

СЛЕЖЕНИЕ ЗА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ НЕЙТРИНО НА БАЙКАЛЬСКОМ НЕЙТРИННОМ ТЕЛЕСКОПЕ ВАИКАЛ-GVD

© 2021 г. А. В. Аврорин¹, А. Д. Аврорин¹, В. М. Айнутдинов¹, П. Банах², З. Бардачова³, И. А. Белолаптиков⁴, **В. Б. Бруданин**⁴, Н. М. Буднев⁵, А. Р. Гафаров⁵, К. В. Голубков¹, Н. С. Горшков⁴, Т. И. Гресь⁵, Р. Дворницкий⁴, В. Я. Дик⁴, Ж.-А. М. Джилкибаев^{1*}, Г. В. Домогацкий¹, А. А. Дорошенко¹, А. Н. Дьячок⁵, Е. Еркелова³, Т. В. Елжов⁴, Д. Н. Заборов¹, Р. А. Иванов⁴, М. С. Катулин⁴, К. Г. Кебкал², О. Г. Кебкал², В. А. Кожин⁶, М. М. Колбин⁴, К. В. Конищев⁴, К. А. Копанский⁷, А. В. Коробченко⁴, А. П. Кошечкин¹, М. В. Круглов⁴, М. К. Крюков¹, В. Ф. Кулепов⁸, М. В. Миленин⁴, Р. Р. Миргазов⁵, В. Назари⁴, Д. В. Наумов⁴, В. Нога⁷, Д. П. Петухов¹, Е. Н. Плисковский⁴, М. И. Розанов⁹, В. Д. Рушай⁴, Е. В. Рябов⁵, Г. Б. Сафронов¹, Ф. Симкович^{4,3}, А. В. Скурихин⁶, А. Г. Соловьев⁴, М. Н. Сороковиков⁴, И. Стекл¹⁰, О. В. Суворова^{1**}, Е. О. Сушенок⁴, В. А. Таболенко⁵, Б. А. Таращанский⁵, Л. Файт¹⁰, С. В. Фиалковский⁸, Е. В. Храмов⁴, Б. А. Шайбонов⁴, М. Д. Шелепов¹, Ю. В. Яблокова⁴, С. А. Яковлев²

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²EvoLogics GmbH, Берлин, Германия

³Comenius University, Братислава, Словакия

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁵Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

⁶Институт ядерной физики им. Скобелевны МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

⁸Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия

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

¹⁰Czech Technical University in Prague, Прага, Чешская Республика

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 26.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Глубоководный нейтринный эксперимент Baikal-GVD участвует в международной программе мульти-мессенджер по обнаружению астрофизических источников космических частиц высоких и сверхвысоких энергий, находясь на стадии развертывания установки и поэтапного увеличения эффективного объема телескопа до масштаба кубического километра. В настоящее время телескоп состоит из семи кластеров, содержащих 2016 фотодетекторов. Эффективный объем детектора достиг 0.35 км^3 в задаче выделения ливневых событий от взаимодействия нейтрино в байкальской воде. С 2015 г. набор экспериментальных данных ведется в режиме постоянной экспозиции, что позволяет реализовать оперативный анализ данных и программу мониторинга небесной сферы в реальном времени. В статье обсуждается структура системы сбора данных, описана процедура восстановления физических событий в режиме быстрого отклика на оповещение (алерт), и представлены результаты анализа девяти алерт событий полярного телескопа IceCube с начала сентября до конца октября 2020 г.

Ключевые слова: астрофизические нейтрино, оповещения, Байкал.

DOI: 10.31857/S0320010821020017

* Электронный адрес: djilkib@yandex.ru

** Электронный адрес: suvorova@inr.ru

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько лет астрономия и астрофизика получили значительное развитие благодаря результатам исследований в рамках международной программы многоканального (мультиплексенджер) поиска источников космического излучения на разных длинах волн. Создана и расширяется роботизированная сеть телескопов с оптимизированной системой связи между ними, обеспечивающей быстрый обмен оповещениями о регистрации сигнала на одной из установок, и наблюдение за его источником на всех остальных. Сканирование одной и той же области небесной сферы на разных длинах волн: в электромагнитном излучении от радиоволн до гамма-излучения, в потоках частиц космических лучей и нейтрино, в гравитационных волнах, улавливаемых антеннами-интерферометрами, — обеспечивает более полную информацию о природе и свойствах наблюдаемых источников.

Измерениям на нейтринных телескопах с объемом порядка кубического километра доступны энергии нейтрино выше ста тераэлектронвольт (ТэВ). В этой области энергий присутствие нейтринной компоненты внеатмосферного происхождения впервые было обнаружено в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube на Южном полюсе (Арстен и др., 2013а,б) и подтверждено его данными за семь лет наблюдений (Арстен и др., 2019). Кроме того, на это указывает и результат совместного анализа с данными глубоководного телескопа ANTARES в Средиземном море за десять лет измерений (Алберт и др., 2020). Однако астрофизические источники зарегистрированных высокоэнергичных нейтрино не идентифицированы. Возможное решение проблемы в настоящее время видится в формировании широкой сети оповещений о нейтринном событии для совместного анализа результатов разных детекторов. Нейтринный алерт IC170922A с энергией выше 300 ТэВ, зарегистрированный телескопом IceCube в направлении блазара TXS 0506+05 в период его активности в 2017 г. (Арстен и др., 2018), мотивировал мультиволновые наблюдения данного астрофизического источника (Арстен и др., 2018) и большое число теоретических работ о механизмах генерации нейтринных потоков от таких объектов, как активные галактические ядра (из недавних работ см., например, статьи (Плавин и др., 2020а,б)). Автоматическая система ТАТоО (Дорник и др., 2011), реализованная на телескопе ANTARES, формирует алертный триггер и реконструкцию направления траекторий мюонов в реальном времени с точностью до 0.5° от взаимодействия нейтрино с энергиями выше нескольких ТэВ. Коллаборация Baikal-GVD получает оповещения ANTARES с декабря 2018 г. Предварительный

результат совместного анализа был представлен в работе (Гаррэ и др., 2020). Автоматизированная сеть AMON (Смит и др., 2013) принимает информацию телескопа IceCube онлайн и при восстановлении мюонной траектории с оценкой энергии выше сотни ТэВ передает алерт в циркуляр оповещений астрономических событий GCN (сайт архива). В статье представлены результаты отслеживания алертов на Baikal-GVD по девяти событиям телескопа IceCube с начала осени 2020 г. Полученные ограничения на нейтринный поток в направлении алертов относятся к анализу данных кластеров Baikal-GVD как независимых детекторов нейтрино.

ГЛУБОКОВОДНЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП ВАЙКАЛ-GVD

Глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD создается в южной части оз. Байкал (Аврорин и др., 2020а). Географические координаты установки 51.77° северной широты и 104.415° восточной долготы. Телескоп имеет модульную структуру и состоит из кластеров. Каждый кластер представляет собой полнофункциональный детектор, оснащенный системами регистрации, формирования триггера, калибровки, позиционирования и сбора данных. В состав кластера входит 288 фотодетекторов (оптических модулей), предназначенных для регистрации черенковского излучения, генерированного продуктами взаимодействия нейтрино высоких энергий в воде: мюонами и каскадными ливнями. Светочувствительным элементом оптического модуля является фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R7081-100 с полусферическим фотокатодом диаметром 25 см. Оптические модули (ОМ) кластера размещены равномерно на восьми гирляндах в диапазоне глубин от 1275 до 750 м. Расстояние между гирляндами в кластере составляет 60 м, расстояние между центрами кластеров 300 м. Эффективный объем одного кластера в задаче регистрации каскадных ливней высокой энергии составляет около 0.05 км^3 .

Помимо системы регистрации черенковского излучения, кластер оснащен рядом вспомогательных систем, необходимых для калибровки измерительных каналов детектора и определения координат ОМ. Калибровка осуществляется при помощи светодиодных источников света, установленных в каждом оптическом модуле, и матриц светодиодов, размещенных на каждой гирлянде кластера (Аврорин и др., 2020б). Для определения координат ОМ используется акустическая система позиционирования. На каждой гирлянде размещены 4 акустических модема. Это обеспечивает точность восстановления координат оптических модулей, располо-

женных между модемами, на уровне 20 см (Аврорин и др., 2019а).

Основным структурным элементом системы сбора данных Baikal-GVD является секция ОМ, в состав которой входят 12 оптических модулей, до двух акустических модемов системы позиционирования и отдельный модуль сбора данных. В настоящее время на каждой гирлянде кластера Baikal-GVD размещаются по три секции. Триггерная логика модуля сбора данных секции анализирует амплитуды входных сигналов и, в случае коррелированного во времени превышения заданных порогов на двух соседних оптических модулях, формирует сигнал *запрос*. Сигналы *запрос* от всех секций поступают в центр сбора данных кластера, где формируется сигнал *подтверждение* (триггер кластера), который одновременно передается на все секции, обеспечивая синхронность их работы.

Сбор данных осуществляется под управлением трех независимых программных модулей, которые формируют три канала сбора информации. По первому каналу передаются результаты измерений сигнало-откликов ОМ: о форме, суммарном заряде и времени регистрации всех импульсов, которые были сформированы фотоэлектронными умножителями ОМ в интервале времени ± 2.5 мкс по отношению ко времени поступления триггерного сигнала. Второй канал предназначен для передачи результатов измерений координат акустических модемов. На основании этих данных восстанавливаются координаты ОМ, которые используются в процессе реконструкции характеристик физических событий. Третий канал используется для передачи данных мониторинга параметров аппаратуры измерительных каналов, состояния и пространственной ориентации ОМ в горизонтальной плоскости и относительно вертикальной оси.

Для синхронизации кластеров друг с другом в центр сбора данных каждого кластера из Берегового центра по индивидуальным оптическим линиям (каналам синхронизации) передается общая тактовая частота, что обеспечивает синхронный ход часов кластеров (Голубков и др., 2019). Для определения временных сдвижек между ходом часов измеряются задержки прохождения сигналов по каналам синхронизации. Привязка к мировому времени осуществляется при помощи GPS.

Первый полномасштабный кластер Baikal-GVD был введен в эксплуатацию в 2016 г., после успешной работы демонстрационного кластера “Dibna”, с числом модулей 192 в течение 2015 г. (Аврорин и др., 2015). В 2020 г. введены в эксплуатацию семь кластеров. В настоящее время байкальский глубоководный детектор представляет собой крупнейший нейтринный телескоп Северного полушария Земли.

Система сбора данных

Для первичной обработки, реконструкции событий и дальнейшего анализа данных Baikal-GVD разработано специализированное программное обеспечение BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software) (Шайбонов и др., 2017а). Оно состоит из двух программных пакетов. Первый из них — это набор C++ программ, написанный в единой программной среде на базе ROOT (Брюн, Радемейкерс, 1997) и выполняющий задачи обработки данных, зависящих друг от друга в том смысле, что выходные данные одной программы используются в качестве входных данных другими программами. Второй из них — это набор программ, написанный на Python на базе пакета Luigi (сайт луйджи), который занимается запуском C++ программ в нужной последовательности и отслеживанием их исполнения. В течение осени 2020 г. Байкальский телескоп Baikal-GVD впервые вышел на режим онлайн анализа первичных данных. Обработка внешнего оповещения и формирование собственного оповещения о высокоэнергичном нейтрино осуществляются в результате реконструкции событий после завершения последовательной цепочки передачи данных от подводного телескопа на берег по оптоволоконному кабелю в г. Байкальск по радиоканалу (300 Мб/сек) и далее по каналу Internet в центр обработки и хранения данных ОИЯИ. На данный момент полностью реализован и эксплуатируется так называемый порановый режим обработки информации, когда старт обработки наступает при получении всех файлов сеанса набора данных. Длительность обработки сеанса и, соответственно, задержка формирования оповещения о событии с заданными характеристиками зависят от числа файлов в сеансе (который, в свою очередь, зависит от уровня фонового свечения озера) и, как правило, составляют 3–5 ч. Для того чтобы уменьшить задержку между реальным временем события и доступностью обработанных данных, разрабатывается так называемый пофайловый режим работы, когда обработка начинается сразу же, как только отдельный файл сеанса появится в основном хранилище данных. Как правило, временной интервал с момента формирования файла на Береговом центре и до появления его в хранилище данных составляет менее 1 мин. Обработка одного файла занимает несколько минут.

РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ

Эксперименты по регистрации нейтрино на глубоководных либо подледных нейтринных телескопах базируются на регистрации черенковского из-

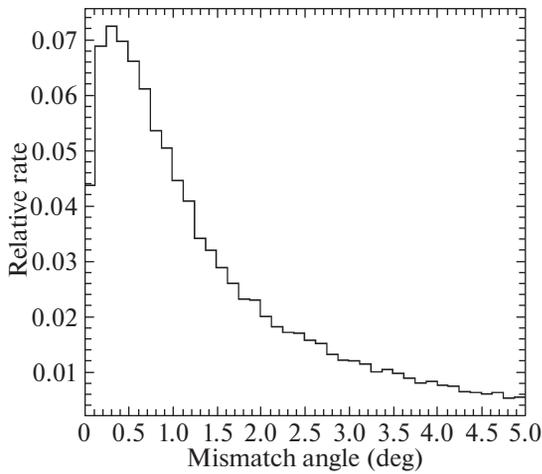


Рис. 1. Распределение событий по углу между разыгранным направлением нейтрино со спектром E^{-2} и восстановленным направлением мюона, усредненное по изотропному распределению разыгранных направлений.

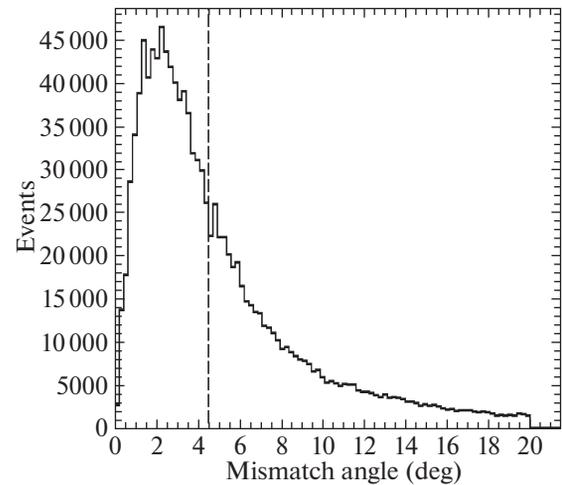


Рис. 2. Распределение событий по углу между разыгранным и восстановленным направлениями ливней, усредненное по изотропному распределению разыгранных направлений. Вертикальная линия на рисунке указывает на значение медианного угла распределения, равного 4.5° .

лучения вторичных мюонов и каскадов заряженных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтрино с веществом. Мюонная мода применима для регистрации мюонных нейтрино при взаимодействии нейтрино с веществом через заряженные токи. Каскадная мода применяется при взаимодействии электронных и тау нейтрино через заряженные токи и при взаимодействии всех трех типов нейтрино через нейтральные токи. Следует отметить, что в случае взаимодействия мюонных нейтрино в чувствительном объеме телескопа через заряженные токи также возникает адронный каскад, который регистрируется фотодетекторами установки.

Восстановление мюонных треков

Процедура восстановления траектории одиночного мюона была разработана и применялась ранее для обработки данных Байкальского нейтринного телескопа НТ-200 (Белолаптиков и др., 1997; Балканов и др., 1999). Аналогичная схема восстановления траекторий мюонов в случае одного кластера Baikal-GVD была реализована и встроена в общую программную среду BARS обработки и анализа данных Байкальского эксперимента. Предварительными этапами анализа экспериментальных данных байкальского нейтринного телескопа в задачах регистрации мюонов и ливней высоких энергий являются подавление фоновых импульсов и выделение импульсов оптических модулей, инициированных мюонами и ливнями. Частота срабатывания фотоэлектронного умножителя (ФЭУ)

от естественного свечения байкальской воды зависит от глубины и времени года и составляет 20–50 кГц на нижних и средних секциях телескопа. На верхних секциях в летние месяцы темп счета может достигать 100 кГц. Критерии предварительного отбора импульсов, используемых для восстановления траекторий мюонов, базируются на характеристиках фотодетекторов, и в первую очередь на их угловой чувствительности и расположении в пространственной решетке всех оптических модулей. Процедура отбора импульсов снижает вклад фоновых срабатываний до 1%.

Траектория мюона описывается пятью параметрами: координаты точки пересечения мюона с плоскостью, проходящей через геометрический центр кластера перпендикулярно траектории мюона, зенитный и азимутальный углы и время прохождения мюоном заданной точки в пространстве. Алгоритм восстановления траектории мюона заключается в минимизации функционала $Q(t, r, q) = \chi^2(t) + w \cdot f(q, r)$, где $\chi^2(t) = \sum (t_{\text{exp}} - t_{\text{th}})^2 / \sigma^2$, t_{exp} — измеренное время импульса в оптическом модуле, t_{th} — ожидаемое время от данного трека в предположении прямого черенковского света от мюона, σ — точность измерения времени, $f(q, r)$ — сумма произведений заряда, зарегистрированного в оптическом модуле, и расстояния от оптического модуля до трека, а величина w — относительный вклад (“вес”) этого слагаемого, пропорциональный величине заряда.

Основным источником фона при выделении нейтрино снизу являются события от атмосферных мюонов, реконструированные как события снизу.

