

На правах рукописи

Суворова Ольга Васильевна

**Исследование потоков нейтрино
астрофизической природы
в экспериментах первой очереди
нейтринного телескопа Baikal-GVD**

1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2024

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

Официальные оппоненты:

Быков Андрей Михайлович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, руководитель Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики.

Лутовинов Александр Анатольевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, заместитель директора.

Дворников Максим Сергеевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, и.о. заведующего теоретическим отделом, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте по адресу: <http://www.inr.ru>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность исследования потока нейтрино астрофизической природы в экспериментах первой очереди глубоководного телескопа Baikal-GVD [1], [A5] состоит в прямой связи с решением фундаментальной проблемы современной физики: установления источников и механизмов физических процессов ускорения космических частиц до высоких и сверхвысоких энергий, измеряемых в потоках космических лучей на установках широких атмосферных ливней и в наблюдениях природных пэватронов обсерваториями гамма-излучения. Астрофизические нейтрино высоких энергий, то есть с энергиями на много порядков выше энергий солнечных, сверхновых, атмосферных и ускорительных нейтрино, чувствительны к физике как в рамках Стандартной модели (СМ), так и за ее пределами, благодаря механизмам их образования и распространению на космологические расстояния. В астрофизике эти нейтрино являются ключом к пониманию происхождения космических лучей и гамма-лучей самых высоких энергий, давая представление об областях в источнике, непрозрачных для электромагнитного излучения. В физике элементарных частиц они могут ответить на важные открытые вопросы: какова природа темной материи (ТМ)? Есть ли новые частицы и взаимодействия при самых высоких энергиях? Существуют ли новые фундаментальные симметрии?

За прошедшее десятилетие важнейшим достижением является обнаружение астрофизической компоненты в диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий от десятков ТэВ до ПэВ на подледном телескопе размером кубический километр IceCube [2]. Современный статус измерений потока нейтрино в широком диапазоне высоких энергий на телескопе IceCube, с разными условиями отбора событий, показывает, что для энергий от 1 ТэВ до 100 ТэВ данные измеренного потока согласуются с ожидаемым суммарным потоком атмосферных нейтрино и антинейтрино, мюонных и электронных, с их падающим спектром по энергии от распада π и K -мезонов, как $E^{-3,7}$. В области энергий от 100 ТэВ до ПэВ ожидаемый вклад генерации нейтрино в атмосфере от реакций прямого распада тяжелых лептонов превышает поток нейтрино от стандартных π и K каналов распада. Однако он недостаточен для объяснения измеренного потока высокоэнергичных событий, выделенных на IceCube по критериям отбора событий HESE [3, 4], то есть с вершиной взаимодействия нейтрино внутри объема детектора, и восходящих мюонных событий, пересекающих телескоп без взаимодействия. Результаты анализа данных HESE

за 6 лет и 7,5 лет и высокоэнергичных мюонных нейтрино за 9,5 лет свидетельствуют, что энергетический спектр становится более жестким [5, 6, 7] из-за присутствия астрофизических нейтрино, подтверждая вывод IceCube, ранее сделанный по их первым выделенным событиям с энергиями порядка нескольких петаэлектронвольт. При этом наклон энергетического спектра астрофизической компоненты скорее около $-2,5$, чем -2 , в пределах неопределенности одна сигма. Для обнаружения нейтрино с энергией в области эксаэлектронвольт эффективные размеры таких детекторов требуется увеличить до 10 км^3 и более [8].

В исследовании природных потоков нейтрино высоких энергий и решении отмеченных выше задач, важнейшую роль играет строящийся с 2016 года в озере Байкал глубоководный телескоп второго поколения – Baikal-GVD [A1] и являющийся на сегодняшний день (2024 год) самым крупномасштабным действующим телескопом Северного полушария [A5] с объемом более $0,6 \text{ км}^3$ в регистрации нейтрино с энергией порядка пэваэлектронвольт. Его запуск в объеме кубического километра намечен на 2027 - 2028 год. Местом расположения Байкальской нейтринной обсерватории является южная часть озера Байкал, на 106-м километре Кругобайкальского участка ВСЖД, на расстоянии порядка 4 км от берега. Географические координаты центра установки соответствуют $51^{\circ}50'$ с.ш., $104^{\circ}20'$ в.д. Глубина озера в этом районе сформирована осадочным илом и составляет примерно 1366 м. Высокий уровень прозрачности воды озера Байкал, значительная глубина и возможность использования ледяного покрова для развертывания глубоководной аппаратуры предоставляют уникальные возможности для создания крупномасштабного нейтринного телескопа в озере Байкал. Строительство телескопа Baikal-GVD из отдельных кластеров, функционирующих как независимые детекторы в режиме синхронизации времени между всеми кластерами [9], позволяет вести набор данных с самых первых сезонов запуска установки с последующим наращиванием общего рабочего объема до кубического километра. Анализ экспериментальных данных, накопленных за несколько лет в период развертывания телескопа Baikal-GVD с марта 2018 по февраль 2022 года, позволил получить результаты, представленные в диссертации, о подтверждении астрофизической компоненты нейтрино с энергиями выше десятков ТэВ [A10] и свои первые наблюдательные указания [A11], [A12] на такие вероятные их источники, как радио блазары и микрокварзары [10]. Факт экспериментального обнаружения в диффузном потоке компоненты астрофизических нейтрино к настоящему времени оставляет открытым вопрос прямого наблюдения аст-

рофизических тэватронов и пэватронов, как источников потока нейтрино. На Baikal-GVD поиск источников ведется, в том числе, в режиме реального времени [A3] и обмене оповещениями (алертами) о регистрации астрономическими телескопами активности астрофизических объектов в электромагнитном излучении или о гравитационных событиях, а также в проявлении темной материи и в ряде других задач. Объяснение природы неизлучающей материи во Вселенной остаётся фундаментальной проблемой современной физики [A2] со времени анализа астрономических измерений в 30-х годах прошлого столетия и возникшей тогда гипотезы существования темной материи (ТМ) [11]. В настоящее время в экспериментах поиска сигнала от частиц ТМ используется модельно независимый метод анализа, где не конкретизируется гипотеза происхождения массивных слабо взаимодействующих частиц (weakly interacting massive particles, WIMP, ВИМП), но учитывается зависимость от массы частицы и от канала их аннигиляции или распада. В данной работе выполнен расчет ограничений на величину потоков нейтрино от аннигиляции ВИМП, накопленных в Солнце за время существования Солнечной системы [A22], в центре Галактики [A23], в карликовых сфероидальных галактиках и в галактике Большое Магелланово Облако [A25] по данным Байкальского глубоководного телескопа НТ200 с порогом регистрации мюонных нейтрино от 10 ГэВ и оценка чувствительности проекта Baikal-GVD к потоку нейтрино от аннигиляции ВИМП в центре Галактики [A24].

Цели диссертационной работы и задачи исследования:

Целью является измерение потока нейтрино в области энергий ТэВ - ПэВ по данным Baikal-GVD за время развертывания телескопа в 2018-2021 гг. При этих энергиях обнаружение нейтрино астрофизической природы в диффузном потоке демонстрирует эксперимент IceCube, начиная с данных 2011 года, что стимулирует развитие мультиволнового (мульти-мессенджер) подхода в идентификации источников астрофизических нейтрино. В задачах мульти-мессенджер обмена данными **целями** являются: формирование в режиме реального времени оповещения (алерт) о нейтринном событии, выделенном по критериям отбора кандидата на астрофизическое происхождение; корреляционный анализ по внешнему оповещению о сигнале в направлении вероятного источника нейтрино и вывод о верхнем пределе на плотность потока от него. В поиске сигнала от частиц темной материи **целями** исследования являются расчет потоков нейтрино в области энергий ГэВ-ТэВ в направлении потенциально ярких источников аннигиляции или распада гипотетических частиц темной материи – центр Галактики, Солнце, карликовые сфероидальные га-

лактики – и вывод ограничения на скорости процессов аннигиляции по данным байкальского телескопа NT200 с нижним порогом по энергии нейтрино 10 ГэВ.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие задачи:

1. Моделирование прохождения нейтрино высоких энергий в веществе;
2. Моделирование отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде;
3. Разработка критериев выделения ливней из фоновых событий от прохождения атмосферных мюонов и мюонных групп из верхней полусферы;
4. Разработка программ автоматизированной калибровки в быстром режиме временных привязок измерительных каналов на всех кластерах установки, для любого количества оптических модулей;
5. Выделение каскадных событий с энергиями выше десятков ТэВ в анализе данных телескопа Baikal-GVD за сезоны 2018-2021 годы;
6. Вычисление показателя спектра из распределений измеренных ливней по энергии в данных Baikal-GVD за сезоны 2018-2021 годы;
7. Анализ ливневых событий по триггеру оповещения от других установок в системе мульти-мессенджер;
8. Определение ограничения на поток нейтрино от предполагаемых астрофизических источников;
9. Определение ограничения на поток нейтрино от предполагаемых источников темной материи.

Методы исследования Исследования выполнялись в глубоководных условиях оз. Байкал на нейтринном телескопе с системой регистрации черенковского излучения. Алгоритмы подавления шума и выбор необходимых сигналов для анализа выполнялись с использованием численных методов, включая метод максимального правдоподобия и метод Монте-Карло. В анализе импульсов использовался метод дискриминации событий по времени

прихода импульсов в соответствии со скоростью распространения света в воде оз. Байкал. Использовались методы статистического анализа данных для Пуассоновой статистики, в том числе оценки значимости и уровни достоверности, применялся метод бутстрэппинга для поиска сигнала в направлении потенциальных астрофизических источников темной материи.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика выделения событий от ливней высоких энергий из экспериментальных данных Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD и выполнен анализ данных, накопленных за период с апреля 2018 года по март 2022 года с целью выделения событий от нейтрино астрофизической природы. Выделено 25 ливневых событий-кандидатов на астрофизические нейтрино с направлениями по всей небесной сфере.
2. Из результатов анализа энергетического и углового распределения одиннадцати восходящих ливневых событий сделан вывод о существовании диффузного потока нейтрино астрофизической природы на уровне достоверности 99,76%.
3. Определен показатель степенного энергетического спектра диффузного потока нейтрино с равновесным 1:1:1 отношением ароматов нейтрино из анализа параметров 11 восходящих ливневых событий методом функции максимального правдоподобия и с учетом систематических ошибок. Полученное значение показателя $-2,58$ согласуется с данными IceCube в пределах стандартного отклонения.
4. Выявлены два выделенных направления в распределении 25 нейтринных событий на небесной сфере. Вычислены вероятность астрофизической природы восходящего события с энергией выше 200 ТэВ из направления в окрестности радио блазара TXS-0506+056 и вероятность случайного совпадения нейтринных событий в триplete из окрестности микроквазара LSI 061+303.
5. Разработана и реализована процедура формирования онлайн оповещений Baikal-GVD о нейтринных событиях высоких энергий с информацией о времени, направлении, энергии, вероятности соответствия фону по статистике Пуассона и сигналности по степенному спектру сигнала E^{-2} .

6. Разработана и реализована процедура автоматического слежения за нейтринными алертами телескопа ANTARES и телескопа IceCube на основе быстрой обработки данных Baikal-GVD с минимальной задержкой 3 мин во временных окнах ± 500 сек, ± 1 ч, ± 12 ч, ± 1 день. Выполнен анализ данных Baikal-GVD по поиску событий ассоциируемых с алертами телескопов ANTARES и IceCube.
7. Обнаружено совпадение направления прихода нейтринного события Baikal-GVD с энергией 43 ТэВ с направлением на радио блазар PKS 0735+178 в пределах углового разрешения в период активности источника в электромагнитном спектре и через 4 часа после оповещения о нейтрине IC211208A. Вычислены значимости совпадения.
8. Получено ограничение на плотность потока нейтрино с показателем спектра -2 от источника в галактике NGC4993 в момент времени гравитационного события GW170817 и времени послесвечения.
9. Установлены экспериментальные ограничения сверху на 90% доверительном уровне методами функции максимального правдоподобия на сечения упругого рассеяния ВИМП на нуклонах в Солнце и на сечения аннигиляции ВИМП в наблюдении направлений потенциально ярких астрофизических объектов скопления неизлучающего вещества таких как Центр Галактики, галактика Большое Магелланово Облако и темные сфероидальные галактики по данным телескопа HT200.

