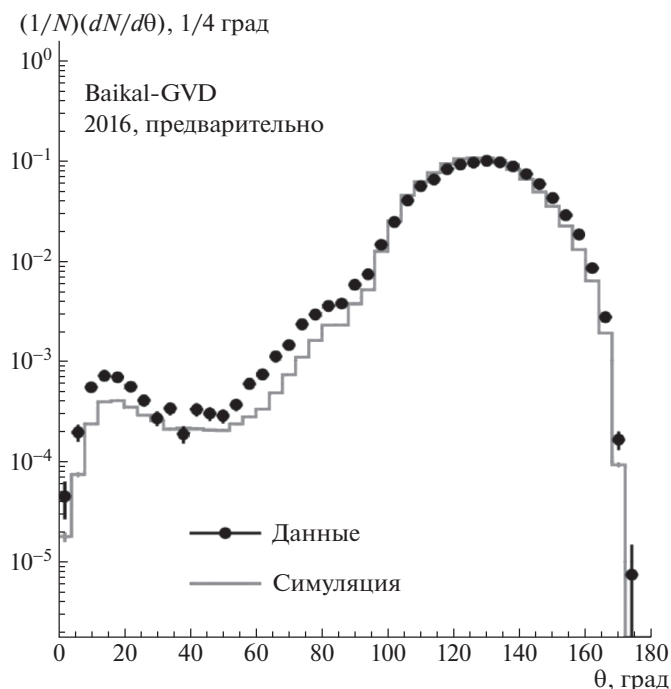


Рис. 2. Угловое распределение восстановленных атмосферных мюонов. Представлено сравнение данных с предсказаниями Монте-Карло для 2016 г. Поток мюонов в Монте-Карло получен программой для симуляции широких атмосферных ливней CORSIKA [9], в симуляции детектора учтены реальные условия функционирования в 2016 г. Угол 0° соответствует направлению вектора скорости мюона вертикально вверх (из-под земли). Продемонстрировано хорошее согласие МК и экспериментальных данных в области от $90^\circ < \theta < 180^\circ$.

с шагом 5 нс. В случае, если сигнал на соседних ОМ внутри секции составляет около 5 фотоэлектронов (ф.э.) и 1.5 ф.э. в пределах 100 нс, то ЦМ отправляет сигнал запроса в модуль управления кластером (центр кластера) на выработку триггерного сигнала, после чего с каждого ЦМ внутри кластера считывается 5 мкс данных вокруг времени прихода триггерного сигнала. От центра кластера в береговой центр проложен гибридный оптоэлектрический кабель, обеспечивающий питание, передачу данных и синхронизацию кластеров. Характерный уровень темпа счета одного кластера составляет 100 Гц, что соответствует примерно 50 Гб данных в день. Сформированные события от отдельных секций поступают в береговой центр, после чего передаются по радиоканалу шириной 250 Мб/с в Байкальск, откуда по протоколам ethernet поступают на вычислительную ферму в ОИЯИ. В ОИЯИ осуществляются централизованная первичная обработка и долговременное хранение данных.