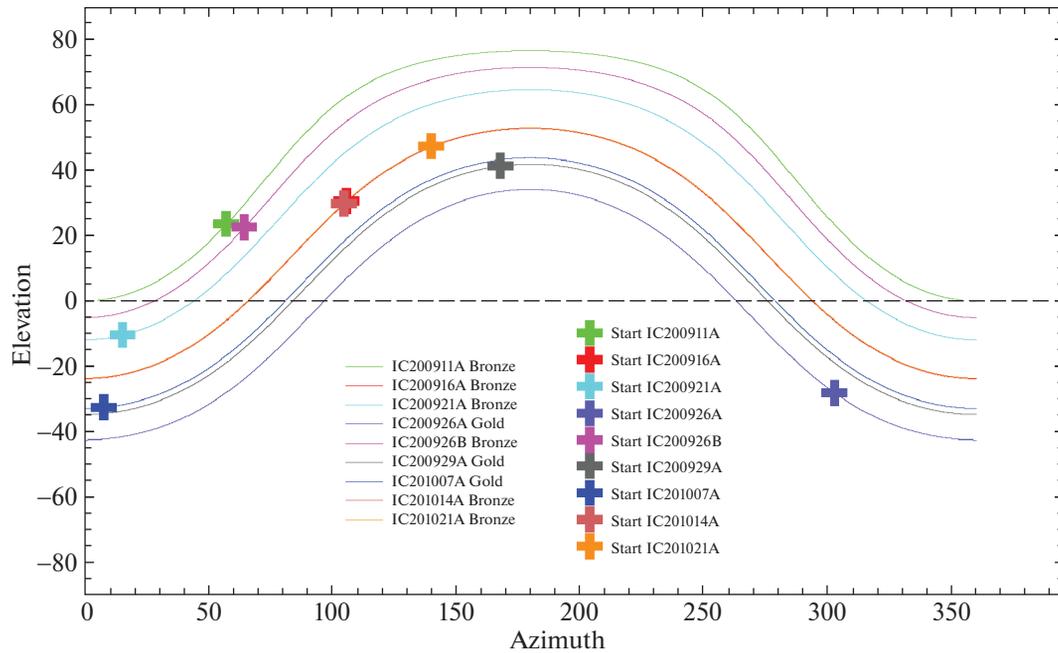


Рис. 3. Суточные траектории фиксированных экваториальных направлений девяти алертов в горизонтальных координатах телескопа Baikal-GVD.

Для выделения событий от нейтрино и подавления фоновых событий от мюонов был разработан набор критериев на оценку качества восстановления трека. Ограничение сверху на величину функционала $Q(t, r, q)$, приведенную на число свободных параметров, является одним из наиболее эффективных условий для отбора нейтрино, как представлено на рис. 3 в работе (Заборов и др., 2020). Другими важными параметрами в отборе событий снизу являются ограничения на значения вероятностей сработавшим каналам кластера сработать и несработавшим каналам не сработать. Кроме того, для обеспечения достаточной длины трека в одном кластере отбирались события с зенитными углами $\Theta_{\text{zenith}} > 120^\circ$. Медианное угловое разрешение для треков, прошедших отбор, составляет 1.27° , как видно на рис. 1, в распределении углов разлета между направлениями нейтрино, смоделированными методом Монте-Карло с энергетическим спектром E^{-2} , и восстановленными траекториями мюона. Алгоритм восстановления треков и отбор нейтринных событий на Baikal-GVD представлены в работах (Заборов и др., 2020, Сафронов и др., 2020). Следует отметить, что в задаче поиска нейтрино от локальных источников, ассоциированных с алертами от других установок, фоновые ограничения существенно мягче, что позволяет вести наблюдения в области горизонта.

Выделение ливней высоких энергий

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. Подавление фоновых импульсов от собственного свечения среды в данной задаче достигается в значительной степени за счет повышения допустимого значения заряда импульсов электронных фотоумножителей, используемых в анализе данных. Благодаря тому, что уровень собственного свечения водной среды составляет порядка одного фотоэлектрона (ф.э.), пороговое значение в 1.5 ф.э. позволяет подавить число фоновых импульсов до уровня 1–2%. Восстановление координат, энергии и ориентации ливней, регистрируемых телескопом Baikal-GVD, проводится в два этапа (Аврорин и др., 2009, Шайбонов и др., 2017б). На первом этапе восстанавливаются координаты ливня. Процедура восстановления заключается в минимизации функционала χ^2_t с использованием временной информации сработавших каналов телескопа. На втором этапе проводится восстановление энергии и направления оси ливня, используя амплитудную информацию от ОМ и характерное угловое распределение черенковского поля фотонов каскада, методом наибольшего правдоподобия с использованием восстановленных на первом этапе координат ливня. В ка-

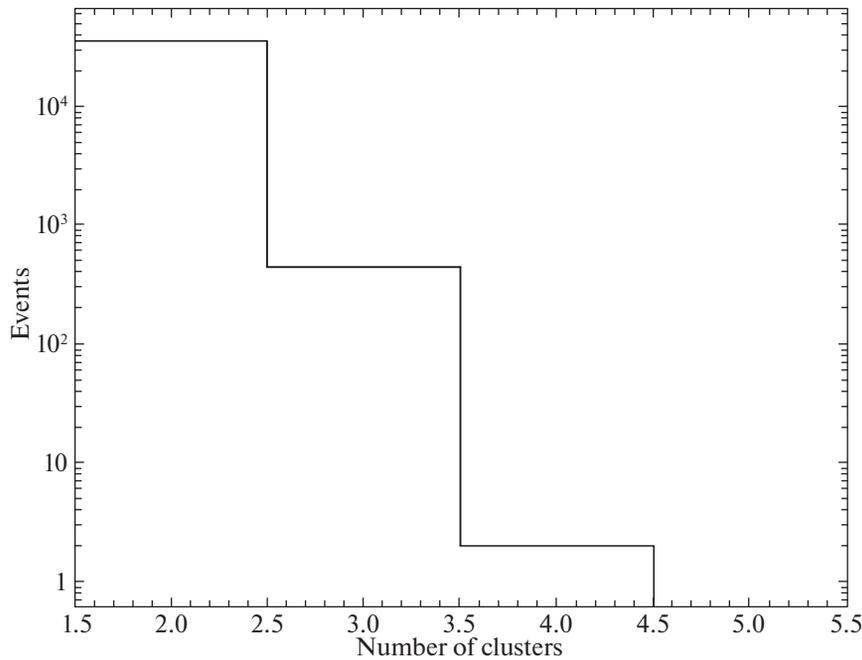


Рис. 4. Частота мультикластерных событий в сутки. По оси абсцисс — число кластеров в совпадении событий во временном окне, соответствующем расстоянию между кластерами.