Научная новизна:

1. Впервые создана база данных ливневых событий на Baikal-GVD с энергией выше 60 ТэВ для нисходящих ливней и выше 15 ТэВ для восходящих ливней.
2. Впервые получено подтверждение на уровне три сигма обнаруженной ранее телескопом IceCube астрофизической компоненты нейтрино в диффузном потоке по выделенным на Baikal-GVD ливневым событиям.
3. Впервые вычислен показатель одностепенного спектра нейтрино в диффузном потоке по выделенным на Baikal-GVD ливневым событиям из нижней полусферы с энергией выше 15 ТэВ.
4. Впервые байкальский нейтринный эксперимент Baikal-GVD указывает на идентификацию астрофизических нейтрино: каскадное событие из нижней полусферы с энергией выше 200 ТэВ вблизи блазара TXS 0506+056 и

кластеризация трех нисходящих ливней по направлению галактического микроквара LSI 061+303.

5. Впервые сформирован формат для вывода нейтринных алертов Baikal-GVD в режиме реального времени по разным категориям реконструкции событий.
6. Впервые байкальский нейтринный эксперимент Baikal-GVD в режиме онлайн принимал и анализировал алерты от нейтринного телескопа ANTARES.
7. Впервые в рамках участия в международной программе мультимессенджер проводился корреляционный анализ данных Baikal-GVD с нейтринными алертами от IceCube и другим оповещениям по сети GCN, включая гамма-вспышки, оптические транзиенты и гравитационно-волновые события.
8. Впервые получены ограничения сверху на плотность потока нейтрино в направлении потенциальных источников по внешним нейтринным алертам.
9. Впервые в режиме реального времени зарегистрировано совпадение направлений нейтринного события с внешним алертом от IceCube в установленном временном окне 12 ч и с направлением на радио блазар PKS 0735+178 в период его активности в электромагнитном спектре.
10. Впервые получено ограничение сверху на плотность потока нейтрино от галактики NGC4993 в гравитационном событии GW170817, где при слиянии двух нейтронных звезд возникла гравитационная волна.
11. Впервые выполнено моделирование отклика телескопа НТ-200 с порогом по энергии 10 ГэВ на сигнал от источников аннигиляции гипотетических частиц темной материи ВИМП в Солнце и получены ограничения сверху на 90% д.у. на сечения упругого рассеяния ВИМП на нуклоне.
12. Впервые по данным нейтринного телескопа НТ200 с пороговой энергией 10 ГэВ получены ограничения сверху на 90% д.у. на сечения самоаннигиляции гипотетических частиц темной материи ВИМП в потенциально ярких их источниках: в центре Галактики, в 22 карликовых сфероидальных темных галактиках и галактике Большое Магелланово облако.

Практическая значимость диссертационной работы определяется тем, что полученные результаты по измерению диффузного потока нейтрино используются для подтверждения присутствия в нем астрофизической компоненты. Эффективность алгоритма реконструкции ливневых событий позволяет анализировать данные в режиме реального времени. Полученные указания на совпадения нейтрино с радио блазарами, известными по их активности на высоких частотах, а также полученное ограничение на поток нейтрино от столкновения нейтронных звезд, могут использоваться для проверки гипотез о высокоэнергетических процессах в астрофизических источниках. Полученные ограничения на сечения само-аннигиляции и рассеяния на нуклонах гипотетических частиц темной материи в направлении потенциально ярких источников используются в многоканальном анализе мировых данных по поиску сигнала и идентификации природы скрытой массы Вселенной. Все разработанные алгоритмы анализа данных применимы к увеличивающемуся объему телескопа и к новым физическим задачам.

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается тем, что приведенные в диссертации результаты моделирования отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде тестировались по искусственным источникам света, с глубоководными лазерами и светодиодными матрицами. Расчеты сечений нейтрино в реакциях рассеяния на нуклонах и численное моделирование прохождения нейтрино в веществе сравнивалось с расчетами в аналогичных работах в публикациях, включая диссертационные работы на байкальском телескопе NT200 [12]. В расчетах по теме поиска сигнала темной материи использовались авторские материалы кандидатской диссертации [13], которые были апробированы с экспериментальными данными подземного телескопа БПСТ [14], [15] и в оценках чувствительности для глубоководного телескопа ANTARES [16], а также в низкофоновом эксперименте ULTIMA [17]. Все полученные результаты с верхними ограничениями на сечения рассеяния частиц темной материи ВИМП на протонах и на частоту аннигиляции ВИМП в астрофизических объектах по данным Байкальского глубоководного NT200 включены в обзоры достижений в физике частиц и фундаментальных взаимодействий Particle Data Group (PDG) в разделе «WIMP and Dark Matter Searches» [18], [19]. По теме обмена оповещениями в многоволновом поиске сигнала внешние алерты от ANTARES принимались онлайн непосредственно от триггерной системы этого телескопа. При регистрации совпадения с алертом от IceCube IC211208A и с активностью блазара

PKS 0735+178 от Baikal-GVD было отправлено оповещение в The Astromer's telegram [20].

Апробация работы. Исследования, приведенные в диссертации, обсуждались и докладывались автором на регулярных (два раза в год) рабочих совещаниях участников международного проекта Baikal-GVD; на международном специализированном комитете по астрофизике (SAC) и техническом консультативном совете (ТАВ) Глобальной сети больших нейтринных телескопов (Global Neutrino Network, GNN); на семинарах отдела ЛВЭНА и лаборатории НАВЭ ИЯИ; на семинаре Отдела внегалактической астрономии ГАИШ; на совместном семинаре научных групп Baikal-GVD и LHAASO, на семинарах научных групп ANTARES и KM3NeT в Центре исследований физики частиц в Марселе (CPPM) и Институте физики частиц в Валенсии (IFIC); на семинаре научной группы ULTIMA в Институте физики конденсированных сред имени Нееля (Néel, CNRS/UJF) в Гренобле. Основные результаты, приведенные в диссертации, были доложены в виде приглашенных, устных и стендовых докладов на всероссийских и международных рабочих совещаниях и конференциях:

1. “Baikal-GVD status report”, приглашенный доклад, Bochum, Германия, (24 марта 2024), MANTS 2024, GNN workshop on Neutrino Physics and Astrophysics.
2. “On characterizing galactic diffuse flux: data and plans”, устный доклад, Bochum, Германия, (25 марта 2024), MANTS 2024, GNN workshop on Neutrino Physics and Astrophysics.
3. “Follow-up of alerts in search for multi-messenger sources with Baikal-GVD neutrino telescope”, стендовый доклад, Seoul, Южная Корея, (2022), The 30th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics.
4. “Dark Matter searches with Baikal NT and GVD”, устный доклад, Гранада, Испания, (2022), The 3rd GNN Workshop on Indirect Dark Matter Searches with Neutrino Telescopes, Dark Ghost2022.
5. “Multi-messenger studies with the Baikal-GVD telescope”, устный доклад, Валенсия, Испания (2021), GNN Workshop on Very Large Volume Neutrino Telescopes, VLVnT2021.

6. "Multi-messenger and real-time astrophysics with the Baikal-GVD telescope", устный доклад, Берлин, Германия (2021), The 37th International Cosmic Rays Conference- Astoparticle Conference, ICRC2021.
7. "ANTARES - Baikal GVD Alerts Analysis", стендовый доклад, Берлин, Германия (2021), ICRC2021.
8. "Baikal and GVD", приглашенный доклад, Венеция, Италия (2019), XVIII International Workshop on Neutrino Telescopes, NEUTEL2019.
9. "The progress in the construction and operation of the Baikal-GVD", приглашенный доклад, Ченгду, Китай (2021), TeV Particle Astrophysics, TEVPA2021.
10. "Recent progress of the Baikal-GVD project", устный доклад, Гент, Бельгия (2019), The European Physical Society Conference on High Energy Physics, EPS-HEP2019.
11. "BSM searches with Baikal", устный доклад, Уппсала, Швеция (2019), The 4th Workshop on Particle Physics with Neutrino Telescopes (PPNT2019).
12. "Status of Baikal-GVD and its multi-messenger program", приглашенный доклад, Шанхай, Китай (2019), Cosmic Neutrinos and Multi-messenger Workshop "CosNuMM2019".
13. "Baikal-GVD multi-messenger program", устный доклад, Марсель, Франция (2019), Town Hall KM3Net meeting.
14. "Dark Matter: results of the Baikal neutrino experiment", устный доклад, Брюссель, Бельгия, (2018), The 2rd GNN Workshop on Indirect Dark Matter Searches with Neutrino Telescopes, Dark Ghost2018.
15. "Baikal-GVD neutrino experiment", приглашенный доклад, Москва (2018), The 9th international Workshop on Air Shower Detection at High Altitudes, WHASD2018.
16. "Baikal-GVD: first results and prospects", устный доклад, Рим, Италия (2018), The 7th Roma International Conference on AstroParticles Physics, RICAP2018.
17. "Байкальский нейтринный эксперимент. Глубоководный детектор гигатонного объема Baikal-GVD", Долгопрудный (2017), ", 60-я Научная конференция МФТИ.

18. "Baikal-GVD and it's extension", устный доклад, Токио, Япония (2016), The 1st Neutrino Oscillation Tomography Workshop.
19. "Baikal-GVD: first cluster Dubna", устный доклад, Вена, Австрия (2015), The European Physical Society Conference on High Energy Physics, EPS-HEP2015.
20. "Status of indirect dark matter search with neutrino telescopes", устный доклад, Валдай (2015), The 2nd International Workshop on Prospects of Particle Physics: Neutrino Physics and Astrophysics.
21. "Neutrino physics with the Baksan Underground Scintillation Telescope", стендовый доклад, Пиза, Италия (2013), Pontecorvo 100, Symposium in honour of Bruno Pontecorvo for the centennial of the birth.
22. "Limits on spin-dependent WIMP-proton cross-sections from the neutrino experiment at the Baksan Underground Scintillator Telescope", устный доклад, Бузиос, Рио-де-Жанейро, Бразилия (2012), VIII International Workshop on the Dark Side of the Universe.
23. "Ограничения на сечения упругого рассеяния нейтрино на нуклоне в нейтринном эксперименте на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе", устный доклад, Москва (2011), Научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий".
24. "Природные потоки нейтрино и скрытая масса Вселенной", устный доклад, Москва (2009), Научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий".
25. "Results with the Baksan Neutrino Telescope", устный доклад, Упсала, Швеция (2006), The 1st Workshop on Particle Physics with Neutrino Telescopes (PPNT2006).
26. "Indirect method of cold dark matter search", приглашенный доклад, 3rd International Heidelberg Conference on Dark matter in astro- and particle physics (DARK 2000), Гейдельберг, Германия, July 10-14, 2000;
27. "Status and perspectives of indirect search for dark matter", приглашенный доклад, 2nd International Conference Physics Beyond the Standard Model, Ringberg Castle, Тегернзе, Германия, June 6-12, 1999.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов РФФИ, РНФ и МО.

