

ПОИСК МЮОННЫХ НЕЙТРИНО НА БАКСАНСКОМ ПОДЗЕМНОМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ТЕЛЕСКОПЕ ОТ ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫХ СОБЫТИЙ LIGO/VIRGO/KAGRA

И. Б. Унатлоков, Е. А. Горбачева, Р. М. Гулиев, И. М. Дзапарова, М. М. Кочкаров,
А. Н. Куреня, Е. С. Мартаков, В. Б. Петков, П. С. Стриганов, А. Ф. Янин*

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

Поступила в редакцию 2 мая 2026 г.,
после переработки 10 августа 2026 г.
Принята к публикации 21 августа 2026 г.

18 ноября 2025 г. коллаборация LIGO, Virgo и KAGRA (LVK) завершила проведение четвертого наблюдательного периода. Поиск мюонных нейтрино от областей локализации гравитационно-волновых событий, обнаруженных LVK, проведен на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе по данным всех четырех наблюдательных периодов LVK. В результате поиска не обнаружено совпадений мюонных нейтрино с подтвержденными и значимыми гравитационно-волновыми событиями. Получена оценка ожидаемого количества совпадений со всеми кандидатами в гравитационные волны четвертого наблюдательного периода. Получены ограничения на потоки мюонных нейтрино и антинейтрино от областей локализации гравитационных волн.

Ключевые слова: мюонные нейтрино, гравитационные волны, нейтринная астрофизика, многоканальная астрономия

DOI: 10.31857/S0044451026110077

1. ВВЕДЕНИЕ

Астрофизические источники гравитационных волн, такие как слияния двойных нейтронных звезд или черных дыр, сверхновые с коллапсом ядра, могут вызывать релятивистские потоки, приводящие к нетепловому излучению высокой энергии, в том числе к излучению нейтрино высоких энергий. Интерес к поиску таких нейтрино обусловлен, в частности, и тем, что обнаружение гравитационных волн и нейтрино высоких энергий из общих источников позволит установить связь между динамикой гравитирующих объектов и свойствами релятивистских потоков. Направление прихода мюона, рожденного в реакции взаимодействия мюонного нейтрино с веществом, сильно коррелирует с направлением прихода нейтрино. В зависимости

от энергии нейтрино, регистрируемых конкретной установкой, направление на астрофизический объект может быть восстановлено с точностью не хуже нескольких градусов. Поскольку направления на источник гравитационных волн могут быть восстановлены с точностью до десятков–сотен квадратных градусов, совместное наблюдение гравитационных волн и нейтрино может значительно улучшить локализацию источника, тем самым сделав более осуществимыми последующие электромагнитные наблюдения. Для поиска совпадений гравитационных волн на LVK (LIGO–Virgo–KAGRA) и мюонных нейтрино на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) использованы каталоги гравитационных волн по первым трем наблюдательным периодам [1–4] и события-кандидаты четвертого наблюдательного периода, находящиеся в открытом доступе. Для анализа в рамках данной работы используются зарегистрированные на БПСТ мюонные нейтрино и антинейтрино из нижней полусферы.

* E-mail: unatlokov@inr.ru

2. БАКСАНСКИЙ ПОДЗЕМНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ТЕЛЕСКОП

БПСТ — многоцелевой детектор, предназначенный для исследований в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики [5–7]. БПСТ расположен на Северном Кавказе (Россия) в подземной лаборатории на эффективной глубине $8.5 \cdot 10^4$ г/см² (850 м в.э.). Установка имеет размеры $17 \times 17 \times 11$ м³ и состоит из четырех горизонтальных и четырех вертикальных сцинтилляционных плоскостей. Плоскости покрыты стандартными сцинтилляционными счетчиками, полное число счетчиков в БПСТ 3178. Стандартный счетчик представляет собой алюминиевый контейнер размером $0.7 \times 0.7 \times 0.3$ м³, заполненный жидким органическим сцинтиллятором на основе уайт-спирита C_nH_{2n+2} ($n \approx 9$). Объем сцинтиллятора просматривается одним фотоумножителем ФЭУ-49 с диаметром фотокатода 15 см. Стандартное энерговыделение от мюонов на горизонтальных плоскостях составляет 50 МэВ. С каждого счетчика снимается четыре сигнала. Сигнал с анода ФЭУ используется для измерения времени срабатывания плоскости и измерения энерговыделения до 2.5 ГэВ. Для настройки и контроля коэффициентов усиления ФЭУ используется токовый выход (сигнал с анода ФЭУ через интегрирующую цепочку). Сигнал с 12-го динода поступает на вход дискриминатора-формирователя (так называемый импульсный канал) с порогом срабатывания 8 МэВ и 10 МэВ для внутренних и внешних плоскостей соответственно. Сигнал с пятого динода ФЭУ поступает на вход логарифмического преобразователя, где он преобразуется в импульс, длина которого пропорциональна логарифму амплитуды сигнала. Логарифмический канал позволяет измерять энерговыделение в индивидуальном счетчике в диапазоне 0.5–600 ГэВ.

Триггером для запуска системы регистрации является срабатывание импульсного канала любого счетчика БПСТ. Скорость счета такого триггера 17 с⁻¹. При появлении триггера вся информация о данном событии в онлайн-режиме поступает в ЭВМ, в которой происходит предварительная обработка событий с целью получения информации о текущем состоянии регистрирующей аппаратуры.