честве полярного и азимутального углов, характеризующих направление развития ливня, и энергии ливня выбираются значения переменных θ , ϕ и E_{sh} , соответствующие максимальному значению функционала оптимизации. Распределение событий по углу ψ между разыгранным и восстановленным направлениями ливней для одного кластера Baikal-GVD приводится на рис. 2. Медианный угол этого распределения равен 4.5° . Точность восстановления энергии ливня для одного кластера составляет 26–30% в зависимости от энергии ливня и числа сработавших оптических модулей в событии. Дальнейшее повышение качества процедур выделения ливневых событий и восстановления параметров ливней достигается за счет применения дополнительных ограничений на значения специальных параметров, характеризующих событие.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОПОВЕЩЕНИЯ

Алерты осенней серии измерений на телескопе IceCube

За сентябрь—октябрь 2020 г. число оповещений о регистрации высокоэнергичных нейтрино телескопом IceCube на Южном полюсе оказалось рекордным по частоте в месяц за все время наблюдений: шесть событий в сентябре, три в октябре. Источники алертов зарегистрированы в Северной

небесной полусфере. Алертные события трековые, с направлением снизу вверх для IceCube, с хорошей точностью восстановления направления мюона: около 0.5° (категория “gold”) и до 2.5° (“bronze”) (Блоуфас и др., 2019). 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” (Блоуфас и др., 2019). Потоки нейтрино от источников северного неба на Baikal-GVD наблюдаются в большинстве случаев как нисходящие. 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 (сайт архива). Суточные траектории наблюдения алертов в горизонтальных координатах Baikal-GVD показаны на рис. 3, где фиксированные координаты алертов обозначены цветными символами “прямой крестик”. Как видно, для телескопа Baikal-GVD шесть событий находятся в верхней полусфере, три — в нижней. Однако алерты IC200921A, IC200926A и IC20107A расположены недостаточно низко под горизонтом, чтобы в трековой моде реконструкции выделить вокруг

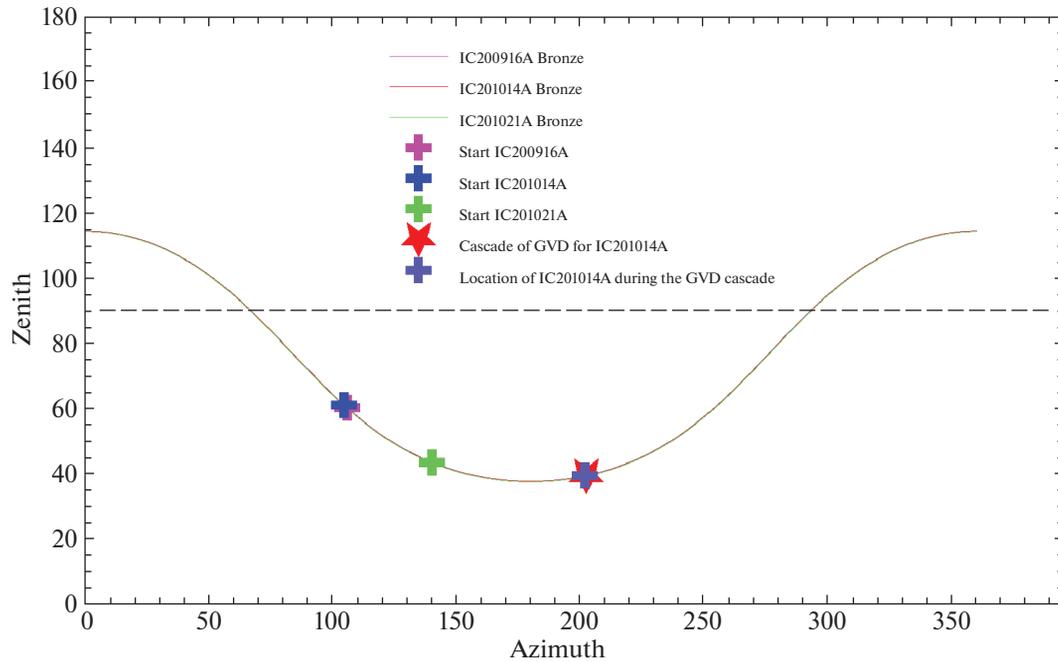


Рис. 5. Суточные траектории алертов IC200916A, IC201014A, IC201021A (обозначение цветом и “крестиком” в рамке легенды) в горизонтальных координатах телескопа Baikal-GVD. Звездочкой показано положение восстановленного ливневого события (красным цветом). Подробнее в тексте.

них восстановленные траектории по критериям качества нейтринных событий на Baikal-GVD (см. предыдущий раздел). Критерии отбора окологоризонтных нейтрино по мюонным траекториям в настоящее время на стадии исследования как на отдельном кластере, так и в мультикластерных событиях. Пример распределения событий на разных кластерах по кратности совпадения времен показан на рис. 4. Предварительный анализ восстановленных треков во временных совпадениях кластеров не выявил их общих событий.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном разделе обсуждаются результаты поиска нейтрино, ассоциированных с девятью оповещениями IceCube, основанные на выделении и анализе каскадных событий. Среди рассматриваемых алертов триплет IC200916A, IC201014A и IC201021A выделяется тем, что есть совпадение значений их склонений с точностью до десятых долей градуса. Соответственно, суточные траектории их наблюдения в горизонтальных координатах одинаковы, что видно на общем графике траекторий на рис. 3. На рис. 5 представлена траектория для этих событий IceCube вместе с координатами ливневого события (светло-синий крестик), зарегистрированного на Baikal-GVD через 4.96 часа после алерта IC201014A на угловом расстоянии менее

пяти градусов от направления на положение алерта на небесной сфере. Восстановленные координаты этого события в экваториальной системе: 221° (восхождение) и 14.8° (склонение). В событии восемь сработавших модулей, а его восстановленная энергия составляет 5 ТэВ. Вероятность появления такого события в конусе углового разрешения оценивается на уровне фона от атмосферных мюонов.