Личный вклад. Во всех выносимых на защиту результатах личный вклад диссертанта является определяющим. Диссертант провел численный анализ выделенных ливневых событий, выполнив научное руководство исследованиями первых данных телескопа Baikal-GVD сезона 2018-2021 гг и подготовку к защите диссертационной работы на степень кандидата физико-математических наук аспиранта ИЯИ РАН, результаты которой вошли в данную работу. В численном методе анализа выделенных ливневых событий автором получены значения показателя одностепенного энергетического спектра диффузного потока нейтрино и контура ошибок с учетом систематики. Диссертант является основным автором по анализу внешних алертов и по классификации оповещений Baikal-GVD на астрофизические события-кандидаты. В статистическом анализе ливневых событий на Baikal-GVD и мюонных нейтрино в полном наборе данных NT200 диссертантом применены методы функции максимального правдоподобия бинового и небинового вычисления значимости и тест-статистики, а также метод бутстрэппинга и псевдо-экспериментальных наборов данных в поиске превышения числа событий на фоне. Диссертантом сделаны расчеты сечений нейтрино в реакциях рассеяния на нуклонах и сечений аннигиляции и упругого рассеяния на нуклоне гипотетических частиц темной материи (массивных слабодействующих, ВИМП). В решении прохождения нейтрино в веществе с энергией ГэВ-ТэВ диссертантом учитывались вторичные нейтрино в нейтральных токах и были вычислены совместно с соавторами эффекты осцилляции нейтрино и регенерации тау-нейтрино. Совместно с соавторами диссертантом получены верхние пределы на плотность потока нейтрино в направлении галактики NGC4993 в гравитационном событии GW170817A, в направлении неидентифицированных источников нейтрино в алертных событиях от нейтринного телескопа IceCube и верхние ограничения на сечения аннигиляции и рассеяния ВИМП в предполагаемых источниках их наибольшего скопления.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации О.В. Суворовой опубликованы в 25 печатных работах в рецензируемых изданиях, из них 17 статей в изданиях рекомендованных ВАК, в числе которых 4 статьи одного автора. **Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и четырех приложений. Полный объем диссертации **278** страниц текста с **79** рисунками и 9 таблицами. Список литературы содержит **324** наименования.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований потоков нейтрино астрофизической природы, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В Первой главе приведены современные экспериментальные данные и теоретические представления о компонентах и источниках измеряемых потоков нейтрино в области энергий ТэВ - ПэВ. Также описаны методы моделирования прохождения нейтрино в толще Земли и в байкальской воде [A1] и распространение нейтрино в Солнце в решении задач поиска сигнала от частиц темной материи (ТМ) [A2]. Природные потоки нейтрино высоких энергий генерируются в цепочке взаимодействия первичных космических лучей с веществом или фотонным газом с последующим распадом возникающих заряженных пионов и рожденных ими мюонов, а также в распаде генерированных более тяжелых мезонов. Приведены основные процессы генерации атмосферных нейтрино, каналы генерации и процессы ускорения нейтрино в потенциальных астрофизических источниках таких как галактики с активными ядрами (АЯГ). Нейтрино внеатмосферного происхождения имеют более жесткий спектр, чем атмосферные нейтрино, благодаря механизмам ускорения (как механизм Ферми) первичных частиц в астрофизических источниках. Вклад астрофизических нейтрино в диффузном потоке становится заметен при энергиях выше десятков ТэВ, что впервые измерили на телескопе IceCube [2]. В Байкальском нейтринном эксперименте поиск сигнала от потенциальных астрофизических источников, в том числе от аннигиляции темной материи, ведется, начиная с измерений NT200 и с первых данных за время построения телескопа Baikal-GVD масштаба кубического километра [A5], [A6], [A7].

Основные реакции взаимодействия нейтрино (антинейтрино) с веществом при энергиях больше нескольких гигаэлектронвольт - это процессы глубоко неупругого рассеяния на нуклоне, которые в рамках электрослабой теории рассматриваются как взаимодействия слабых токов, содержащих лептонную и адронную части, через обмен виртуальными векторными бозонами. При передаче импульса через заряженный бозон W^\pm конечный лептон будет заряженный (заряженные токи), при передаче импульса в адроны через обмен Z_0 конечным лептоном будет нейтрино, уносящее часть энергии первичного

нейтрино (нейтральные токи). В реакциях, обусловленных заряженными токами нейтрино поглощается, превращаясь в заряженный лептон:

$$\nu_l(\tilde{\nu}_l) + N \rightarrow l^-(l^+) + X, \quad (1)$$

и в реакциях, обусловленных нейтральными токами, с вероятностью приблизительно в три раза меньше СС-взаимодействия (1), нейтрино теряет энергию:

$$\nu_l(\tilde{\nu}_l) + N \rightarrow \nu_l(\tilde{\nu}_l) + X, \quad (2)$$

где $l = e, \mu, \tau$ лептоны и X - адроны. В нейтральных токах аромат нейтрино неразличим, наблюдаемыми в эксперименте будут каскады, электромагнитные или адронные. В результате моделирования процессов распространения нейтрино в Земле и взаимодействия в чувствительном объеме телескопа были рассчитаны эффективные площади регистрации ливней, инициированных взаимодействием нейтрино в воде, в зависимости от энергии нейтрино для трех ароматов. В случае электронных и мюонных нейтрино при энергиях выше 100 ТэВ с увеличением зенитного угла существенно эффект поглощения нейтрино в Земле, и площадь уменьшается. В случае тау-нейтрино этот эффект менее выражен, так как для тау-нейтрино во взаимодействиях с нуклонами через заряженные токи происходит лишь эффективная потеря энергии. Интеграл по энергии от произведения эффективных площадей с потоками нейтрино атмосферного и астрофизического происхождения дает число фоновых и сигнальных событий, ожидаемых на телескопе и анализируется с регистрируемыми реальными данными на Baikal-GVD, как представлено в следующих разделах. В моделировании прохождения нейтрино с энергией от 10 ГэВ до 10 ТэВ в веществе Солнца использовался подход из [21], где в вычислении потоков нейтрино учитываются осцилляции трех ароматов и их вторичные взаимодействия в веществе при регенерации нейтрино через нейтральные токи с меньшей энергией и большей вероятностью выживания [A4], как и в процессе регенерации тау нейтрино [15], [22]. Показано, что влияние указанных процессов на величину потока мюонных нейтрино на уровне Земли зависит от начального спектра в центре Солнца. Наибольший эффект получен для жестких спектров нейтрино от аннигиляции частиц ТМ в лептонные пары, как $\tau^+\tau^-$. Соответственно, в анализе данных наиболее строгие ограничения на ожидаемый поток нейтрино от аннигиляции ВИМП в Солнце выводятся со спектром монохроматичных нейтрино [A20], [A21], что использовалось в анализе данных Байкальского телескопа NT200 [A22]-[A25].

Вторая глава посвящена анализу данных Baikal-GVD, первым результатам, полученным за время его развертывания в сезоны 2018 - 2021 гг (с марта 2018 по февраль 2022 годов) и исследованию диффузного потока нейтрино в области энергий ТэВ - ПэВ.

В разделе 2.1 описывается метод глубоководного детектирования нейтрино высоких энергий. Принцип детектирования нейтрино в прозрачной и преломляющей свет среде, как вода или лёд, заключается в регистрации оптического излучения Вавилова-Черенкова, где источником черенковских фотонов являются заряженные частицы, инициированные ядерными реакциями рассеяния нейтрино, движущиеся со скоростью, превышающей скорость света в среде. Эффективность этого метода в характерных особенностях развития процесса черенковского излучения заряженных частиц, которая зависит от гидрооптических свойств среды постановки эксперимента [A1]. Спектральное распределение черенковских фотонов, излучаемых с единицы длины траектории частицы с единичным зарядом выражается как [23]:

$$\frac{dn_c}{d\lambda} = 2\pi\alpha \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \cdot \frac{1}{\lambda^2}, \quad (3)$$

где λ – длина волны фотона в сантиметрах, $\alpha \approx 1/137$ постоянная тонкой структуры, $n(\lambda)$ – фазовый показатель преломления света в среде (значение для воды примерно 1,33), $\beta = v/c$ – скорость частицы относительно скорости света в вакууме. Отличительным свойством процесса черенковского излучения, которое во многом определяет эффективность глубоководного метода регистрации частиц, является испускание черенковских фотонов в каждый момент времени из точки на траектории, в которой находится частица, строго под фиксированным углом θ_c относительно направления движения частицы. Значение черенковского угла θ_c , определяемого из выражения $\cos(\theta_c) = 1/(\beta n)$, составляет примерно 42° для воды и льда. Основными оптическими параметрами среды, определяющими распространение черенковского излучения мюонов и ливней в естественных средах, являются показатель поглощения, показатель рассеяния и индикатриса рассеяния как функция $\cos(\theta)$ (где θ угол рассеяния фотона) для длины волны. Глубинные воды озера Байкал в основном прозрачны для фотонов в диапазоне длин волн 480-500 нм. Эти фотоны составляют подавляющее большинство черенковского излучения высокоэнергетических ливней, регистрируемых оптическими модулями Baikal-GVD. В окне прозрачности воды длина поглощения является достаточно стабильным параметром с характерным значением $20 \div 24$ м

(сезонные изменения менее 20%). Характерные значения длины рассеяния $30 \div 50$ м в окне прозрачности воды, при этом в отдельные периоды измерений, наблюдались значения длины рассеяния от $15 \div 20$ м до 70 м.

В моделировании черенковского излучения ливней высоких энергий для анализа данных Baikal-GVD используется алгоритм, предложенный в Ж.-А.Джилкибаевым [12], в котором ливень рассматривается как суперпозиция точечных источников черенковского излучения, расположенных в центре малых отрезков Δx вдоль продольной длины развития ливня. Интенсивность черенковского излучения электромагнитных и адронных ливней пропорциональна их энергии [12], [A1], [A5], [A10]. 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 $E_{sh} > 10$ ТэВ в эффективном объеме (порядка $0,05 \text{ км}^3$) вокруг каждого кластера телескопа.

В **разделе 2.2** приводится описание структуры нейтринного телескопа Baikal-GVD. Принципиальным решением конструкции гигатонного телескопа является его модульная структура из кластеров оптических модулей (ОМ) [9], что обеспечивает возможность проведения физических исследований уже на ранних стадиях развертывания установки. Конфигурация телескопа 2022 года с десятью кластерами схематично приведена на рис. 2.3 диссертации. Отдельный кластер состоит из восьми трех-секционных гирлянд с числом оптических модулей 288 [A5]. В настоящее время (2024 год) в конфигурации Baikal-GVD 13 кластеров. Основными регистрирующими элементами Baikal-GVD являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) Hamamatsu-R7081-100 с полусферическими фотокатодами диаметром 250 мм и с высокой квантовой чувствительностью (около 35% на 400 нм) [9]. Область спектральной чувствительности фотокатода 300 - 650 нм. В разделе описаны функциональность структурных элементов, система сбора данных и проводимые подводные ("in-situ") калибровки измерительных каналов [A5], [A6], [A7], [A8]. Показано, что точность временной калибровки составляет величину 2 - 3 нс [A8], [24].