Восстановление координат и направлений мюо-

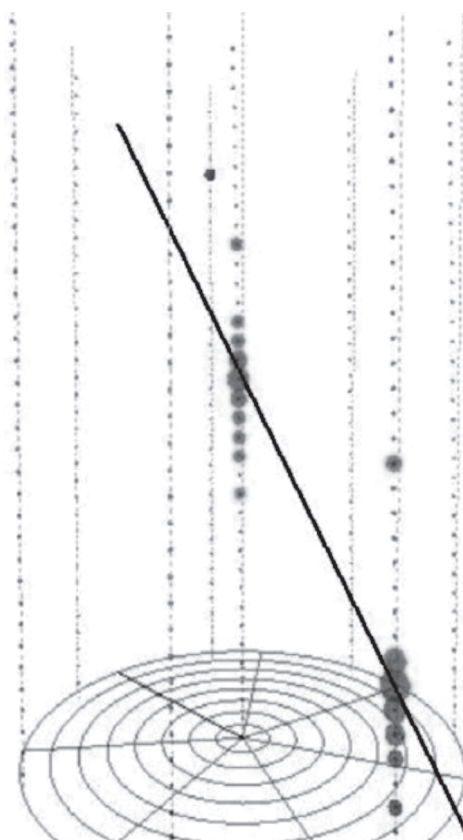


Рис. 3. Кандидат в мюонное событие от нейтрино снизу в четвертом кластере, зарегистрированное 21 мая 2019 г. Показаны оптические модули, импульсы которых были использованы для восстановления траектории мюона, и результат восстановления. Размер кругов пропорционален десятичному логарифму заряда, выделившегося в ФЭУ. Восстановленный трек направлен под углом $\sim 18^\circ$ к вертикали.

нов и ливней требует знания положения оптических модулей с точностью 10–20 см. Основными факторами, влияющими на положения ОМ, являются течения глубинных вод озера. Средняя скорость этих течений составляет порядка 0.5 см/с, однако в редких случаях наблюдались значения до 3 см/с. В случае наиболее интенсивных перемещений водных потоков отклонение ОМ от вертикали на глубинах порядка 800 м может достигать 50 м. Позиционирование ОМ осуществляется системой акустических маяков, закрепленных на каждой гирлянде на глубинах 736, 928, 1093 и 1275 м. С интервалом 1–6 мин осуществляется перекрестный акустический опрос маяков, и по времени распространения сигнала между ними определяется положение каждого из маяков. С помощью кусочно-линейной интерполяции вычисляется расположение каждого из оптических модулей. Процедура определения координат осуществляется в режиме реального времени. Средняя точность позиционирования ОМ

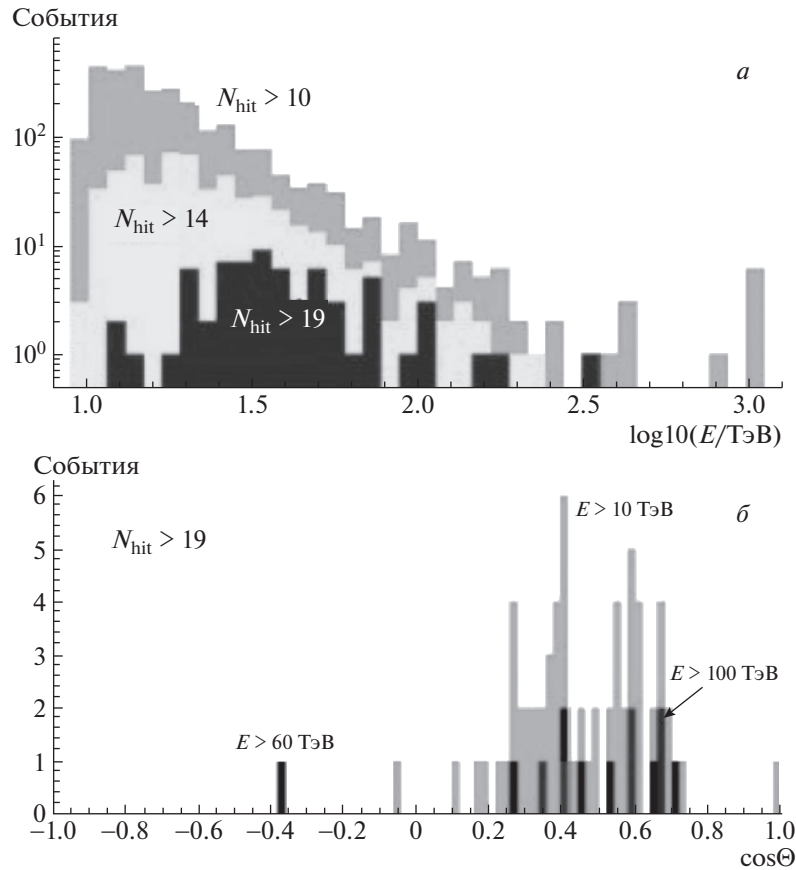


Рис. 4. Распределения по энергии (а) и по углу (б) для каскадных событий с числом сработавших ОМ > 19 в данных 2016–2019 гг.