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 $N_{\text{hit}} > 7$, 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 наборов данных для девяти IC алертов (см. табл. 1) были выделены три каскадных события для 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

Таблица 1. Верхние пределы на 90% д.у. на потоки нейтрино $E^2 \cdot F(E)$ [ТэВ см⁻²] в направлении прихода алертов для спектра в источнике E^{-2}

Алерт	Событие GCN	Тип	Энергия, ТэВ	Высота, градусы	$N_{obs} \pm 12$ ч	N_{bg} в сутки	Уровень значимости	Предел $E^2 \cdot F(E)$, ТэВ см ⁻²
IC200911A	28411	Bronze	110.79	23.2	—	0.33	—	1.43×10^{-3}
IC200916A	28433	Bronze	110.48	30.3	—	0.29	—	1.12×10^{-3}
IC200921A	28468	Bronze	117.17	-10.6	—	0.36	—	1.13×10^{-3}
IC200926A	28504	Gold	670.50	-28.2	—	0.19	—	1.14×10^{-3}
IC200926B	28509	Bronze	121.42	22.3	1	0.39	0.32	2.5×10^{-3}
IC200929A	28532	Gold	182.89	41.1	1	0.35	0.29	2.5×10^{-3}
IC201007A	28575	Gold	682.65	-32.5	—	0.25	—	1.12×10^{-3}
IC201014A	28616	Bronze	146.93	29.5	1	0.44	0.36	2.44×10^{-3}
IC201021A	28715	Bronze	105.27	47.1	—	0.37	—	1.37×10^{-3}

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.

На рис. 6 в качестве иллюстрации представлено распределение 113 выделенных ливневых событий во временном интервале ± 12 ч около события IC200929A. Распределение этих событий по углу представлено на рис. 7. Для данного алерта выделено одно ливневое событие со значением $\psi < 5^\circ$. На рис. 8 приводятся траектория источника IC200929A в локальных координатах телескопа, и координаты зарегистрированных ливней в интервале ± 12 ч.

В отсутствие статистически значимого превышения числа зарегистрированных событий над ожидаемым фоном, для каждого из IC алертов можно установить ограничение на число ожидаемых событий. Согласно (Фелдман, Кузинс, 1998), 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, $n_{90\%} = 4.36$. На рис. 9 представлена зависимость от косинуса зенитного угла эффективных площадей регистрации изотропных потоков нейтрино трех ароматов в окрестности Земли, усредненных по спектру E^{-2} в диапазоне энергий 1 ТэВ–10 ПэВ, с учетом ослабления потоков нейтрино в Земле. Методика вычисления эффективной площади телескопа Baikal-GVD для ливневых событий от нейтрино и функциональные зависимости от энергии нейтрино и направления его прихода на установку подробно описаны в работах (Аврорин и др., 2009; Шайбонов и др., 2017б; Дворницкий и др., 2019). Используя 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 [ТэВ⁻¹ 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 алертов.

В заключение отметим, что анализ данных телескопа Baikal-GVD впервые выполнен в режиме онлайн слежения за нейтринными алертами. Совпадений по направлению и времени регистра-

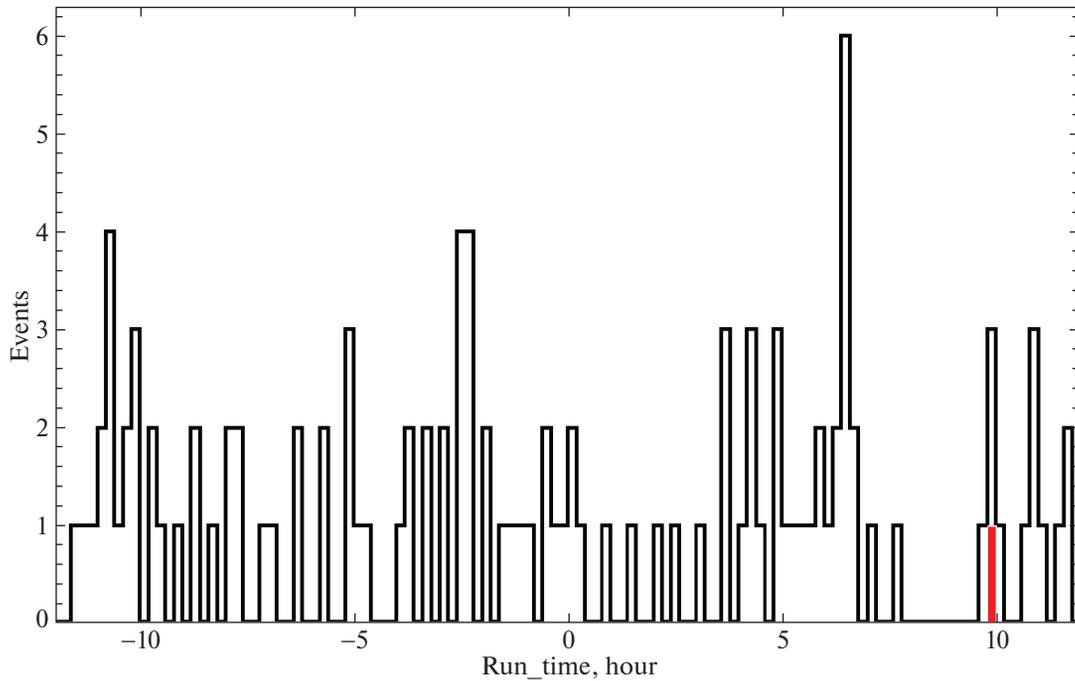


Рис. 6. Временное распределение событий для алерта IC200929A. Красным цветом отмечено положение каскада со значением $\psi < 5^\circ$.