Раздел 2.3 посвящен моделированию отклика ОМ на черенковское излучение от ливня, необходимого для вычисления вероятности срабатывания ОМ в кластере при восстановлении параметров каскадов, инициированных нейтрино. В моделировании отклика ОМ на черенковское излучение ливней учитывается спектральная чувствительность ОМ в совокупности с результатами измерения зависимости отклика ОМ от угла падения света относительно

оси ФЭУ [24], а также дополнительное ослабление светового потока в стекле сферического корпуса оптического модуля [A5], [A9]. Методика розыгрыша Монте-Карло в моделировании распространения света в прозрачной среде, как представлено в работах [12], [24], включает численное решение кинетического уравнения Больцмана, которое описывает изменение в единицу времени фазовой плотности потока фотонов единичного интервала длин волн относительно λ , движущихся в единичном телесном угле в направлении $\vec{\Omega}$ и пересекающих в окрестностях пространственно определенной точки \vec{r} единичную площадку перпендикулярную направлению движения потока. Функция единичной мощности в приближении точечного источника как модели ливня имеет вид:

$$I_{0sh} = \frac{\Psi_0(\vec{\Omega} \cdot \vec{z})}{4\pi} f_c(\lambda) \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \delta(t - t_0), \quad (4)$$

где $f_c(\lambda)$ и $\Psi_0(\vec{\Omega} \cdot \vec{z})$ определяют, соответственно, спектральное и угловое распределение фотонов источника, как они описаны выше. В качестве времени t_0 берётся время прихода прямых фотонов (не испытавших рассеяния), для которых в спектральном диапазоне чувствительности оптического модуля скорость распространения в среде $v_{ph}(\lambda)$ максимальная, и которые первыми достигают заданную окрестность точки \vec{r} . Тем самым, именно распределение фотонов по времени задержки относительно времени прихода прямых фотонов ($t - t_0$) представляют интерес в анализе. Благодаря высокой прозрачности среды черенковское излучение ливней высоких энергий регистрируется с расстояний, существенно превышающих продольную длину ливня. На рис. 2.8 - 2.9 диссертации приведены вычисленные области чувствительности ОМ к черенковскому излучению ливней в зависимости от их энергии в системе координат ОМ. Эти области соответствуют средним зарядам $Q > 1$ ф.э.. Ливни с энергией 100 ТэВ, 1 ПэВ и 10 ПэВ регистрируются до расстояний, соответственно, 90 м, 110 м и 130 м от оси ливня при ориентации ОМ на ливень. В случае ОМ, отвернутых от ливня, соответствующие расстояния составляют 50 м, 70 м и 90 м.

В **разделе 2.4** описываются триггерный отбор событий, выделение ливней и критерии отбора нейтринных событий. В настоящее время в качестве базового триггера кластера используется совпадение сигналов любой пары соседних оптических модулей секций во временном окне 100 нс. Величина триггерных порогов каналов устанавливается на уровне $\sim 1,5$ ф.э. и ~ 4 ф.э., что соответствует частоте формирования триггера 30 – 150 Гц в зависимости от световой

активности озера Байкал. В экспериментальном поиске событий от нейтрино высоких энергий по регистрации ливней на телескопе Baikal-GVD использовался многолетний опыт исследований на Байкальском телескопе НТ200 [25]. Алгоритм реконструкции параметров ливней основан на анализе времени и заряда импульсов сработавших ОМ, координаты которых поступают из данных акустической системы позиционирования [22]. Точность измерения времени и заряда импульсов достигается за счет использования интерполяции формы импульсов. Точность синхронизации каналов одного кластера при тактовой частоте управляющей электроники секций 200 МГц составляет величину ~ 2 нс. Ограничение $Q > 1,5$ ф.э. позволяет подавить число фоновых импульсов от свечения воды более чем на порядок величины.

Подавление шумовых импульсов включает условия: в событии должны сработать хотя бы шесть ОМ на трех или более гирляндах; времена импульсов на всех сработавших ОМ должны удовлетворять критерию причинности:

$$(t_i - t_j) < \frac{d_{ij}}{v_{ph}} + \delta t, \quad (5)$$

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

В каскадных событиях реконструируются координаты точки (вершины) взаимодействий ν_e и ν_τ с нуклоном, а также в ν_μ рассеянии на нуклоне через нейтральные токи. 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. В реконструкции энергии используется пропорциональность интенсивности света энергии каскада и пропорциональность размера ливня логарифму его энергии [A9]. Восстановление параметров ливней осуществляется в два этапа [A9], [24]: реконструируются координаты вершины ливня и затем они используются в реконструкция энергии и направления развития ливня. Восстановление координат ливня проводится итерационной процедурой с использованием временной информации сработавших каналов телескопа. Ошибка в определении координат (по медианному значению) не превышает трех метров, что получено по экспериментальным данным с калибровочной светодиодной матрицей и из симуляции ливней с энергией выше 100 ТэВ. Такая точность достаточна для задачи восстановления координат ливней высоких энергий, что позволяет использовать полученные результаты калибровок для анализа данных

телескопа [A8], [A9]. Восстановление энергии решается численно в минимизации функционала, включающего вероятность регистрации n фотоэлектронов и плотность вероятности регистрации амплитуды A при уровне засветки в n фотоэлектронов, при этом средние величины в статистике Пуассона берутся из результатов моделирования откликов оптических модулей на черенковское излучение ливня заданной энергии и направления.

Выбор критериев выделения каскадных событий высоких энергий в их реконструкции на одном кластере Baikal-GVD сформировался по результатам анализа симулированных событий, инициированных потоком атмосферных мюонов [A5], [A9]. Поток мюонов на уровне моря от взаимодействия космических лучей в атмосфере Земли вычислялся методом МК моделирования широких атмосферных ливней программой CORSIKA в версии 7.74 [26] и с использованием спектра протонов, как в работе [27]. Распространение мюонов в воде до уровня установки моделировалось программой MUM[28]. Выбранные критерии качества отбора событий тестируются по данным, набираемым в специальных сеансах с импульсами подводных лазеров на разных уровнях их интенсивности и на разной глубине [A8]. Точность восстановления энергии существенно зависит от энергии каскада и от его положения и ориентации относительно кластера и составляет (10 - 30)%. Точность восстановления направления ливня также зависит от его энергии, положения и ориентации и составляет $2^\circ - 4^\circ$ (медианное значение). Для подавления фона от атмосферных мюонных групп в выделенных каскадных событиях высоких энергий, удовлетворяющих всем установленным критериям отбора, были определены дополнительные ограничения на соответствие ожидаемого времени засветки ОМ от фотонов ливня, как точечного источника, в отличие от фотонов мюона, как линейного источника излучения. Дальнейший поиск событий от астрофизических нейтрино с энергией порядка сотни ТэВ и выше предполагает анализ событий с большой множественностью сработавших оптических модулей. В результате, за период наблюдений с марта 2018 по февраль 2022 гг с направлениями по всему небу выделены первые 25 каскадных событий-кандидатов на нейтрино астрофизического происхождения. Живое время наблюдений 4928 дней на один кластер (13,5 лет/кластер).

В разделе 2.5 описывается анализ выделенных ливней высоких энергий.

В анализе полного набора данных с апреля 2018 года по март 2022 года было выделено 135 событий с энергией $E_{sh} > 40$ ТэВ и числом сработавших ОМ $N_{hit} > 19$. Из них 16 выделенных событий с энергией выше 60 ТэВ и 13 событий с энергией выше 100 ТэВ. В Таблице.1 для выделенных 16

Таблица 1: Нейтринные события по выделенным 16 ливням с энергией выше 60 ТэВ в анализе наблюдения всего неба. Параметры: обозначение каскадного события Baikal-GVD в формате год-месяц-день, время наблюдения в Юлианских днях, оценка энергии ливня (E_{sh}), его зенитный угол (θ), галактическая долгота (l) и широта (b), восхождение (RA) и склонение (Dec), радиусы круга неопределенности, содержащих сигнал на 50% and 90% д.у., расстояние (ρ) от вершины ливня до центральной струны кластера.

Событие	MJD	E_{sh} ТэВ	θ (°)	l (°)	b (°)	RA (°)	Dec (°)	50% (°)	90% (°)	ρ м
GVD181010CA	58401.77863426	105	37	142.6	30.4	118.2	72.5	2.3	4.5	70
GVD181024CA	58415.88952546	115	73	164.1	-54.4	35.4	1.1	2.5	4.5	90
GVD190216CA	58530.03428241	398	64	141.4	5.8	55.6	62.4	3.3	6.9	101
GVD190517CA	58620.31961806	1200	61	99.9	54.9	217.7	57.6	2.0	3.0	96
GVD190523CA	58626.44462963	91	109	200.4	-58.4	45.1	-16.7	2.2	4.5	49
GVD200117CA	58865.65752315	83	50	190.0	64.0	163.6	34.2	2.1	3.3	73
GVD190604CA	58638.82969907	129	50	132.7	0.1	33.7	61.4	3.5	5.5	52
GVD200826CA	59087.58636574	110	71	21.0	-19.2	295.3	-18.9	2.0	7.9	84
GVD201222CA	59205.54451389	74	92	58.3	63.1	223.0	35.4	1.8	5.1	19
GVD210117CA	59231.02799769	246	57	168.8	38.8	131.9	50.2	1.6	3.6	80
GVD210409CA	59313.79668981	263	60	73.3	-6.1	310.0	31.7	3.3	6.3	76
GVD210418CA	59322.94855324	224	115.5	196.8	-14.6	82.4	7.1	3.0	5.8	70
GVD210515CA	59349.73187500	120	80.2	175.2	17.9	103.4	41.2	2.8	5.2	68
GVD210716CA	59411.42329861	110	58.7	135.5	7.1	46.0	66.7	2.1	4.1	93
GVD210906CA	59463.98151620	138	67.7	202.2	-45.3	57.8	-12.0	2.0	5.6	98
GVD220221CA	59631.60434028	120	67.7	276.9	77.5	187.2	15.8	3.2	5.8	62

ливней приведены значения оценки энергии, сферические координаты в горизонтальной и экваториальной системах координат, а также расстояния от вертикальной оси кластера до вершины ливня. По выбранным критериям отбора ливней в реальных данных число фоновых событий атмосферного происхождения ожидается на уровне 50%. Из розыгрыша атмосферных мюонов методом Монте-Карло число ожидаемых событий оценивается как 7,4. Примерно в десять раз меньше ожидаемое число событий от потока атмосферных нейтрино, рожденных в распадах пионов и каонов по модели Л.Волковой [29] и их прямого канала генерации от тяжелых мезонов по модели BERSS [30], и оценивается как 0,8 событий. Доля астрофизических нейтрино от диффузного потока с параметрами из [4] со спектром $E^{-2,46}$ оценивается как 7,8 событий [A10]. Распределения по энергии и косинусу зенитного угла выделенных 16 событий с энергией $E_{sh} > 60$ ТэВ в сравнении с распределением от ожида-

емых атмосферных мюонов и нейтрино, а также астрофизических нейтрино диффузного потока [4] со спектром $E^{-2,46}$ показаны на рис. 2.21 диссертации. Приведены оценки величины систематических ошибок: в измерениях длины поглощения (5%), в отклике ОМ в симуляциях ливней (10%), теоретические неопределенности в расчете атмосферных нейтрино от распада π и K мезонов (15%). Значения указанных ошибок складываются квадратично. В оценке неопределенности в расчете потока от прямого канала генерации атмосферных нейтрино учитывался результат анализа каскадных событий IceCube, где получен верхний предел на поток прямой генерации нейтрино в атмосфере [5]. В нашей оценке числа астрофизических нейтрино влияние неопределенности потока прямых нейтрино составляет менее 8% даже при увеличении предельного значения потока в 5 раз выше потока по модели BERSS [30]. С учетом систематической ошибки значимость превышения измеренного числа событий над фоном соответствует $2,4\sigma$, и нулевая гипотеза о присутствии только фоновых атмосферных событий в выделенных 16 ливнях отклонена на 97,36% доверительном уровне.

Для нейтринных событий с вершиной взаимодействия под горизонтом фон от атмосферных мюонов в разы меньше, чем при тех же энергиях для нисходящих событий. Тем самым, критерии выделения восходящих нейтрино астрофизического происхождения в наборе каскадов с направлениями из-под горизонта могут быть ослаблены по величине пороговой энергии и числу сработавших оптических модулей. В нашем анализе это $E_{sh} > 15$ ТэВ и $N_{hit} > 11$ для направлений с косинусом зенитного угла $\cos \theta < -0.25$. Всего по всем критериям отбора было выделено 11 событий в период разворачивания телескопа с апреля 2018 по март 2022 года (ж.в. 13,5 лет/кластер). Параметры этих событий представлены в Таблице 2. Значения ошибки восстановления направлений для этих событий на 50% д.у. варьируется от $1,9^\circ$ до $5,4^\circ$ и на 90% д.у. от $4,1^\circ$ до $12,6^\circ$. Два события, реконструированные с энергией 91 ТэВ и 224 ТэВ, соответствуют первому отбору событий по всему небу с энергией выше 60 ТэВ и также вошли в Таблицу 1.