составляет 12 ± 6 см [7] при диаметре фотокатода ФЭУ ~ 25 см.

Для восстановления событий в телескопе необходимо привязать отклик всех каналов к единой временной шкале. Задача временной калибровки ОМ в пределах одной секции решается с использованием калибровочных светодиодов, установленных в каждом ОМ. Для калибровки между секциями и гирляндами используется система матриц светодиодов, сигнал от которых распространяется до 100 м. Для межкластерной временной калибровки в детекторе установлена система лазеров, разработанных специально для эксперимента, каждый лазер генерирует вспышки длиной 1 нс, мощностью 0.37 мДж. Точность временной калибровки составляет около 2.5 нс [8].

2.1. Конфигурация телескопа в 2020 г.

В 2019 г. телескоп работал в составе пяти кластеров (рис. 1). В период зимней экспедиции 2020 г. было успешно установлено два новых кластера телескопа — шестой и седьмой, проложены два новых донных кабеля в береговой центр. Таким образом, установка включает 2016 каналов, а ее

эффективный объем достиг 0.35 км^3 в задаче регистрации ливней высоких энергий, что составляет около 0.9 эффективного объема IceCube для событий с вершиной взаимодействия во внутреннем объеме установки [3]. Кроме того, установлены четыре новых калибровочных лазерных источника света. В результате в составе телескопа функционируют пять калибровочных лазерных источников, размещенных на трех технологических гирляндах. На двух из трех гирлянд закреплено по два лазерных источника на расстоянии 180 м. Расположение каждой из технологических гирлянд обеспечивает засветку трех соседних кластеров.

В рамках развития проекта Baikal-GVD установлена экспериментальная гирлянда с одной секцией ОМ. Передача данных с мастерного модуля осуществляется напрямую в береговой центр по оптоволокну с шириной канала 1 Гбит/с. На экспериментальной гирлянде исследуются возможности построения гибкой триггерной системы, ориентированной на конкретные физические задачи, что возможно за счет увеличения производительности процессора и объема памяти платы АЦП центрального модуля.