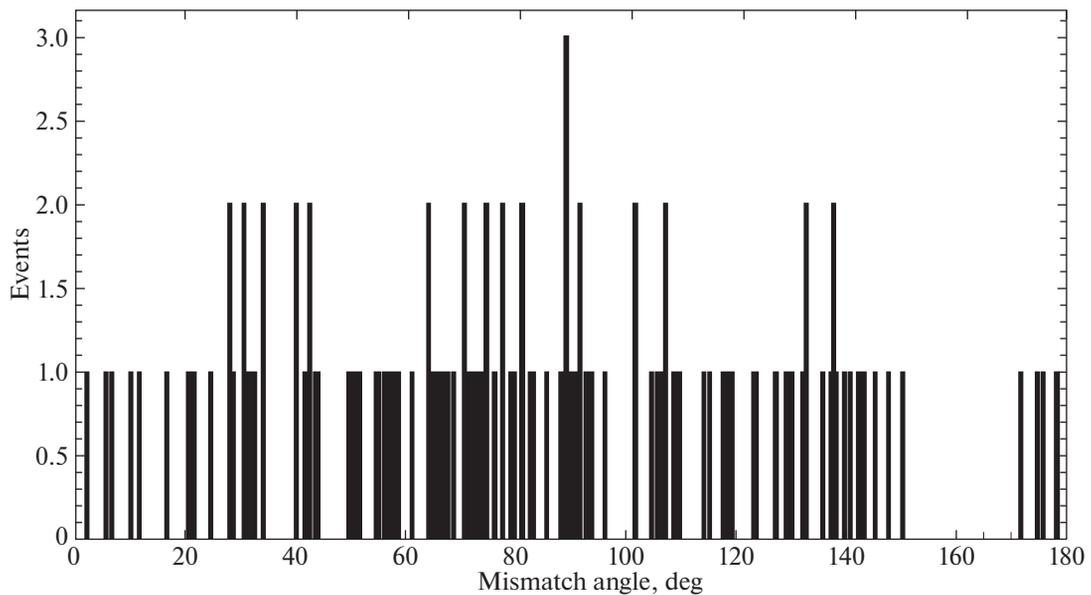


Рис. 7. Распределение событий по углу ψ между направлениями прихода нейтрино и каскада для алерта IC200929A.

ции восстановленных событий на Baikal-GVD не выявлено, получены предельные значения потоков нейтрино в девяти направлениях источников Северной небесной полусферы. Выработка своих

алертов в реальном времени является задачей на ближайшее время.

Поддержано Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука” (грант номер

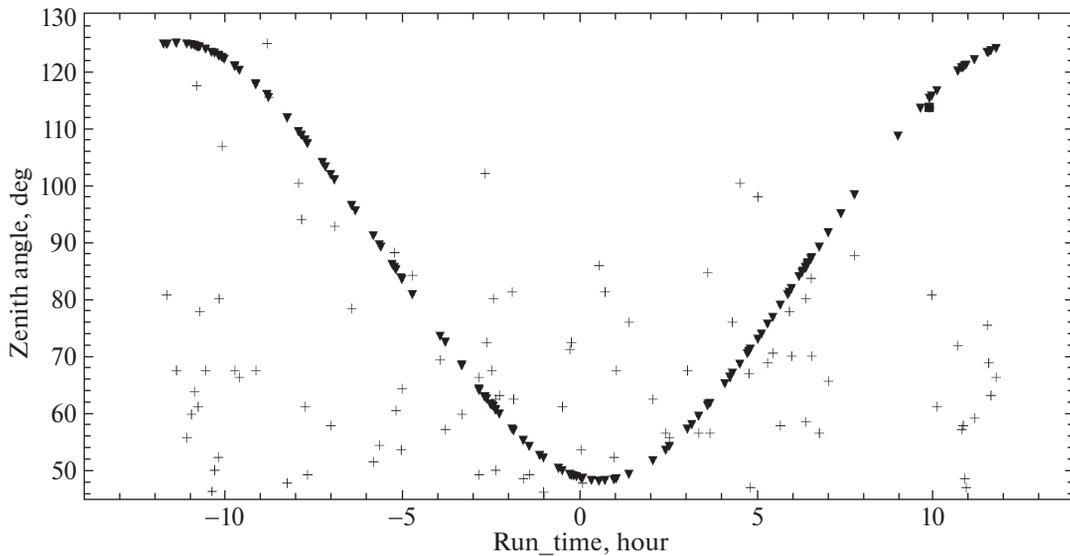


Рис. 8. Траектория источника нейтрино для алерта IC200929A и координаты выделенных каскадов в интервале времени ± 12 ч. Красный прямоугольник соответствует каскаду со значением угла $\psi < 5^\circ$.

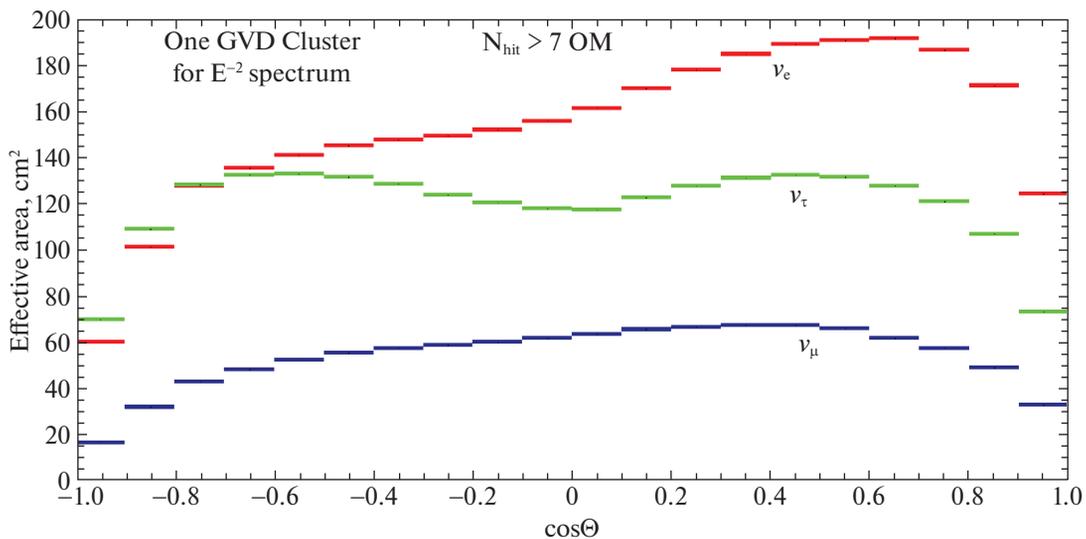


Рис. 9. Эффективная площадь регистрации нейтрино, усредненная по спектру E^{-2} , для трех ароматов нейтрино.