2.1. Эксперимент

Конструкция БПСТ позволяет идентифицировать траектории мюонов, пересекающих телескоп,

и определять направление прихода мюона [8]. Точность восстановления направления прихода мюона (угловое разрешение установки) обусловлена геометрией детектора и составляет $\approx 1.6^\circ$. Благодаря достаточно малому потоку мюонов на глубине расположения установки и возможности определять их направление, БПСТ способен регистрировать мюоны, приходящие из нижней полусферы. При этом энергия мюона остается неизвестной.

С увеличением глубины расположения детектора регистрируется меньше мюонов из нижней полусферы, которые являлись бы результатом эффекта рассеяния мюонов, изначально пришедших из направлений сверху. Начиная с некоторой глубины таких событий становится пренебрежимо мало. В таком случае треки из нижней полусферы можно считать мюонами, родившимися в результате взаимодействия мюонного нейтрино с веществом ниже установки, так как все известные компоненты космического излучения, кроме нейтрино, поглощаются на глубине нескольких километров грунта. На глубине расположения БПСТ фон от мюонов, пришедших сверху, полностью исключается для зенитных углов $\theta > 100^\circ$ [9]. При расположении объекта в верхней полусфере поиск мюонных нейтрино в заданном временном интервале также может быть проведен на БПСТ при условии малого фона мюонов с данного направления, т. е. для направлений с достаточно большими толщинами вещества.

Разделение направлений прихода мюонов между верхней и нижней полусферами проводится с помощью времяпролетной методики. Временное разрешение установки при измерении относительных времен пролета между двумя сцинтилляционными плоскостями составляет ≈ 3.5 нс и определяется в основном свойствами счетчика. Для одиночных мюонов из верхней полусферы для 95 % событий восстановленное значение обратной скорости $1/\beta$ ($\beta = v/c$) находится в диапазоне 0.7–1.3 [10]. Этот же интервал, но с отрицательным знаком скорости, используется для отбора мюонов из нижней полусферы, рожденных при взаимодействии нейтрино с веществом в грунте под телескопом. Пороговая энергия регистрируемых БПСТ мюонных нейтрино определяется энергетическими потерями пересекающих телескоп мюонов и составляет 1 ГэВ для используемых условий отбора. С учетом отклонения мюона от первоначальной траектории нейтрино при используемых условиях отбора неопределенность направления нейтрино составляет $\approx 5^\circ$.

3. ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ СОБЫТИЯ

Первый наблюдательный период обсерваторий LIGO, Virgo проходил с 12 сентября 2015 г. по 19 января 2016 г. Второй наблюдательный период проходил с 30 ноября 2016 г. по 25 августа 2017 г. Одиннадцать событий, зарегистрированных во время этих двух периодов, объединены в каталог [1]. Третий наблюдательный период проходил с 1 апреля 2019 г. по 27 марта 2020 г. В течение этого периода 39 событий были занесены в каталог [2], затем этот каталог был изменен — исключены три события и добавлены еще восемь [3]. Всего с учетом исключенных событий во время третьего наблюдательного периода были выделены 82 события [4]. В каталоги занесены события, вероятность астрофизического происхождения которых превышает 0.5. Четвертый наблюдательный период проходил с 24 мая 2023 г. по 18 ноября 2025 г. По результатам первой части четвертого наблюдательного периода выделены 128 событий, занесенных в каталог [11]. События четвертого наблюдательного периода находятся в открытом доступе и также использованы для анализа.

При определении параметров гравитационно-волнового (ГВ) события наблюдаемые данные используются для оценки неизвестных параметров источника с применением разных моделей формирования гравитационных волн («шаблонов формы волны»). Затем определяется, какая модель наиболее подходит к наблюдаемым данным. Поиск нейтринных совпадений с ГВ-событиями проводится в областях, в которых источники гравитационных волн расположены с вероятностью 90 %. Важными параметрами при определении локализации источника являются времена появления ГВ-сигналов на всех детекторах, зарегистрировавших данную гравитационную волну. При одновременной регистрации события разными детекторами проводится триангуляция и определяется область небесной сферы, из которой могла прийти гравитационная волна. Форма получившейся области локализации зависит от выбранного «шаблона формы волны».

Событие GW170817 было идентифицировано с зарегистрированным Fermi-GBM гамма-всплеском GRB 170817A, от которого в дальнейшем было обнаружено электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн [12].

В работе [13] описаны результаты поиска на БПСТ нейтрино в области низких энергий от ГВ-событий GW150914, GW151226, GW170104,

GW170608, GW170814 и GW170817. Для данных событий совпадений обнаружено не было.

Поиск совпадений нейтрино с ГВ-событиями был проведен в обсерваториях IceCube [14–16], Super-Kamiokande [17–19] и ANTARES [20–23]. Ни в одном из этих экспериментов не было обнаружено корреляции нейтринных сигналов с ГВ-событиями. Во всех случаях ограничения на потоки рассчитываются в предположении степенного спектра с показателем 2.

Кроме того, на установке Baikal-GVD был проведен поиск нейтрино от события GW170817 [24]. В направлении источника гравитационной волны (галактики NGC 4993) на установке не было обнаружено нейтринных событий.

3.1. Время между гравитационной волной и нейтрино

На БПСТ поиск нейтринных событий осуществлялся в пределах областей локализации ГВ-событий, в интервале ± 500 с. Этот промежуток выбран как максимально возможное время между гравитационной волной и нейтрино от космических гамма-всплесков [25, 26]. В работе [25] анализ основан на событиях, зарегистрированных в экспериментах BATSE, Swift и Fermi LAT. В интервал 500 с входят:

- 1) 100 с от начала возникновения релятивистского джета внутри звезды до его выхода на поверхность [27];
- 2) 250 с от момента появления прекурсора (гамма-излучения с более слабой интенсивностью) до начала гамма-вспышки;
- 3) 150 с длительности гамма-вспышки.