Из симулированных событий с теми же критериями отбора, что выделили 11 экспериментальных ливня, ожидаемое число фоновых событий атмосферного происхождения оценивается как $3,2 \pm 1$, где доля от потока атмосферных нейтрино с учетом прямого канала их генерации это 2,7 события и 0,5 событий в ошибочной реконструкции восходящих направлений атмосферных мюонов. С учетом систематики значимость превышения измеренного числа событий над ожидаемым фоном составляет $3,05\sigma$, и нулевая

Таблица 2: Восходящие нейтринные события по выделенным 11 ливням с вершиной в нижней полусфере и с энергией выше 15 ТэВ. Параметры как в Таблице 1

Событие	MJD	E_{sh} ТэВ	θ ($^\circ$)	l ($^\circ$)	b ($^\circ$)	RA ($^\circ$)	Dec ($^\circ$)	50% ($^\circ$)	90% ($^\circ$)	ρ м
GVD180504CA	58242.5739004	25.1	111.7	299.1	3.6	185.4	-59.0	3.9	6.9	28
GVD190523CA	58626.44462963	91.0	109.0	200.4	-58.4	45.1	-16.7	2.2	4.5	49
GVD200614CA	59014.27202546	39.8	144.1	359.3	10.6	256.2	-23.6	3.4	6.8	108
GVD201112CA	59165.01353009	24.5	136.1	305.0	-15.1	202.2	-77.8	5.4	11.8	66
GVD210418CA	59322.94855324	224	115.5	196.8	-14.6	82.4	7.1	3.0	5.8	70
GVD210501CA	59335.45576389	64.6	112.3	223.4	-67.7	38.1	-28.9	2.6	12.6	109
GVD210506CA	59340.34252315	21.9	114.2	5.9	46.7	230.6	3.1	2.8	6.6	30
GVD210710CA	59405.56907407	24.5	115.5	139.8	-54.2	22.7	7.4	3.6	8.6	83
GVD210803CA	59429.58071759	20.9	136.9	321.0	-50.3	347.0	-63.0	1.9	4.1	41
GVD220121CA	59600.45934028	30.9	110.5	241.3	10.4	126.2	-19.5	3.4	7.1	49
GVD220308CA	59646.14655093	36.3	105.0	203.2	-35.2	67.3	-8.0	2.5	5.6	37

гипотеза отклонена на 99,76% доверительном уровне. Измеренные 11 событий и ожидаемое количество фоновых событий были проанализированы для характеристики диффузного астрофизического потока нейтрино.

В подразделе 2.5.1 представлен метод численной подгонки в определении параметров модели равновесного диффузного потока астрофизических нейтрино, предполагающей равное количество нейтрино и антинейтрино и равных ароматов нейтрино на уровне Земли: $(\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau) = 1 : 1 : 1$. Модель характеризуется спектральным индексом γ_{astro} и множителем нормировки ϕ_{astro} потока нейтрино на один аромат нейтрино в единицах ($\text{ГэВ}^{-1} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стер}^{-1}$):

$$\Phi_{astro}^{\nu+\bar{\nu}} = 3 \times 10^{-18} \phi_{astro} \left(\frac{E_\nu}{E_0} \right)^{-\gamma_{astro}}, \quad (6)$$

где $E_0 = 100$ ТэВ. В процедуре подгонки параметров диффузного потока астрофизических нейтрино распределение по восстановленной энергии ливней разбивается на бины (ячейки) с равным шагом по логарифму, и минимизируется логарифм функции максимального правдоподобия по сумме распределений фоновых и сигнальных (астрофизических) событий относительно измеренных событий. Измеренное число n_i в каждом бине i сравнивается с числом, что предсказывается моделью как среднее значение λ_i в функции вероятности Пуассона, при этом среднее значение λ_i включает суммарное число от астрофизических нейтрино и фона от атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино. Для оценки λ_i использованы симулированные события

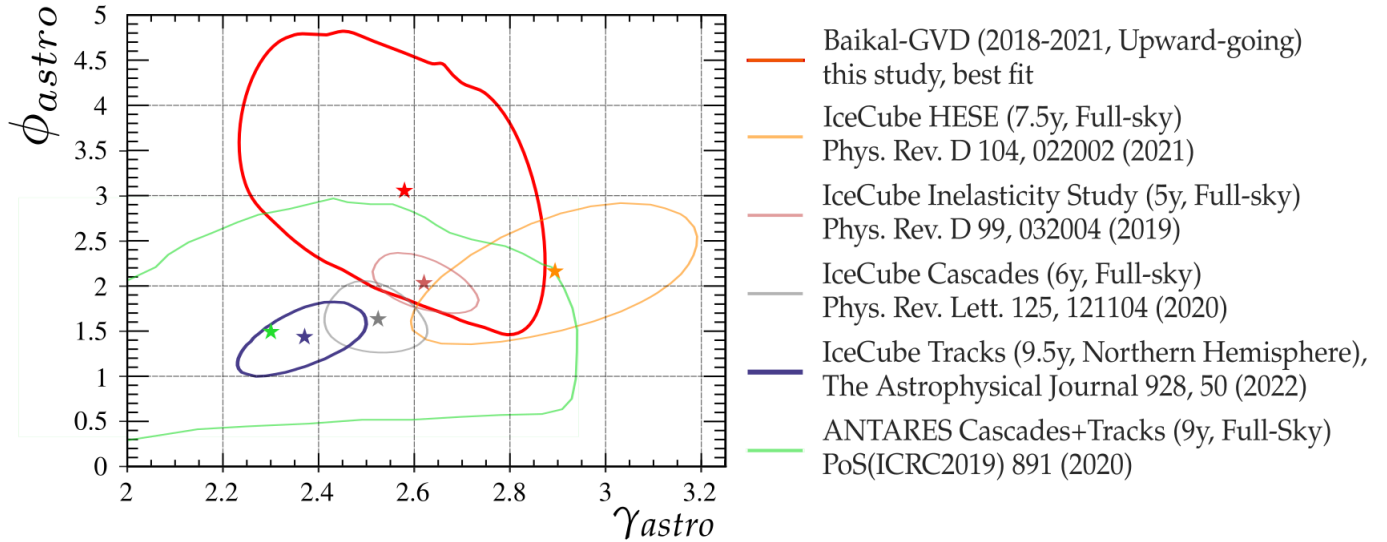


Рис. 1: Результаты Baikal-GVD (красный цвет) на карте параметров диффузного потока астрофизических нейтрино, показателя степенного спектра γ_{astro} и нормировки потока ϕ_{astro} при энергии 100 ТэВ, в сравнении с другими экспериментами по наиболее вероятному значению и по контуру доверительного интервала 68%. Пояснения по экспериментам в комментарии справа и в тексте.

сигнала и атмосферного фона с различными параметрами воды и эффективностью ОМ, и соответственно, с изменениями эффективности регистрации и сдвигом по шкале энергии. Основываясь на функции вероятности Пуассона, мы используем тест-статистику (TS) для сравнения количества наблюдаемых событий с предсказаниями модели Монте-Карло:

$$TS = -2 \ln L + \sum_{k=1} \left(\frac{(g_k - g_k^0)}{\sigma(g_k)} \right)^2. \quad (7)$$

Здесь L - функция вероятности Пуассона; второе слагаемое учитывает систематические неопределенности, обсуждаемые выше, которые вводятся в уравнение как несущественный параметр по форме распределения Гаусса для приора g_k с отклонением $\sigma(g_k)$ от центрального значения g_k^0 . В численной подгонке варьируются два параметра γ_{astro} и ϕ_{astro} для нахождения минимума выражения (7). В результате наиболее вероятные значения ("best-fit") для параметров в подгонке TS получены с индексом $\gamma_{astro} = 2,58_{-0,33}^{+0,27}$ и с нормировкой $\phi_{astro} = 3,04_{-1,27}^{+1,52}$ потока на один аромат нейтрино для $E_0 = 100$ ТэВ.

Вывод параметров диффузного потока астрофизических нейтрино в результате реконструкции и выделения ливней высоких энергий с восходящими направлениями, получен по данным Baikal-GVD впервые [A10] и является первым подтверждением на уровне три сигма результатов нейтринного экспери-

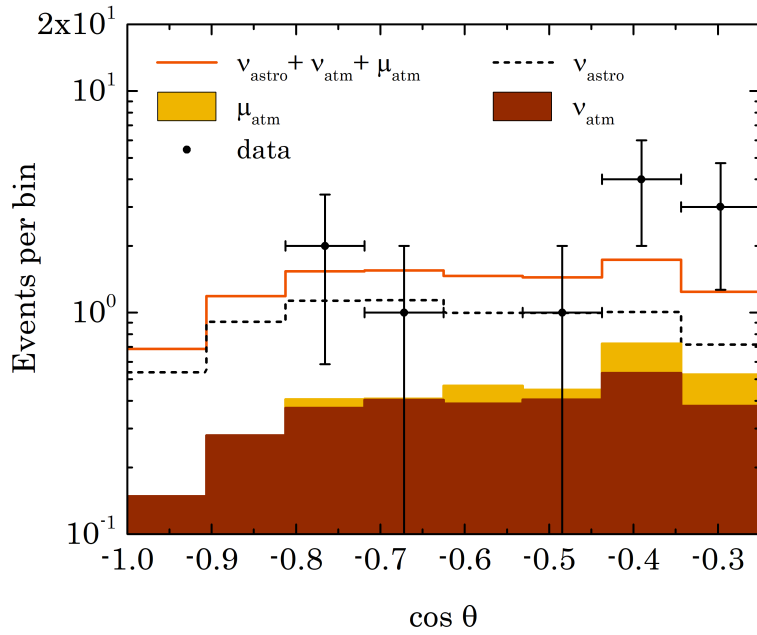
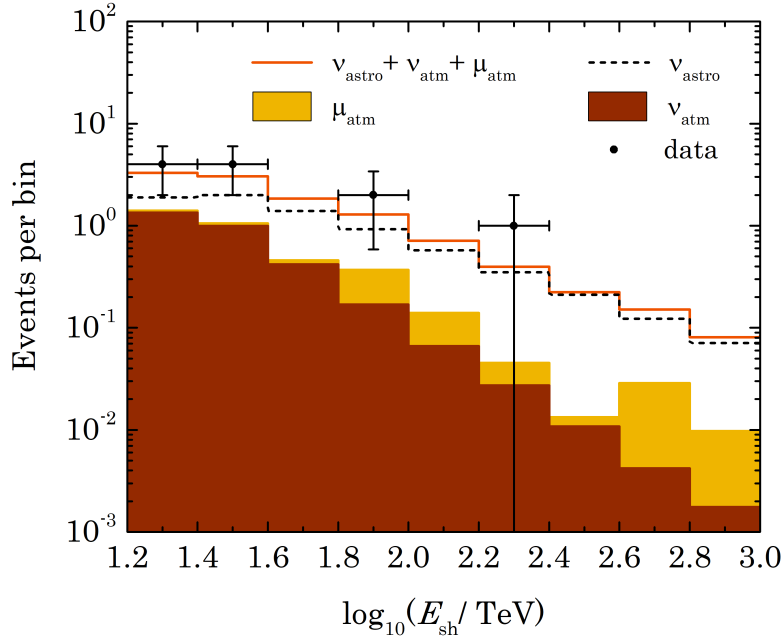


Рис. 2: Распределения по энергии ливня (гистограммы сверху) и по косинусу зенитного угла (гистограммы внизу) в анализе 11 ливней восходящих направлений за время наблюдения с апреля 2018 по март 2022. События обозначены черными точками со статистической неопределенностью. Пунктир - вклад ожидаемых событий от диффузного потока астрофизических нейтрино с показателем спектра $-2,58$, полученного как наиболее вероятное значение в численной подгонке симулированных и реальных данных. Цветом обозначены вклады в суммарное распределение ожидаемых событий (красная линия) от атмосферных мюонов (желтый) и атмосферных нейтрино (коричневый).