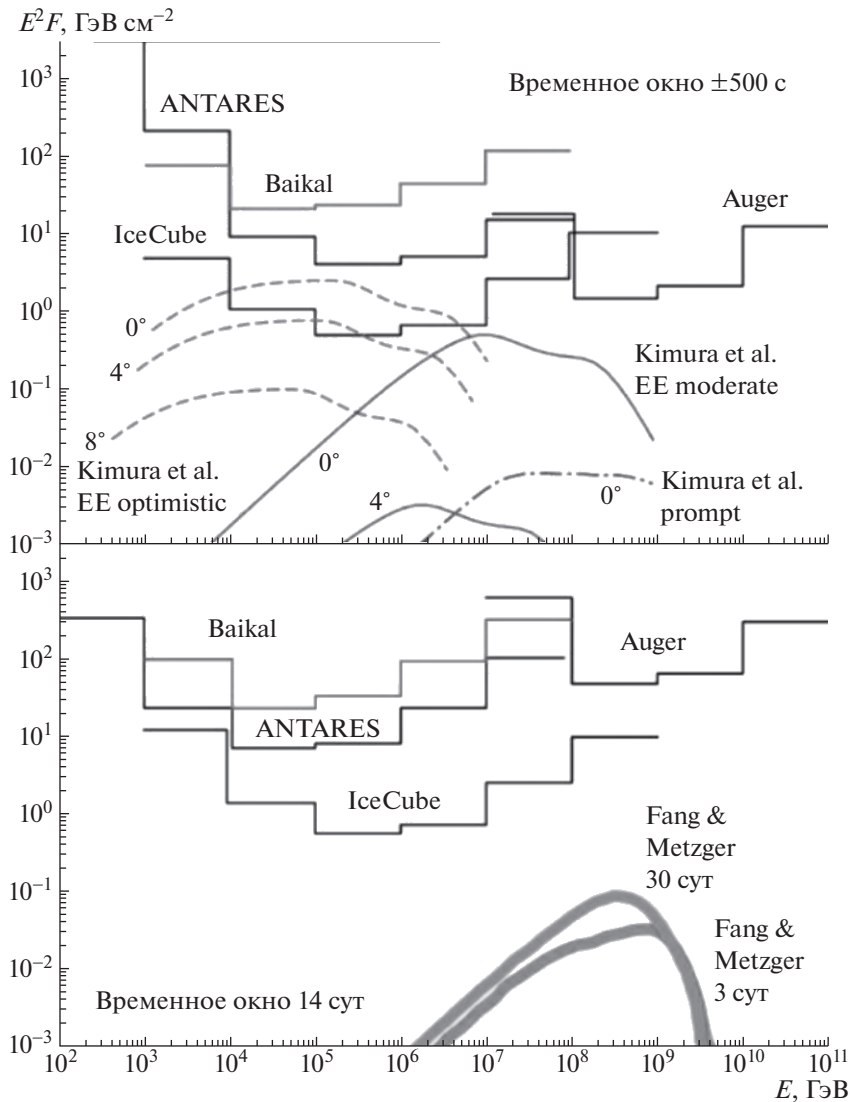


Рис. 5. Ограничения на поток нейтрино от события GW170817.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Взаимодействия нейтрино вблизи детектора сопровождаются либо образованием ливня заряженных частиц (от электрона, ядра отдачи или электронных и адронных мод распада τ -лептона), либо мюона. Ливень выглядит как интенсивный точечный источник света внутри или вблизи детектора, тогда как трек мюона является протяженным источником черенковского излучения. В настоящее время анализ данных Baikal-GVD ведется для отдельных кластеров по мере их установки. Перед восстановлением событий для каждого кластера проводится калибровка времени отклика и величины регистрируемого сигнала каждого ОМ, измеряется уровень шумов.

Восстановление мюонов осуществляется с помощью минимизации комбинации суммы квадра-

тов отклонений времени регистрации импульсов от ожидаемых и суммы произведений заряда на расстояние от ОМ до трека. Угловое разрешение для мюонов зависит от зенитного угла, траектории и энергии. В случае регистрации мюона одним кластером угловое разрешение составляет 1.2° . Ожидаемое угловое разрешение при регистрации с помощью нескольких кластеров составляет 0.5° . На рис. 2 приводится угловое распределение атмосферных мюонов, зарегистрированных одним кластером телескопа в течение 2016 г. В качестве мюонных отобраны события, содержащие не менее шести сработавших ОМ на трех и более гирляндах. События от атмосферных мюонов, реконструированные как события из-под горизонта, составляют фон по отношению к потоку мюонов от нейтрино из нижней полусферы. Для выделения нейтрино

необходимо подавить фон от атмосферных мюонов в $\sim 10^5$ – 10^6 раз. Для этого восстанавливаются параметры качества трека, к которым применяется набор критериев отбора. На рис. 3 показан кандидат в событие от нейтрино, отобранное с помощью предварительных критериев в данных 2019 г.