Предполагается, что в течение всех этапов развития гамма-всплеска возможно рождение как нейтрино, так и гравитационных волн.

3.2. Метод поиска совпадений

Поиск совпадений можно разделить на несколько шагов.

1. Проводится поиск нейтринных событий на БПСТ в пределах ± 500 с от момента регистрации ГВ-события.

2. В случае пересечения по времени проводится проверка на наличие нейтринных событий на БПСТ из области локализации гравитационной волны. Если нейтрино обнаружено — совпадение найдено.

3. Если нейтрино не обнаружено и пятно локализации гравитационной волны пересекается с полем

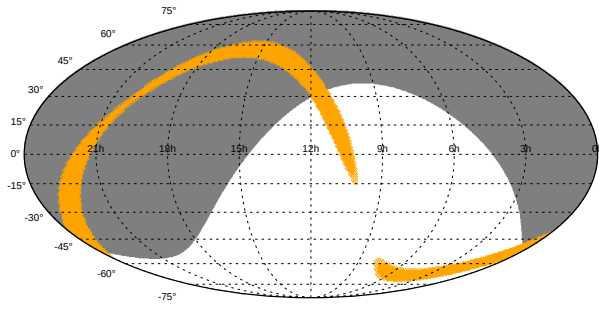


Рис. 1. Поле зрения БПСТ (светлая область) и пятно локализации источника кандидата в гравитационные волны S231231af (четвертый наблюдательный период)

зрения БПСТ, проводится расчет диапазона ограничений на потоки нейтрино внутри области пересечения поля зрения БПСТ и пятна локализации гравитационной волны. В качестве примера на рис. 1 показано пятно локализации кандидата в гравитационные волны S231231af и поле зрения БПСТ в момент его регистрации.

4. РАСЧЕТ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ПОТОКИ

Чтобы получить ограничения на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино в случае отсутствия нейтрино от ГВ-событий, необходимо знать эффективную площадь регистрации нейтрино установкой. Мюоны из нижней полусферы рождаются в реакции неупругого взаимодействия с нуклонами вещества в грунте под установкой:

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X. \quad (1)$$

Эффективную площадь регистрации нейтрино с энергией E_ν , породившего мюон с энергией E_μ ($E_\mu \leq E_\nu$) в реакции (1), можно представить в виде

$$S_{eff}(E_\nu) = \sigma_{CC}(E_\mu, E_\nu) N_{nucl}, \quad (2)$$

где $\sigma_{CC}(E_\mu, E_\nu)$ — компонента заряженного тока в сечении взаимодействия нейтрино с веществом, N_{nucl} — число нуклонов в объеме вещества V под установкой, в котором происходит взаимодействие. Средний атомный номер вещества грунта вокруг БПСТ $\bar{A} = 24$, средняя плотность грунта $\bar{\rho} = 2.7$ г/см³. Соответственно, молярная масса вещества $M_M = 24$ г/моль. Таким образом, число нуклонов в объеме вещества, в котором происходит взаимодействие, можно записать в виде

$$N_{nucl} = N_A \frac{\bar{\rho} V \bar{A}}{M_M}, \quad (3)$$

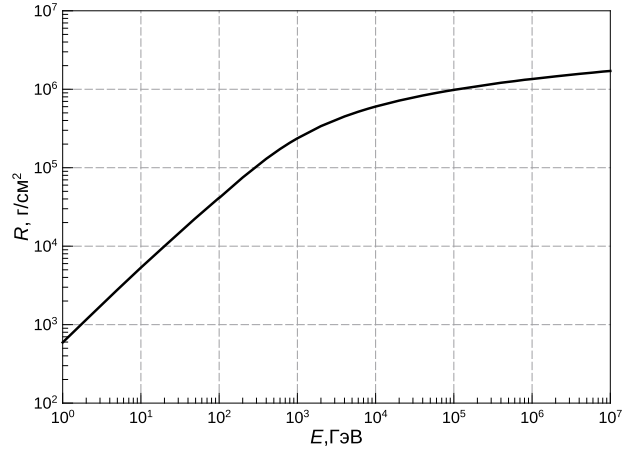


Рис. 2. Зависимость эффективного пробега мюона в грунте Баксанской нейтринной обсерватории от его энергии

где N_A — число Авогадро. Объем вещества, в котором в реакции (1) рождается мюон с энергией E_μ , можно представить как

$$V = S_T R(E_\mu) / \bar{\rho}, \quad (4)$$

где $R(E_\mu)$ — эффективный пробег мюона с энергией E_μ в единицах г/см², $S_T = S_T(\theta, \phi)$ — геометрическая площадь БПСТ под углом (θ, ϕ) . Зависимость эффективного пробега мюона в грунте Баксанской нейтринной обсерватории от энергии в диапазоне 1–10⁷ ГэВ представлена на рис. 2. Значения эффективного пробега в диапазоне 1–100 ГэВ взяты из работы [28], в диапазоне 100–10⁷ ГэВ — из работы [29]. Геометрическая площадь установки для используемых условий отбора (мюон пересекает не менее трех плоскостей БПСТ) была рассчитана методом Монте-Карло в зависимости от направления прихода мюона (θ, ϕ) и приведена на рис. 3.