мента IceCube об астрофизической компоненте в потоке нейтрино высоких энергий. Для сравнения значений γ_{astro} и ϕ_{astro} , полученных по каскадным событиям Baikal-GVD, с предшествующими выводами об этих параметрах по данным IceCube и ANTARES на рис. 1 представлены наиболее вероятные значения в контуре доверительных интервалов 68%. В правой части графика указаны основные опубликованные результаты IceCube: по анализу данных всех направлений на небесной сфере в трековом канале за 7,5 лет живого времени наблюдений (оранжевый цвет); по каскадам всех направлений прихода за 6 лет (серый); по трековым событиям из Северной полусферы за 9,5 лет (темно синий); по трековым и каскадным событиям в объеме телескопа со всеми направлениями прихода за 5 лет (розовый). Также приведены результаты ANTARES по комбинированному анализу трековых и каскадных событий за 9 лет наблюдений, в диапазоне энергий от 100 ГэВ и не выше 40 ТэВ. На рис. 2 показано сравнение распределений по энергии ливней и косинуса зенитного угла в реальных данных и в симулированных событиях с предсказываемым вкладом от диффузного потока (ур. 6) астрофизических нейтрино с полученными значениями показателя спектра $(-2, 58)$ и нормировки.

В разделе 2.6 представлен поиск ассоциации выделенных 25 нейтринных событий с астрофизическими источниками. Ожидаемое число нейтрино атмосферного происхождения составляет примерно половину из представленных в Таблицах 1, 2 каскадных событий. Соответственно, около 50% событий могут иметь высокую вероятность астрофизического происхождения. Насколько вероятно, что отдельное событие регистрируется от астрофизического источника, оценивается параметром "сигнальности" из симуляции нейтринных событий методом Монте-Карло и отклика телескопа. Сигнальность, как соотношение числа ожидаемых сигнальных (астрофизических) и фоновых событий в реконструкции ливней в зависимости от их энергии (E) и зенитного угла (θ), вычисляется на уровне конечного отбора реконструированных ливней по распределению событий в плоскости $\cos(\theta)$ и lgE :

$$SN_{i,j} = \frac{S_{i,j}^{signal}}{(S_{i,j}^{signal} + N_{i,j}^{background})}, \quad (8)$$

здесь i и j это индексы ячеек (бинов) двумерной гистограммы по параметрам $\cos(\theta)$ и lgE . Число $S_{i,j}^{signal}$ - сумма астрофизических нейтрино всех типов (ν_e, ν_μ, ν_τ) со степенным спектром по энергии в предположении показателя -2 либо значения, выбранного в наилучшей подгонке экспериментальных

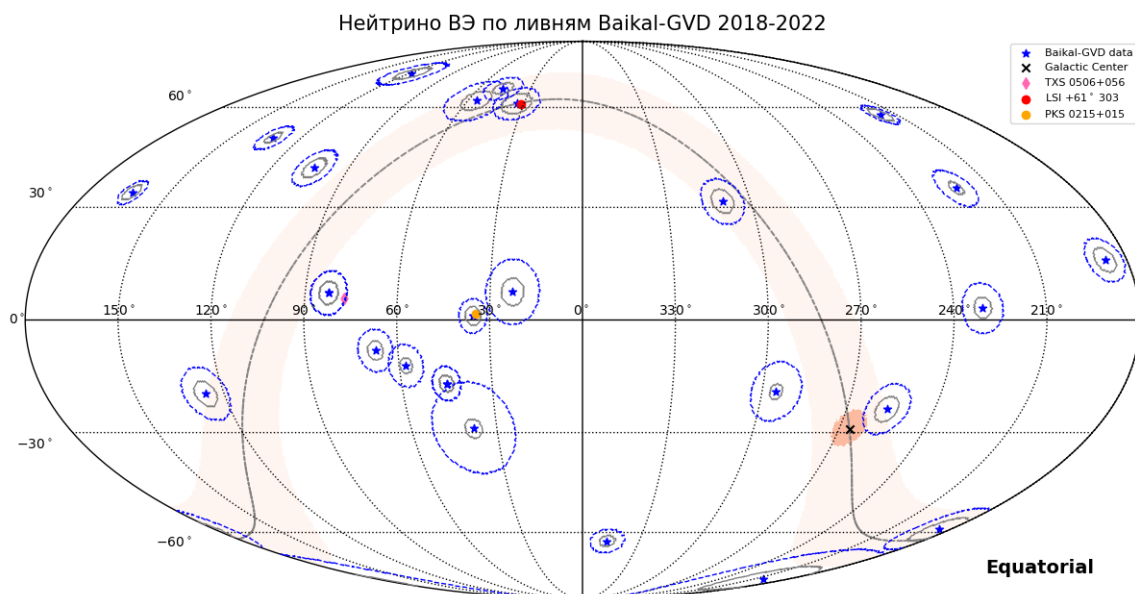


Рис. 3: Карта в экваториальной системе координат пространственного распределения 25 высокоэнергичных ливней Baikal-GVD на небесной сфере. Координаты отмечены синими звездочками с кругом неопределенности 50% (сплошная серая линия) и кругом 90% (синий пунктир).

данных. Число $N_{i,j}^{background}$ - сумма событий атмосферного происхождения: мюоны, мюонные и электронные нейтрино, включая прямой канал их генерации. С критериями отбора каскадных событий, описанных выше, были получены зависимости параметра сигнальности $SN_{i,j}$ (8) от энергии нейтрино, для спектров нейтрино в источнике E^{-2} и $E^{-2,46}$, показанных в диссертации на рис. 2.27-2.28, по которым оценивалась сигнальность выделенных событий. Их распределение на карте небесной сферы показано на рис. 3 в экваториальной системе координат. Из них 25% попадают в полосу $\pm 10^\circ$ относительно линии плоскости Галактики. Порядка 30% нейтринных событий пришли из области неба вблизи активных радиоблазаров [A10], [A12], но для однозначной ассоциации с ними требуется дальнейшее наблюдение источника в электромагнитных диапазонах и на нейтринных телескопах. Очевидной особенностью в распределении ливней Baikal-GVD от нейтрино высоких энергий на рис. 3 является видимый триплет событий, с координатам в пределах полосы $\pm 10^\circ$ от галактической плоскости. Три каскада Baikal-GVD: GVD190216CA (398 ТэВ), GVD190604CA (129 ТэВ) и GVD2107161CA (110 ТэВ) имеют общие области пересечения кругов 90% д.у. неопределенности сигнального направления [A12]. Два события в триплете, пришедшие

в 2019 году, в общей области пересечения имеют весьма интересный объект: микроквazar LSI+61 303 ($RA= 40^{\circ},13$ и $Dec= 61^{\circ},23$), известный как яркий источник в диапазоне от радио и до гамма-излучения в области энергий свыше тераэлектронвольт. Это двойная система с массивной звездой и компактным объектом (скорее всего, пульсаром), расположенная на расстоянии $2,6 \pm 0,3$ Кпк от Солнечной системы. Известно о существовании лишь четырех подобных бинарных систем в нашей Галактике. С марта 2019 года и на протяжении 96 недель микроквazar LSI+61 303 находился в состоянии высокоэнергичного гамма-излучения, что связывают с его сверхорбитальной модуляцией. В нейтринном триплете Baikal-GVD времена прихода двух первых каскадов соотносятся с интервалом высокоэнергичного гамма-излучения. Более позднее третье событие GVD210716CA не включает в круг неопределенности источник LSI+61 303 на 90% д.у. В областях угловой неопределенности каскадных событий триплета рассматривались другие источники по каталогам объектов высоких энергий, как приведено на рис. 2.30 диссертации. Вероятность появления триплета в наборе высокоэнергичных 25 событий сезонов 2018-2021 года оценивалась в методе перемешивания времён прихода реальных данных относительно распределения локальных координат [A12]. Пуассоновская вероятность триплета оценивается как 2,4%, и тем самым, отклонение от гипотезы случайного совпадения порядка 2,26 сигма выделяет триплет Baikal-GVD как направление на потенциальный источник в данной области неба, но не доказывает его обнаружение.

В Третьей главе представлены реализованные процедуры автоматического слежения на основе быстрой обработки данных Baikal-GVD и формирования онлайн оповещений (алертов) о нейтринных событиях высоких энергий. Обмен алертами дает возможность идентифицировать источник одновременно в разных каналах излучения, включая нейтрино, гамма-излучение и гравитационные волны, при отслеживании направления во временном окне ожидаемого сигнала от доли секунд до часов или дней в зависимости от модели предполагаемого процесса. Алертные наблюдения телескопов координируются открытым сетевым ресурсом NASA, GCN (General Coordinates Network). Режим онлайн-анализа и слежения в реальном времени за внешними алертами на Baikal-GVD был запущен в 2021 году с момента установления полностью автоматизированной обработки данных с минимальной задержкой ~ 3 минуты относительно времени регистрации события на Baikal-GVD. Поиск корреляции событий Baikal-GVD с нейтринными алертами действующих телескопов, ANTARES и IceCube, представлял наибольший интерес в теме отслеживания

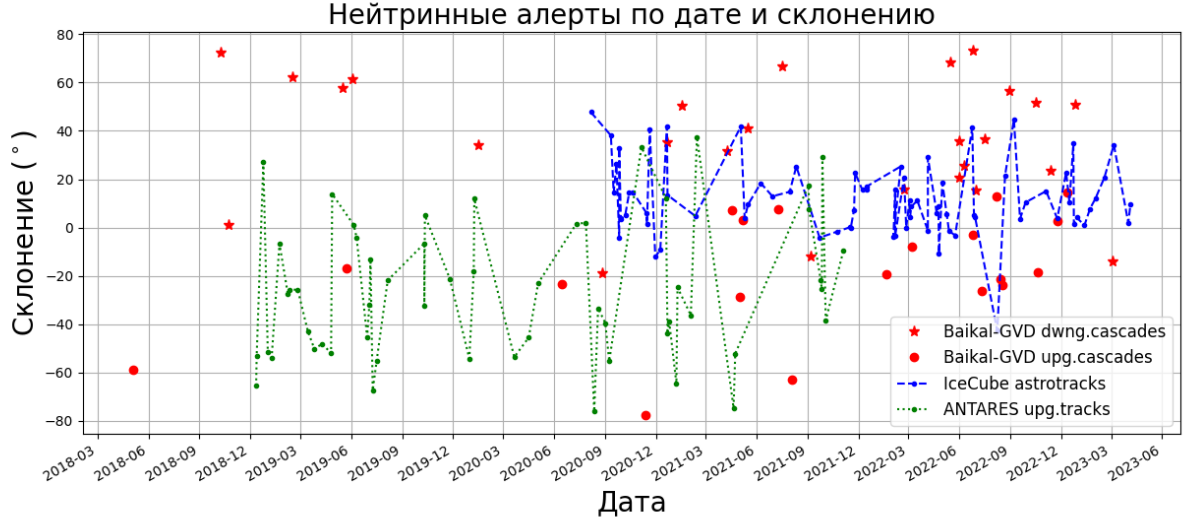
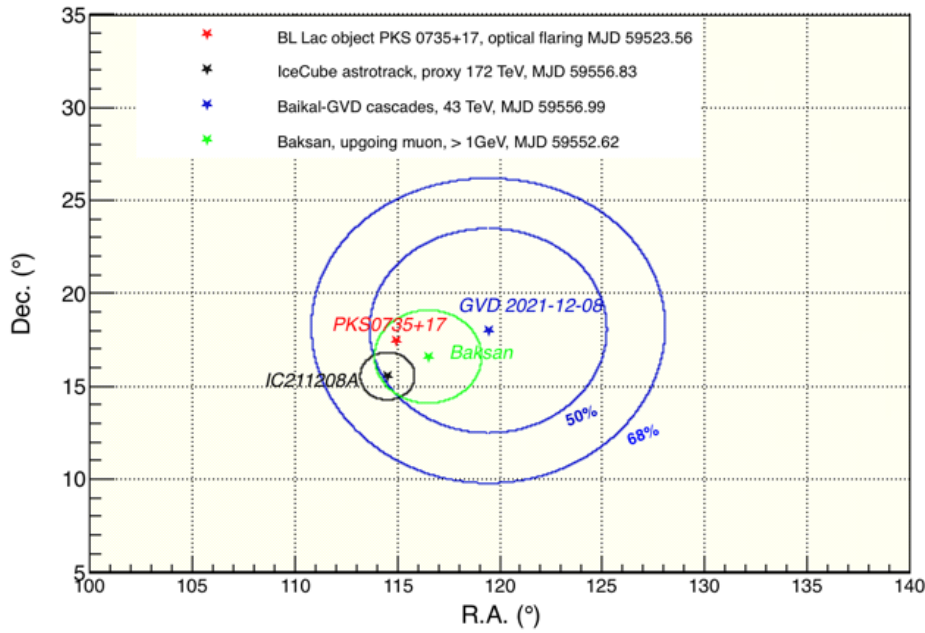


Рис. 4: История слежения нейтринных алертов на Baikal-GVD, принятых от ANTARES (зеленый пунктир) и IceCube (синий), на шкале времени. Показаны первые 25 нейтринных алертов Baikal-GVD в выделенных ливнях высоких энергий, представленных в Таблицах 1 и 2 (красные символы).