Эффективный объем установки для регистрации ливней высоких энергий в 2019 г. составлял 0.25 км^3 , а с 2020 г. составил 0.35 км^3 . В соответствии с характеристиками потока астрофизических нейтрино, полученных IceCube [10], ожидается ~ 0.6 астрофизических нейтрино в год в ливневом канале на один кластер. С целью поиска высокоэнергетичных ливневых событий были обработаны данные 2015, 2016, 2018 и 2019 гг., суммарная экспозиция в пересчете на один кластер для данных 2016–2019 гг. составила 1364 сут. Ливни восстанавливались с помощью метода максимального правдоподобия, в котором учтены ожидаемые времена генерации импульсов и величина сигнала ФЭУ для сработавших ОМ. Точность восстановления направления ливней для энергии 100 ТэВ составляет около 4° . Точность восстановления энергии $\delta E/E \sim 30\%$ для энергии 100 ТэВ. В качестве кандидатов в ливневые события от нейтрино были выделены события с энергией выше 100 ТэВ и числом сработавших ОМ больше 19. Найдено шесть таких событий в данных 2016–2019 гг. и одно событие в данных 2015 г. Кроме того, в 2019 г. было найдено восходящее событие с числом хитов >19 и энергией 71 ТэВ (рис. 4).

17 августа 2017 г. детекторами гравитационных волн LIGO и VIRGO был зарегистрирован сигнал GW170817. Вслед за гравитационной волной установками FERMI и INTEGRAL была зарегистрирована гамма-вспышка, а спустя 11 ч наземными телескопами была зарегистрирована оптическая вспышка [11]. Это событие было ассоциировано со слиянием нейтронных звезд в галактике NGC 4993. Установки ANTARES, IceCube, обсерватория Pierre Auger и детектор Super-Kamiokande осуществили поиск нейтрино, ассоциированных с этим событием [12, 13]. В Baikal-GVD поиск нейтрино от GW170817 был произведен в ливневом канале [14]. В 2017 г. Baikal-GVD состоял из двух кластеров. В момент события галактика NGC 4993 была примерно на уровне горизонта (зенитный угол 93.3°). Как и в [12, 13], поиск осуществлялся во временных окнах ± 500 с и ± 14 сут от события, чтобы учесть все модели образования нейтрино. Требования на количество сработавших ОМ были ослаблены, однако событий в направлении NGC 4993 зарегистрировано не было. Было установлено ограничение на поток на уровне 90% CL в предположении спектра E^{-2} и одинакового потока всех типов нейтрино (рис. 5).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Телескоп Baikal-GVD с апреля 2020 г. функционирует в составе семи кластеров. В настоящее время эффективный объем телескопа для регистрации ливней высоких энергий составляет 0.35 км^3 . В данных телескопа предыдущих лет ведется поиск нейтрино в мюонном и ливневом каналах. Разработана предварительная методика восстановления мюонов и подавления фонов от атмосферных мюонов. В ливневом канале найдено восемь кандидатов в нейтрино высоких энергий. Установлены ограничения на поток нейтрино от слияния нейтронных звезд для события GW170817.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-02-00400, грант № 9-29-11029) и при поддержке гранта для молодых ученых ОИЯИ (№ 20-202-09).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. A. Markov, in *Proceedings of the 1960 Annual International Conference on High-Energy Physics, Rochester, 1960*, Ed. by E. C. G. Sudarshan, J. H. Tinlot, and A. C. Melissinos.
2. IceCube Collab. (M. G. Aartsen *et al.*), *Science* **342**, 1242856 (2013).
3. IceCube Collab. (M. G. Aartsen *et al.*), in *Proceedings of the Very Large Volume Neutrino Telescopes (VLVnT-2018)*, J. Stachurska for the IceCube Collaboration, EPJ Web Conf. **207**, 02005 (2019).
4. The IceCube Collab. *et al.*, *Science* **361**, eaat1378 (2018).
5. Baikal Collab. (I. A. Belolaptikov *et al.*), *Astropart. Phys.* **7**, 263 (1997).
6. Baikal Collab. (V. A. Balkanov *et al.*), in *Proceedings of the 25th ICRC, Durban, South Africa, 1997*, astro-ph/9705244v1.
7. Baikal Collab. (A. D. Avrorin *et al.*), in *Proceedings of the 36th ICRC, Madison, USA*, PoS(ICRC2019) 1012.
8. Baikal Collab. (A. D. Avrorin *et al.*), in *Proceedings of the 36th ICRC, Madison, USA*, PoS(ICRC2019) 878.
9. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, FZKA 6019 (Forschungszentrum Karlsruhe, 1998).
10. IceCube Collab., in *Proceedings of the 36th ICRC, Madison, USA*, PoS(ICRC2019) 1004.
11. LIGO Scientific Collab. *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **848**, L12 (2017).