Предполагая, что мюону передается вся энергия нейтрино, и учитывая параметр $L(h, E_\nu)$, характеризующий ослабление потока в результате взаимодействий нейтрино с веществом на пути длиной $h = h(\theta, \phi)$ при прохождении через Землю, эффективную площадь регистрации нейтрино с энергией E_ν можно записать в виде

$$S_{eff}(E_\nu, \theta, \phi) = N_A \sigma_{CC}(E_\nu) S_T(\theta, \phi) R(E_\nu) L(h, E_\nu). \quad (5)$$

Оценка поглощения нейтрино в Земле была сделана коллаборацией IceCube по 10784 событиям из нижней полусферы [30]. При зенитных углах более 150° и энергиях более 10⁴ ГэВ доля поглощаемых нейтрино превышает 10 %. Для учета поглощения

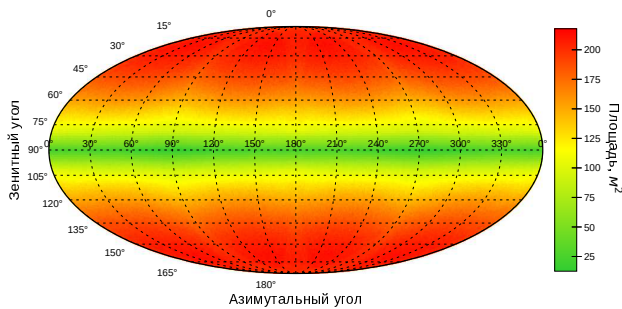


Рис. 3. Зависимость геометрической площади БПСТ от угла для используемых условий отбора

расчет величины $L(h, E_\nu)$ для БПСТ был проведен с использованием алгоритма «muFATE» [31]. Значения сечений взаимодействия взяты из работы [32]. Расчеты проводятся в предположении того, что в рассматриваемом диапазоне энергий ($1-10^5$ ГэВ) сечение взаимодействия нейтрино с нуклоном пропорционально его энергии, $\sigma_{CC} \propto E_\nu$ [33].

На рис. 4 показаны зависимости эффективной площади БПСТ от энергии для нейтрино и антинейтрино при зенитном угле 180° с поглощением и без поглощения в Земле. На рис. 5 показаны зависимости эффективной площади БПСТ от энергии для нейтрино и антинейтрино при зенитном угле 100° с поглощением и без поглощения в Земле. На рис. 5 линии, соответствующие расчетам с поглощением в Земле и без него, накладываются друг на друга во всем диапазоне энергий из-за небольшой разницы между ними.

Чтобы получить ограничение на общий поток мюонных нейтрино и антинейтрино (а в нашем эксперименте можно измерить только общий поток), предположим, следуя работе [34], что их потоки одинаковы.

Для моноэнергетического спектра нейтрино от источника, видимого под углом (θ, ϕ) , из факта отсутствия нейтринных событий на БПСТ можно поставить верхний предел (на 90-процентном доверительном уровне) на интегральный поток мюонных нейтрино и антинейтрино:

$$I_{lim}(E_\nu, \theta, \phi) = \frac{n_{90}}{S_{eff}(E_\nu, \theta, \phi)}, \quad (6)$$

где для распределения Пуассона $n_{90} \approx 2.3$.

Так же, как в работах [14–24], предположим, что dN/dE_ν — энергетический спектр нейтрино от источника, который в соответствии с механизмом ускорения Ферми подчиняется степенному закону

$$\frac{dN}{dE_\nu} = \Phi E_\nu^{-\gamma} \quad (7)$$

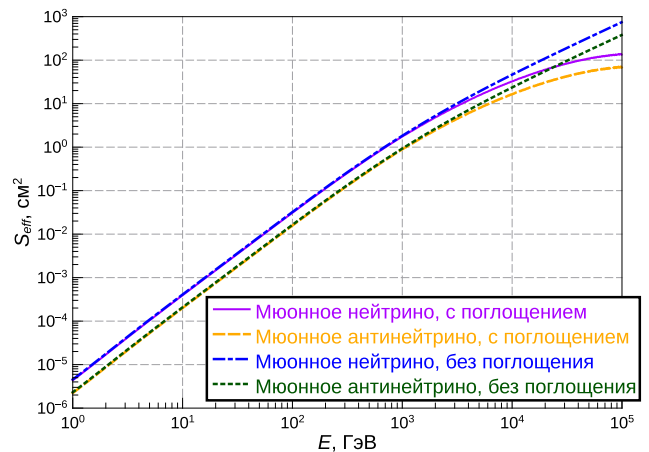


Рис. 4. Зависимости эффективной площади БПСТ от энергии мюонного нейтрино и мюонного антинейтрино для зенитного угла 180° с поглощением и без поглощения в Земле

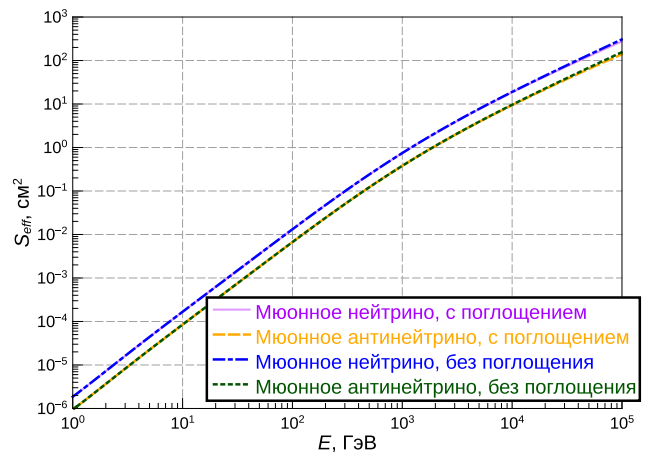


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для зенитного угла 100°

с показателем степени $\gamma = 2$ [35, 36]. В этом случае нормировочный коэффициент $\Phi = E^2 dN/dE_\nu$ имеет размерность ГэВ/см². При отсутствии нейтринных событий, следуя работе [37], можно поставить ограничение на нормировочный коэффициент энергетического спектра нейтрино от ГВ-событий:

$$\Phi_{lim} = \frac{2.3}{\int_{E_\mu^{min}}^{E_\mu^{max}} dE_\nu S_{eff}(E_\nu, \theta, \phi) E_\nu^{-2}}. \quad (8)$$