внешних оповещений на Baikal-GVD в реальном времени на регулярной основе [A3], [A13], [A14] [A15]. Анализ включал обе моды реконструкции событий на каждом кластере Baikal-GVD для интервалов времени относительно сигнала ± 500 секунд, ± 1 час и ± 1 сутки и углового расстояния до алерта в пределах $\psi < 5^\circ$, что соответствовало медианному значению углового разрешения ливней с энергией выше 1 ТэВ. В поиске событий на совпадение с алертами отбирались события, удовлетворяющие критериям качества ливня или трека с множественностью сработавших оптических модулей $N_{\text{hit}} > 7$ и энергией выше ТэВ. История отслеживания нейтрино по триггеру автоматической системы TAToO [31] телескопа ANTARES и по GCN/AMON алерту телескопа IceCube представлена на рис. 4. Нейтринные алерты этих экспериментов это трековые события мюонных нейтрино с восходящими направлениями относительно горизонтов видимости телескопов с соответствующими им значениями склонений на этом графике. Область вероятного совпадения алертов трех нейтринных экспериментов, вместе с выделенными 25 ливнями Baikal-GVD (см. Таблицы 1 и 2), это околоразрешенная полоса по склонениям. В совместной работе с ANTARES [32] были получены предельные значения на поток астрофизических нейтрино в направлении трех выделенных направлений на 90% д.у. в интервале 2 - 11 ГэВ/см². В корреляции направлений с алертами IceCube более вероятны нисходящие ливни Baikal-GVD. В



Алерт Baikal-GVD210418CA вблизи TXS 0506+056

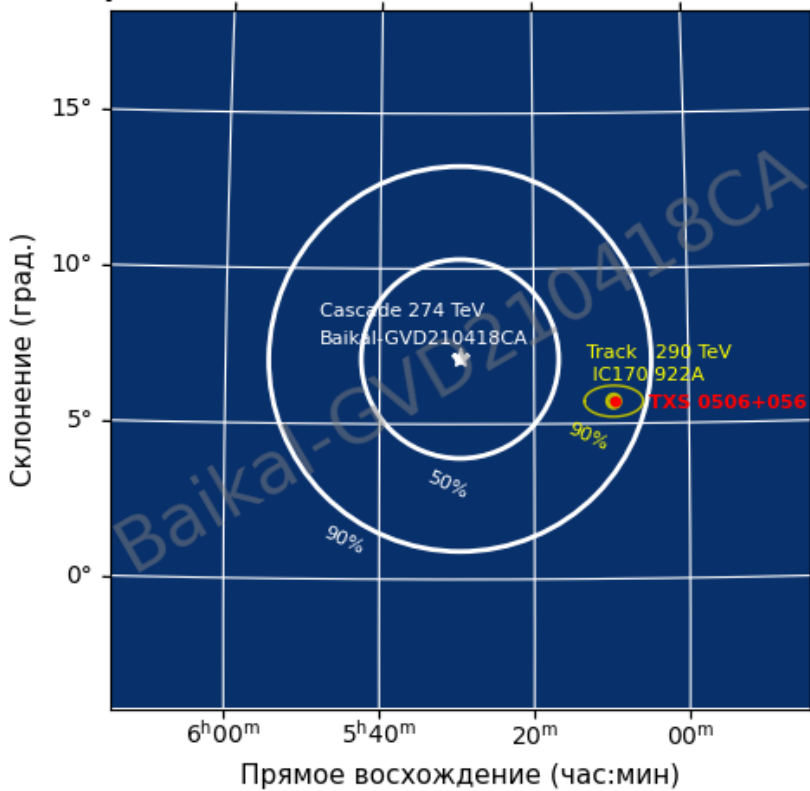


Рис. 5: Высокоэнергичное ливневое событие GVD211208CA, выделенное на Baikal-GVD, с направлением близким к радиоблазару PKS 0735+178 в период его активности в декабре 2021г (вверху). Высокоэнергичное ливневое событие GVD210418CA, выделенное на Baikal-GVD, с направлением вблизи радиоблазара TXS 0506+056 (внизу).

их анализе были получены предельные значения потоков астрофизических

нейтрино в направлении потенциальных источников северной небесной полушария на 90% д.у. в интервале 1,5 - 2,5 ГэВ/см².

Единственное на сегодняшний день совпадение нейтринных событий высокой энергии, наблюдаемых двумя телескопами в один день и в одном направлении в пределах точности измерений, было зарегистрировано 8 декабря 2021 года. Каскадное событие GVD211208CA с энергией 43 ТэВ пришло в "коротком" временном окне (3,95 ч) от алерта IceCube211208A, с координатами: восхождение 119,44° и склонение 18,00°, что на угловом расстоянии 4,68° от блазара PKS 0735+178 и в 5,30° от наиболее вероятного направления IceCube211208A. По выделенным каскадным событиям Baikal-GVD за все время наблюдений нами была получена оценка ожидаемого числа событий 0,0044 за 24 ч на угловом расстоянии от блазара 5,5°, что при наблюдаемом одном событии в статистике Пуассона соответствует значимости случайного совпадения 2,85σ. Оповещение об алерте GVD211208CA было отправлено в The Astronomers's telegram (Atel 15112). В электромагнитном излучении в это время блазар был активен: наблюдалась сильная вспышка в гамма-лучах (ATel 15099), рентгеновских лучах (ATel 15102, 15108, 15109), оптическом (ATel 15098, 15100) и радио (ATel 15099) диапазонах. Как показано на рис. 5 (вверху), в круг 50% ошибки определения направления ливневого события GVD211208CA попадает источник, блазар PKS 0735+178, и нейтринный алерт IceCube211208A, а также алерт Баксанского телескопа БПСТ (Atel 15143) со временем прихода за несколько дней до IceCube211208A [A15]. В результате полученных совпадений отслеживание нейтринных алертов от радиоблазара PKS 0735+178 в настоящее время относится к приоритетному в поиске потенциальных мультиволновых источников.

Другим выделенным алертом является высокоэнергичное каскадное событие GVD210418CA с энергией ливня 224±75 ТэВ и с числом сработавших модулей $N_{hit} = 24$, зарегистрированное на Baikal-GVD 18 апреля 2021 года [A10], [A11]. Это единственный восходящий ливень с энергией выше двухсот ТэВ. Вероятность атмосферного происхождения в нулевой гипотезе фона соответствует $P_{atm} = 0,0033$, то есть порядка трех сигма. В предположении астрофизического источника нейтрино со спектром $E^{-2,46}$ значимость события GVD210418CA соответствует 97,1%. Координаты алерта (см. Табл. 2) указывают на его близкое расположение к радиоблазару TXS 0506+056 [A10], [A11], [A16], локализация которого попадает в круг 90% неопределенности направления ливня что видно на рис. 5 (внизу). Известно, что радиоблазар TXS 0506+056 в момент его вспышки в гамма-излучении

22 августа 2017 г был идентифицирован как источник нейтринного алерта IC170922A [33]. В данных Baikal-GVD в 2017 году, когда телескоп состоял из двух кластеров, корреляций с IC170922A выявлено не было. Случайная реализация одного восходящего события с энергией выше 200 ТэВ и с координатами радио блазара TXS 0506+056 в круге 90% неопределенности за живое время наблюдения 13,5 лет/кластер не исключается с вероятностью $p_{TXS} = 0,0074$ [A11]. С учетом длительных временных задержек активности TXS 0506+056 в радиодиапазоне относительно гамма-излучения интерпретация происхождения GVD210418CA от радиоблазара TXS 0506+056 проверялась по имеющимся данным в электромагнитном диапазоне в интервале нескольких лет, в частности, по кривым блеска гамма телескопа FERMI-LAT и радио обсерватории RATAN-600 [A11]. Время прихода нейтрино GVD210418CA попадает на возрастающую часть радио вспышки на частоте 11 ГГц [A11], хотя ее амплитуда много меньше предшествующей в 2020 году. Отсутствие возрастания интенсивности в гамма-излучении в момент события GVD210418CA ограничивает предпочтение моделей одновременной генерации нейтрино и гамма-излучения.

Известным гравитационно-волновым сигналом в серии измерений лазерными интерферометрами обсерваторий LIGO и Virgo (LVC) за 2015-2020 гг является событие GW170817, единственный пример гравитационного события с наблюдением сопровождающего электромагнитного излучения, возникновение которого предсказывалось в двойных системах от слияния нейтронных звезд (НЗ). На Baikal-GVD видимость галактики NGC4993, где произошло слияние НЗ, соответствовала подгоризонтальному направлению, как иллюстрируется на рис.3.8 и рис.3.9 диссертации. Полученный на Baikal-GVD в составе двух кластеров результат поиска нейтрино, ассоциированных с гравитационно-волновым событием GW170817, впервые показал его уровень чувствительности и потенциал в поиске источников гравитационного сигнала от двойных систем. Для спектра E^{-2} и одного аромата нейтрино в предположении об их равной доле в потоке, верхний предел на поток рассчитывался в соответствии с эффективной площадью по траектории движения источника [A14]. В диапазоне энергий от 5 ТэВ до 10 ПэВ на уровне достоверности 90% верхний предел на нейтринный поток со спектром E^{-2} составил $5,2 \times (E/\text{ТэВ})^{-2} \text{ТэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ для временного окна ± 500 секунд и $9 \times (E/\text{ТэВ})^{-2} \text{ТэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$ для временного окна 14 суток от времени регистрации гравитационной волны. Ограничения приведены на графиках рис. 3.10 диссертации. В настоящее время в режиме онлайн на Baikal-GVD

через распределённую роботизированную систему-посредник Kafka принимаются алерты IGWN гравитационно-волновых обсерваторий LIGO, Virgo, KAGRA в соответствии их формату.