075-15-2020-778). Эта работа была поддержана облачной вычислительной инфраструктурой ОИ-ЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М., Баннаш Р., Бардачова З., Белолаптиков М.А., Бруданин В.Б., Буднев Н.М. и др., Ядерная физика **83**, 511 (2020a).
2. Аврорин и др. (A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannasch, Z. Bardacova, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, et al. (Baikal-GVD Collab.)), Instr. Exper. Tech. **63**, 551 (2020b).
3. Аврорин и др. (A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, N.S. Gorshkov, et al.), EPJ Web of Conf. **207** (2019b).
4. Аврорин и др. (A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, D.Yu. Bogorodsky, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, et al.), PoS EPSHEP2015 **418** (2015).

5. Аврорин и др. (A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov, D. Bogorodsky, N. Budnev, I. Danilchenko, G. Domogatsky, et al.), *Astron. Lett.* **35**, 651 (2009).
6. Алберт и др. (ANTARES Collab.: A. Albert, M. Andre, M. Anghinolfi, G. Anton, M. Ardid, J.-J. Aubert, J. Aublin, B. Baret, et al., IceCube Collab.: M.G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, C. Alispach, K. Andeen, et al.) *Astrophys. J.* **892**, 92 (2020).
7. Арстен и др. (M.G. Aarsten, R. Abbasi, Y. Abdou, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, D. Altmann, et al., (IceCube Collab.)), *Phys. Rev. Lett.* **111**, 021103 (2013a).
8. Арстен и др. (M.G. Aarsten, R. Abbasi, Y. Abdou, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, D. Altmann, et al. (IceCube Collab.)), *Science* **342**, 1242856 (2013b).
9. Арстен и др. (M.G. Aarsten, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, D. Altmann, K. Andeen, et al. (IceCube Collab.)), *Eur. Phys. J. C* **79**, 234 (2019).
10. Арстен и др. (M. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, I.A. Samarai, D. Altmann, et al. (IceCube Collab.)), *Science* **361**, 147 (2018a).
11. Арстен и др. (M. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, I.A. Samarai, D. Altmann, et al. (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* **361**, iss. 6398, 1378 (2018b).
12. Балканов и др. (V. A. Balkanov, I. A. Belolaptikov, L. V. Bezrukov, N. M. Budnev, et al.), *Astropart. Phys.* **12**, 75 (1999).
13. Белолапиков и др. (I.A. Belolaptikov, L.V. Bezrukov, B.A. Borisovets, N.M. Budnev, E.V. Bugaev, A.G. Chensky, I.A. Danilchenko, J.-A.M. Djilkibaev, et al.), *Astropart. Phys.* **7**, 263 (1997).
14. Блоуфас и др. (E. Blaufuss, Th. Kintscher, L. Lu, Ch.F. Tung for IceCube Collab.), *PoS(ICRC2019)* **1021** (2019).
15. Брюн, Радемейкерс (R. Brun and F. Rademakers), *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A* **389**, 81 (1997).
16. Гаррэ и др. (S.A. Garre, F. Versari, A.D. Avrorin, Zhan-Arys M. Dzhilkibaev, M.D. Shelepov, and O.V. Suvorova), <https://indico.fnal.gov/event/19348/contributions/186451/> (2020).
17. Голубков и др. (K. Golubkov, L. Fajt, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, et al.), *PoS(ICRC2019)* **877** (2019).
18. Дворницкий и др. (R. Dvornicky, Z.A.M. Dzhilkibaev, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, et al. (Baikal-GVD Collab.)), *PoS ICRC2019 (2020)* **873** (2019), arXiv:1908.05430 [astro-ph.HE], also in preparation to *Astrophys. J.*
19. Дорник и др. (D. Dornic, J. Brunner, S. Basa, I.A. Samarai, V. Bertin, M. Boer, J. Busto, S. Escoffier, et al., (ANTARES and TAROT Collab.)), *Nucl. Instrum. Meth. A* **S183**, 626 (2011).
20. Заборов и др. (D. Zaborov, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, Z. Bardacova, R. Bannasch, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin et al. (Baikal-GVD Collab.)), *Proc. of ICPPA2020*, arXiv:2011.09209 [astro-ph.HE] (2020).
21. Плавин А.В. и др. (A.V. Plavin, Y.Y. Kovalev, Y.A. Kovalev, and S.V. Troitsky), *Astrophys. J.* **894**, 101 (2020a).
22. Плавин А.В. и др. (A.V. Plavin, Y.Y. Kovalev, Y.A. Kovalev, and S.V. Troitsky), submitted to *Astrophys. J.* 2020, arXiv:2009.08914 [astro-ph.HE] (2020b).
23. Сайт архива (GCN, Gamma-ray Coordination Network), <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3archive.html>.
24. Сайт луйджи (<https://luigi.readthedocs.io>).
25. Сафронов и др. (G. Safronov, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, Z. Bardacova, R. Bannasch, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin et al. (Baikal-GVD Collab.)), *PoS(ICHEP2020)* **606** (2020) and prepared to *Astrophys. J.* (2021).
26. Смит и др. (M.W.E. Smith, D.B. Fox, D.F. Cowena, P. Meszaros, G. Tesic, J. Fixelle, I. Bartos, P. Sommers et al.), *Astron. Part. Phys.* **45**, 56 (2013).
27. Фелдмин, Кузинс (G. Feldman and R. Cousins), *Phys. Rev. D* **57**, 3873 (1998).
28. Шайбонов и др. (B. Shaybonov, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, et al.), *PoS(ICRC2017)* **1046** (2017a).
29. Шайбонов и др. (B. Shaybonov, A.D. Avrorin, A.V. Avrovin, V. Aynutdinov, R. Bannash, I. Belolaptikov, V. Brudanin, N.M. Budnev et al. (Baikal-GVD Collab.)), *PoS (ICRC2017)* **962** (2017b).