Для оценки вклада эффекта поглощения нейтрино в Земле в табл. 1 указаны значения нормировочной константы $E^2 dN/dE_\nu$ для общего потока мюонных нейтрино в предположении зенитных углов 100° и 180° с учетом поглощения нейтрино в Земле и без него.

Таблица 1. Значения $E^2 dN/dE_\nu$ для общего потока мюонных нейтрино при зенитных углах 100° и 180° с учетом поглощения нейтрино в Земле и без него

Зенитный угол	$E^2 dN/dE_\nu$ без поглощения, ГэВ/см ²	$E^2 dN/dE_\nu$ с поглощением, ГэВ/см ²
100°	313.8	326.0
180°	128.2	211.6

5. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПЕРИОДЫ
O1, O2, O3

На БПСТ не обнаружено ни одного мюонного нейтрино (антинейтрино), связанного с событиями первых трех наблюдательных периодов детекторов LIGO, Virgo. Получены ограничения на потоки мюонных нейтрино и антинейтрино для всех событий каталогов GWTC-1, GWTC-2, GWTC-2.1 и GWTC-3. Информация по событию GW170817 представлена в работе [38].

На рис. 6 показаны ограничения на потоки для события GW170817 в сравнении с данными установок Baikal-GVD, IceCube и ANTARES в единицах $E^2 dN/dE_\nu$ [ГэВ/см²] [24,37]. Для рис. 6 интеграл (8) разделен по каждой декаде по энергии до 10^5 ГэВ, анализ проведен для интервала между событиями ± 500 с. На рис. 7 показаны ограничения на потоки нейтрино в единицах $E^2 dN/dE_\nu$ для 11 событий из каталога GWTC-2, полученные на БПСТ, в сравнении с результатами Super-Kamiokande [19]. Значения $E^2 dN/dE_\nu$ для рис. 7 получены следующим образом. Внутри пятен локализации гравитационных волн с шагом 1° по зенитному и азимутальному углам проводится поиск точек с максимальной и минимальной геометрической площадью установки. Для обеих точек небесной сферы проводится расчет $E^2 dN/dE_\nu$. Таким образом мы получаем два значения, между которыми должен лежать диапазон всех возможных ограничений на $E^2 dN/dE_\nu$ внутри соответствующего пятна локализации гравитационной волны. Событие GW190503-185404 имеет небольшой диапазон ограничений на $E^2 dN/dE_\nu$, потому что пятно локализации для данного события относительно небольшое. Пятно локализации GW190503-185404 показано на рис. 8.

6. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД O4

Во время четвертого наблюдательного периода к коллаборации LIGO, Virgo присоединился де-

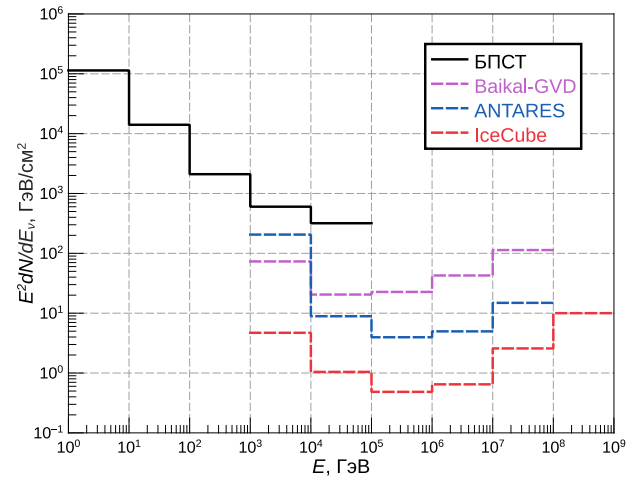


Рис. 6. Ограничения на $E^2 dN/dE_\nu$ для события GW170817 от БПСТ, Baikal-GVD, IceCube и ANTARES при интервале между событиями ± 500 с

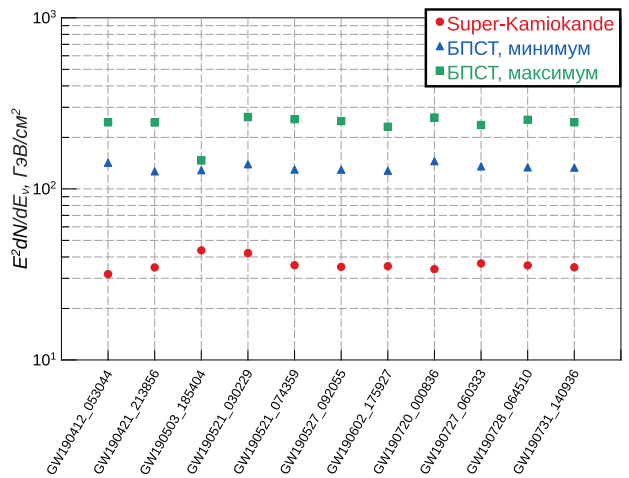


Рис. 7. Ограничения на $E^2 dN/dE_\nu$, полученные на БПСТ (пороговая энергия 1 ГэВ) и Super-Kamiokande (пороговая энергия 1.6 ГэВ). Результаты для мюонов из нижней полусферы в диапазоне энергий до 10^5 ГэВ