12. ANTARES, IceCube, The Pierre Auger, LIGO Scientific, and Virgo Collabs., *Astrophys. J. Lett.* **850**, L35 (2017).
13. A. Abe *et al.* (Super-Kamiokande Collab.), *Astro-* phys. J. Lett. **857**, 1 (2018).
14. Baikal Collab. (A. D. Avrorin *et al.*), *JETP Lett.* **108**, 787 (2018).

THE Baikal-GVD EXPERIMENT

A. V. Avrorin¹⁾, A. D. Avrorin¹⁾, V. M. Aynutdinov¹⁾, R. Bannasch⁹⁾, Z. Bardacova⁷⁾, I. A. Belolaptikov²⁾, V. B. Brudanin²⁾, N. M. Budnev³⁾, A. R. Gafarov³⁾, K. V. Golubkov¹⁾, N. S. Gorshkov²⁾, T. I. Gres³⁾, R. Dvornicky^{2),7)}, G. V. Domogatsky¹⁾, A. A. Doroshenko¹⁾, Zh.-A. M. Dzhilkibaev¹⁾, V. Ya. Dik²⁾, A. N. Dyachok³⁾, E. Eckerova⁷⁾, D. N. Zaborov¹⁾, R. A. Ivanov²⁾, M. S. Katulin²⁾, K. G. Kebkal⁹⁾, O. G. Kebkal⁹⁾, V. A. Kozhin⁴⁾, M. M. Kolbin²⁾, K. V. Konishev²⁾, A. V. Korobchenko²⁾, A. P. Koshechkin¹⁾, M. V. Kruglov²⁾, M. K. Krjukov¹⁾, V. F. Kulepov⁵⁾, M. B. Milenin¹⁾, R. A. Mirgazov³⁾, V. Nazari²⁾, D. V. Naumov²⁾, A. I. Panfilov¹⁾, D. P. Petukhov¹⁾, E. N. Pliskovsky²⁾, M. I. Rozanov⁶⁾, V. D. Rushay²⁾, E. V. Rjabov³⁾, G. B. Safronov¹⁾, F. Simkovic^{2),7),8)}, A. V. Skurikhin⁴⁾, A. G. Solovjev²⁾, M. N. Sorokovikov²⁾, I. Stekl⁸⁾, O. V. Suvorova¹⁾, E. O. Sushenok²⁾, V. A. Tabolenko³⁾, B. A. Taraschansky³⁾, L. Fajt⁸⁾, S. V. Fialkovsky⁵⁾, E. V. Khramov²⁾, B. A. Shaibonov²⁾, M. D. Shelepov¹⁾, and S. A. Yakovlyev⁹⁾

¹⁾ *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²⁾ *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

³⁾ *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

⁴⁾ *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁵⁾ *Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia*

⁶⁾ *Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russia*

⁷⁾ *Comenius University, Bratislava, Slovakia*

⁸⁾ *Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic*

⁹⁾ *EvoLogics GmbH, Berlin, Germany*

Baikal-GVD is a cubic-kilometer scale deep-underwater neutrino detector. It is designed to detect astrophysics neutrino with energies up to 100 PeV. Detector deployment began in spring 2015. Since April 2020 detector includes 7 clusters each consisting of 8 strings carrying 288 optical modules in total located at depths from 750 to 1275 m. By the end of the first phase of detector construction in 2024 it is planned to deploy 15 clusters reaching effective volume for high-energy cascade detection of 0.75 km³. In this report we present design and status of Baikal-GVD detector and selected data analysis results.