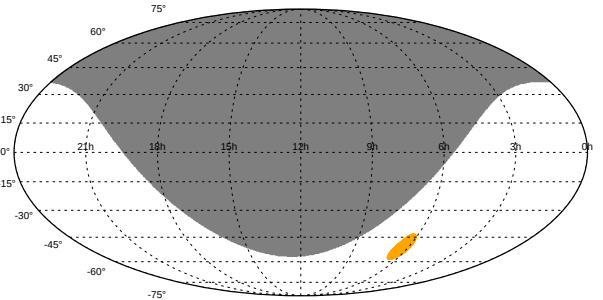


Рис. 8. Поле зрения БПСТ (светлая область) и пятно локализации GW190503-185404

Таблица 2. Совпадения нейтрино на БПСТ с кандидатами в ГВ-события по времени: временные интервалы, площади пятен локализации гравитационных волн, параметры нейтрино на БПСТ

Событие LVK	Площадь пятна локализации		Время относительно нейтрино на БПСТ, с	Координаты нейтрино на БПСТ, пр. восх., скл.	Зенитный угол нейтрино на БПСТ	Ограничение на $E^2 dN/dE_\nu$, ГэВ/см ²
	кв. град.	% небесной сферы				
S251109o	3951	10	−418	344.6°, −51.4°	94.6°	157.5–347.7
S250910co	13694	33	−26	218.7°, −1.0°	101.6°	174.8–346.8
S250902ae	4280	10	402	244.4°, −71.8°	148.2	179.3–336.7
S240520ac	2167	5	81	203.6°, 12.0°	124.8°	172.8–347.2
S240520ad	15445	37	270	203.6°, 12.0°	124.8°	174.3–347.2
S240428bm	4728	12	8	122.3°, −64.7°	117.9°	159.6–325.9
S231102ce	1589	4	−274	7.2°, −62.5°	113.3°	171.1–335.4

тектор KAGRA, что позволило увеличить чувствительность регистрации. Информация о событиях-кандидатах четвертого наблюдательного периода с низкой задержкой размещалась коллаборацией LVK в открытом доступе в сети интернет. За время четвертого наблюдательного периода зарегистрировано более 5 тысяч кандидатов в гравитационные волны. Всего за этот период на БПСТ зарегистрировано 98 мюонных нейтрино (антинейтрино) из нижней полу-

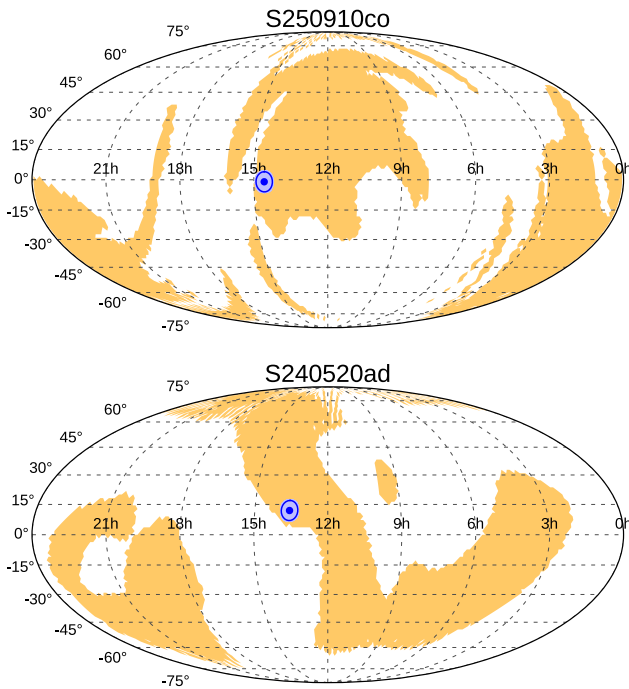
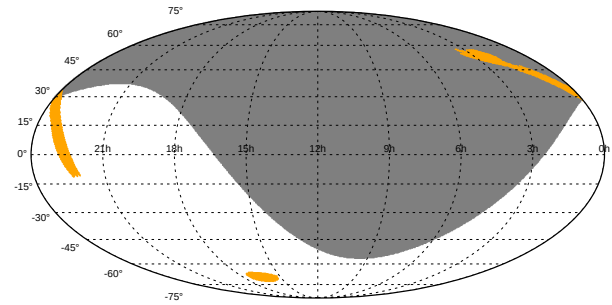
сферы. В предположении, что все события являются случайными, можно посчитать ожидаемое количество совпадений за все время четвертого наблюдательного периода через произведение числа ожидаемых пересечений по времени и вероятности пересечения координат на небесной сфере:

$$N_{exp} = N_T P_L. \quad (9)$$

Число ожидаемых случайных пересечений по времени можно посчитать как

$$N_T = 2R_\nu R_{GW} \Delta t T_{obs}, \quad (10)$$

где R_ν — скорость счета мюонных нейтрино (антинейтрино) на БПСТ ($\approx 1.25 \cdot 10^{-6}$ событий в секунду), R_{GW} — скорость счета ГВ-сигналов ($\approx 6.92 \cdot 10^{-5}$ событий в секунду), Δt — ширина временного окна между событиями (± 500 с), T_{obs} — все время наблюдений (длительность четвертого наблюдательного периода, $\approx 7.86 \cdot 10^7$ с).

**Рис. 9.** События БПСТ (точки), совпавшие с ГВ-сигналами LVK (пятна)**Рис. 10.** Поле зрения БПСТ (светлая область) и пятна локализации S250206dm

Вероятность случайного пересечения координат на небесной сфере P_L определяется с помощью метода Монте-Карло. Проводится розыгрыш нейтрино в поле зрения БПСТ на небесной сфере, затем из всего набора ГВ-событий четвертого наблюдательного периода случайно выбирается одно. Вокруг разыгранной точки для БПСТ выделяется круг ошибки радиусом 5° . Затем определяется, пересекаются ли координаты этих событий. Доля совпавших событий по отношению к общему числу розыгрышей используется далее в качестве вероятности пересечения по координатам. По результатам этого расчета ожидаемое количество случайных пересечений по времени N_T составляет ≈ 6.8 событий. Ожидаемое количество случайных совпадений за весь четвертый наблюдательный период составляет ≈ 1.5 события.

В результате поиска по экспериментальным данным БПСТ и событиям-кандидатам четвертого наблюдательного периода LVK было обнаружено семь совпадений по времени, из которых два совпали по координатам. В табл. 2 указаны времена между нейтрино на БПСТ и кандидатами в ГВ-события для семи временных совпадений, а также площади соответствующих пятен. Кроме того, в табл. 2 указаны экваториальные координаты, зенитные углы соответствующих нейтрино, ограничения на $E^2 dN/dE_\nu$ для общего потока мюонных нейтрино. На рис. 9 показаны совпавшие по условиям поиска координаты нейтрино на БПСТ и пятна локализации соответствующих кандидатов в гравитационные волны LVK.

На данный момент оба ГВ-события, показанные на рис. 9, числятся в списке кандидатов с низкой значимостью.

Кроме того, во время четвертого наблюдательного периода у ГВ-события S250206dm были кандидаты в совпадения с нейтрино от установок IceCube и Baikal-GVD [39]. На установке IceCube было зарегистрировано два нейтринных события с разницей по времени -109.85 с и 289.12 с относительно S250206dm (из времени нейтринного события вычтено время появления ГВ-сигнала) [40]. На телескопе Baikal-GVD было три кандидата: одно событие каскадного типа, два события трековые [41]. Эти кандидаты не попали в область локализации S250206dm и пришли из разных областей небесной сферы. На БПСТ от этого события не найдено ни одного кандидата в совпадения. На рис. 10 показана область локализации S250206dm и поле зрения БПСТ в момент регистрации этого ГВ-события.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам поиска нейтрино на БПСТ от ГВ-событий первых трех наблюдательных периодов LIGO, Virgo не найдено ни одного совпадения. Поиск нейтрино на БПСТ от кандидатов в гравитационные волны четвертого наблюдательного периода LVK выявил семь совпадений по времени, из которых два попали в область локализации гравитационной волны. События-кандидаты LVK, совпавшие с нейтрино на БПСТ, на данный момент не числятся в списке значимых. Для всех событий получены ограничения на нормировочную константу Φ .

Благодарности. Авторы признательны рецензенту за тщательный анализ работы и полезные рекомендации, которые позволили лучше раскрыть тему.

Финансирование. Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный скинтилляционный телескоп (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука» (грант № 075-15-2024-541).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Вклад авторов равноценен.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al., Phys. Rev. X **9**, 031040 (2019), arXiv: 1811.12907v3.
2. R. Abbott, T. D. Abbott, S. Abraham et al., Phys. Rev. X **11**, 021053 (2021), arXiv: 2010.14527v3.
3. R. Abbott, T.D. Abbott, F. Acernese et al., arXiv: 2108.01045v2.
4. R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese et al., arXiv: 2111.03606v2.
5. E. N. Alekseev, V. V. Alexeyenko, Yu. M. Andreyev et al., Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan **10**, 276 (1979).
6. E. N. Alekseev, L. N. Alekseeva, V. N. Bakatanov et al., Phys. Part. Nucl. **29**, 254 (1998) [Е. Н. Алексеев, Л. Н. Алексеева, В. Н. Бакатанов и др., ЭЧАЯ **29**, 631 (1998)].

7. Yu. F. Novoseltsev, M. M. Boliev, I. M. Dzaparova et al., *Astropart. Phys.* **117**, 102404 (2020), arXiv: 1907.03019v1.
8. A. E. Chudakov, B. A. Makoev, Yu. V. Malovichko et al., *Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan* **10**, 287 (1979).
9. M. M. Boliev, A. V. Butkevich, I. M. Dzaparova et al., *Phys. Part. Nucl.* **49**, 585 (2018) [М. М. Болиев, А. В. Буткевич, В. И. Волченко и др., *ЭЧАЯ* **49**, 1025 (2018)].
10. Yu. M. Andreyev, A. E. Chudakov, B. A. Makoev et al., *Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan* **10**, 184 (1979).
11. A. G. Abac, I. Abouelfettouh, F. Acernese et al., arXiv: 2508.18082v2.
12. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017), arXiv: 1710.05832v1.
13. V. B. Petkov, M. M. Boliev, I. M. Dzaparova et al., *J. Phys. Conf. Ser.* **1181**, 012058 (2019).
14. M. G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams et al., *Astrophys. J. Lett.* **898**, L10 (2020), arXiv: 2004.02910v2.
15. D. Veske, R. Abbasi, M. Ackermann et al., *PoS ICRC2021*, 950 (2021), arXiv: 2107.09663v1.
16. R. Abbasi, M. Ackermann, J. Adams et al., *Astrophys. J.* **944**, 80 (2023), arXiv: 2208.09532v3.
17. K. Abe, K. Haga, Y. Hayato et al., *Astrophys. J. Lett.* **830**, L11 (2016), arXiv: 1608.08745v1.
18. K. Abe, C. Bronner, Y. Hayato et al., *Astrophys. J. Lett.* **857**, L4 (2018), arXiv: 1802.04379v2.
19. K. Abe, C. Bronner, Y. Hayato et al., *Astrophys. J.* **918**, 78 (2021), arXiv: 2104.09196v2.
20. S. Adrián-Martínez, A. Albert, M. André et al., *Phys. Rev. D* **93**, 122010 (2016), arXiv: 1602.05411v3.
21. A. Albert, M. André, M. Anghinolfi et al., *Eur. Phys. J. C* **77**, 911 (2017), arXiv: 1710.03020v1.
22. A. Albert, M. André, M. Anghinolfi et al., *Eur. Phys. J. C* **80**, 487 (2020), arXiv: 2003.04022v4.
23. A. Albert, S. Alves, M. André et al., *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2023**(04), 004 (2023), arXiv: 2302.07723v1.
24. A. D. Avrorin, A. V. Avrorin, V. M. Aynutdinov et al., *JETP Lett.* **108**, 787 (2018), arXiv: 1810.10966v1 [А. Д. Аврорин, А. В. Аврорин, В. М. Айнутдинов и др., *Письма в ЖЭТФ* **108**, 803 (2018)].
25. B. Baret, I. Bartos, B. Bouhou et al., *Astropart. Phys.* **35**, 1 (2011), arXiv: 1101.4669v1.
26. S. Kimura, K. Murase, P. Mészáros et al., *Astrophys. J. Lett.* **848**, L4 (2017), arXiv: 1708.07075v2.
27. S. Horiuchi and S. Ando, *Phys. Rev. D* **77**, 063007 (2008), arXiv: 0711.2580v2.
28. S. P. Mikheev, *Diss. ... Candidate of Phys.-Mathem. Sci., INR RAS, Moscow (1982)* [С. П. Михеев, *Дисс. ... канд. физ.-матем. наук, ИЯИ АН СССР, Москва (1982)*].
29. V. V. Makarov, A. A. Lagutin, A. G. Prokopets et al., *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Rome, Italy* **1**, 630 (1995).
30. M. G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams et al., *Nature* **551**, 596 (2017), arXiv: 1711.08119v1.
31. A. C. Vincent, C. A. Argüelles, and A. Kheirandish, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2017**(11), 012 (2017), arXiv: 1706.09895v2.
32. Y. Hayato, *Acta Phys. Polon. B* **40**, 2477 (2009).
33. D. K. Choudhury and P. K. Dhar, arXiv: 1103.3788v1.
34. M. G. Aartsen, K. Abraham, M. Ackermann et al., *Astrophys. J.* **809**, 98 (2015), arXiv: 1507.03991v2.
35. T. K. Gaisser, F. Halzen, and T. Stanev, *Phys. Rep.* **258**, 173 (1995), arXiv: hep-ph/9410384v1.
36. A. R. Bell, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **182**, 147 (1978).
37. A. Albert, M. André, M. Anghinolfi et al., *Astrophys. J. Lett.* **850**, L35 (2017), arXiv: 1710.05839v2.
38. M. M. Boliev, A. V. Butkevich, I. M. Dzaparova et al., *J. Phys. Conf. Ser.* **1787**, 012034 (2021), arXiv: 1907.05183v1.
39. GraceDB: Superevent S250206dm. <https://gracedb.ligo.org/superevents/S250206dm/view/> (дата обращения: 06.08.2026)
40. GCN Circular 39176: LIGO/Virgo/KAGRA S250206dm. <https://gcn.nasa.gov/circulars/39176> (дата обращения: 06.08.2026)
41. V. Ya. Dik and O. V. Suvorova, *Proc. 39th Int. Cosmic Ray Conf.* **501**, 921 (2025).

Search for Muon Neutrinos at the Baksan Underground Scintillation Telescope from LIGO/Virgo/KAGRA Gravitational-Wave Events

*I. B. Unatlov**, *E. A. Gorbacheva*, *R. M. Guliev*, *I. M. Dzaparova*, *M. M. Kochkarov*,
A. N. Kurennya, *E. S. Martakov*, *V. B. Petkov*, *P. S. Striganov*, *A. F. Yanin*

Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences
117312, Moscow, Russia

*E-mail: unatlov@inr.ru

Received May 02, 2026

Revised August 10, 2026

Accepted August 21, 2026

Abstract

On November 18, 2025, the LIGO, Virgo, and KAGRA (LVK) collaboration completed its fourth observing run. A search for muon neutrinos from the localization regions of gravitational-wave events detected by the LVK was conducted at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Data from all four LVK observing runs were used. As a result of the search, no coincidences of muon neutrinos with confirmed and significant gravitational-wave events were detected. An estimate of the expected number of coincidences with all gravitational-wave candidates from the fourth observing run was obtained. Limits on muon neutrino and antineutrino fluxes from gravitational-wave localization regions were obtained.

Keywords: Muon neutrinos, gravitational waves, neutrino astrophysics, multi-messenger astronomy

Acknowledgements. The authors are grateful to the reviewer for the detailed analysis of the manuscript and useful recommendations, which helped to better present the topic.

Funding. This work was carried out at the Unique Scientific Facility Baksan Underground Scintillation Telescope (Center for Collective Use Baksan Neutrino Observatory, Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences) with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the national project «Science» under Contract No. 075-15-2024-541.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

Authors' contributions. The contributions of the authors are equal.