В четвертой главе представлены результаты анализа по поиску сигнала от холодной темной материи в измеренных потоках мюонных нейтрино на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе NT200, с низким по энергии порогом регистрации 10 ГэВ [25] и оценки чувствительности для проекта Baikal-GVD [A24]. Проведенное исследование является продолжением предыдущей работы автора по этой теме [13] на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ), в рамках обновленных представлений [A17], сложившихся за последние двадцать лет в области физики элементарных частиц, после ряда фундаментальных открытий и новых экспериментальных данных, а также с модификацией способов оценки предельных значений параметров моделей темной материи в методе "непрямого" детектирования [A20, A21]. В непрямом методе по поиску сигнала от частиц темной материи [A2] статус экспериментов оценивается по наблюдению возможных вторичных продуктов, возникающих при аннигиляции пары ВИМП, и сравнению их интенсивности с ожидаемым фоном. Поиски прямым и непрямым методом детектирования темной материи взаимно дополняют друг друга, имея разный уровень чувствительности к выбранной модели ВИМП, что показывает перекрестный анализ [A17],[A18],[A19] поиска сигнала от частиц темной материи, который ведется на протяжении десятков лет на действующих нейтринных телескопах (IceCube, SuperKamiokande, BPST) и ранее завершенных нейтринных экспериментах (Kamiokande, MACRO, AMANDA, NT200, ANTARES), в наблюдениях гамма-обсерваторий и в низкофоновых экспериментах по прямой регистрации упругого взаимодействия ВИМП с веществом, включая сезонные модуляции спектров ядер отдачи.

По данным Байкальского глубоководного нейтринного телескопа NT200, в измерениях мюонных нейтрино за время его функционирования с апреля 1998 по февраль 2003, в отсутствии избытка в числе измеренных событий относительно фоновых были получены верхние ограничения на 90% д.у. на поток нейтрино высоких энергий в направлении от Солнца [A22], от центра Галактики [A23], от 22-х темных карликовых галактик в видимости телескопа и от галактики Большое Магелланово Облако [A25] в поиске источников нейтрино от аннигиляции массивных слабо взаимодействующих частиц темной материи, ВИМП. В анализе данных были использованы методы оптимизации сигнал-фон в угле раствора на источник [15],[A22],[A23],[A25], метод

псевдо-экспериментов и комбинированный предел на аннигиляции ВИМП в удаленных галактиках [A23],[A25]. Из ограничений на поток нейтрино выводятся верхние пределы на сечения упругого рассеяния ВИМП на нуклонах и на сечения аннигиляции для разных каналов аннигиляции частиц темной материи массой в интервале от 30 ГэВ до 10 ТэВ.

В модели аннигиляции частиц темной материи в центре Солнца скорость аннигиляции Γ_A определяет величину потока нейтрино:

$$\Phi_{\nu_j} = \frac{\Gamma_A}{4\pi R^2} \times F_{\nu_j}, \quad \nu_j = \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \quad (9)$$

где R - расстояние до Солнца; F_{ν_j} - начальный спектр нейтрино и антинейтрино, образующихся при аннигиляции темной материи в Солнце, который складывается из инклюзивных спектров нейтрино $\frac{dN_{\nu_j}^i}{dE_\nu}$ от распада кварковых и лептонных каналов пропорционально их доли (B_i) и с вероятностью аннигиляции (B_F) в фермионный или бозонный канал. Захват гравитационным полем Солнца тех ВИМП, чьи орбиты оказываются в плоскости эклиптики или пересекают ее, приводит к изменению траектории частицы. Частица темной материи ВИМП в реакциях рассеяния на нуклонах солнечного вещества, на 70% состоящего из водорода, теряет энергию, уровень ее орбитального движения снижается по спирали к центру. В результате многократных циклов рассеяния частица темной материи оказывается в центральной сверхплотной части Солнца, где аннигилирует с накопленными ранее ВИМП, что и должно приводить к генерации нейтринного потока от Солнца. За время существования Солнечной системы устанавливается равновесие процессов, величина скорости аннигиляции Γ_A равна половине скорости захвата, которая пропорциональна сечениям упругого рассеяния ВИМП на ядрах солнечного вещества и не зависит от вероятности (сечения) аннигиляции. Из полученных по экспериментальным данным ограничений на поток нейтрино от Солнца выводятся ограничения на сечения упругого рассеяния ВИМП на нуклонах [A20], [A21], [A22]. Ограничения на сечения упругого рассеяния ВИМП на протоне наиболее сильные в каналах аннигиляции с наиболее жесткими спектрами нейтрино на уровне регистрации - это пара $\nu\bar{\nu}$ и пара $\tau^+\tau^-$ лептонов, как видно из рис. 6. На рис. 4.8 - 4.11 диссертации приведены сравнения полученных ограничений на сечения рассеяния ВИМП частиц с результатами других нейтринных телескопов и экспериментов прямого поиска.

Сигнал от аннигиляции в центре Галактики, и аналогично, в удаленных темных карликовых галактиках, пропорционален квадрату плотности

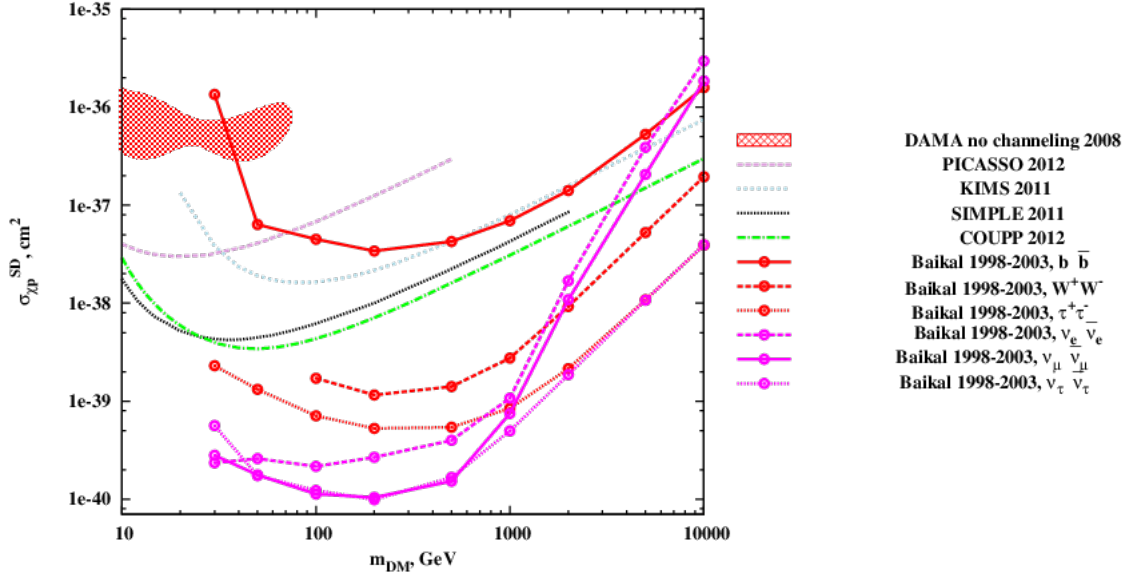


Рис. 6: Ограничения сверху на 90% д.у. на сечения спин-зависимого рассеяния ВИПМ частиц на протоне по данным НТ200; сравнение с наиболее строгими пределами по данным лабораторных экспериментов прямого поиска на момент публикации ограничений по данным НТ200 [A22].

темной материи. Ожидаемый нейтринный поток от аннигиляции частиц темной материи на уровне Земли определяется как

$$\frac{d\phi_\nu}{dE_\nu d\Omega} = \frac{\langle \sigma_a v \rangle}{2} J_a(\psi) \frac{R_0 \rho_0^2}{4\pi m_{DM}^2} \frac{dN_\nu}{dE_\nu}, \quad (10)$$

где $J_a(\psi)$ - астрофизический фактор как функция углового расстояния ψ от центра Галактики; $\langle \sigma_a v \rangle$ - сечение аннигиляции, усредненное по распределению скоростей ВИМП в современную эпоху; dN_ν/dE_ν - спектр нейтрино и антинейтрино. Астрофизический фактор J_a включает профиль плотности темного вещества по лучу зрения наблюдателя и параметризуется как функция углового расстояния ψ в виде:

$$J_a(\psi) = \int_0^{l_{max}} \frac{dl}{R_0} \frac{\rho^2 \left(\sqrt{R_0^2 - 2rR_0 \cos \psi + r^2} \right)}{\rho_0^2}. \quad (11)$$

Здесь R_0 это расстояние от центра Галактики до Солнечной системы. Интегрирование по лучу зрения наблюдателя до максимальной величины l_{max} , которая много больше размера нашей Галактики. Величина локальной плотности ТМ, ρ_0 , стандартно берется как $\sim 0,3 \text{ ГэВ}/\text{см}^3$.

В полученных результатах учитывались систематические ошибки, как экспериментальные, так и теоретические. В задаче определения величины

сигнала от центра Галактики основная неопределенность связана с астрофизикой. Показано влияние астрофизической неопределенности на верхние пределы сечения аннигиляции темной материи [A23]. Наиболее строгие ограничения на сечения аннигиляции получены на уровне $1 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3/\text{с}$ для центра Галактики, на уровне $6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3/\text{с}$ для комбинированного анализа карликовых галактик и на уровне $7 \cdot 10^{-21} \text{ см}^3/\text{с}$ для галактики Большое Магелланово Облако. На рис. 7 сравниваются верхние ограничения на се-

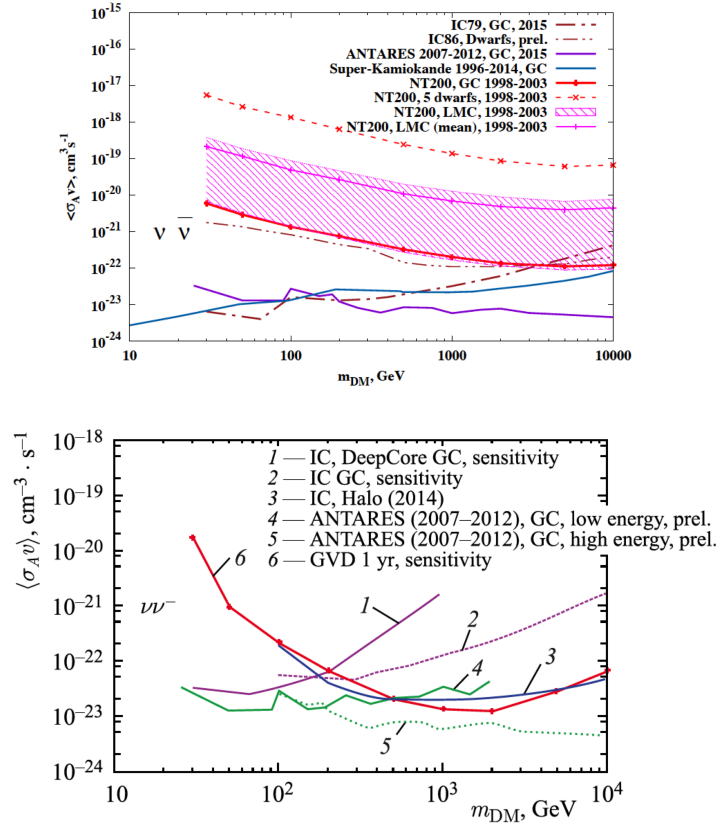


Рис. 7: Результаты по данным NT200: верхние пределы на 90% д.у. на сечения аннигиляции ВИМП в прямом нейтринном канале $\nu\bar{\nu}$ в центре Галактики (красная линия), в галактике LMC (розовая линия и затененная область) и комбинированный предел по 5ти галактикам dSphs (оранжевый пунктир) (вверху). Ожидаемая чувствительность на 90% д.у. для проекта Baikal-GVD [A24] за год наблюдений к аннигиляции ВИМП в центре Галактики в прямом нейтринном канале $\nu\bar{\nu}$ (внизу) для стандартной модели профиля плотности темной материи, NFW. Результаты других экспериментов показаны на момент публикации ограничений по данным NT200 [A23], [A24], [A25].

чения аннигиляции ВИМП в $\nu\bar{\nu}$, полученные на телескопе NT200 (вверху), и оценка чувствительности для проекта Baikal-GVD [A24] (внизу) с аналогичными результатами других нейтринных экспериментов на момент публикации работ NT200. На рис. 8 сравнение результатов в канале $\tau^+\tau^-$, где го-

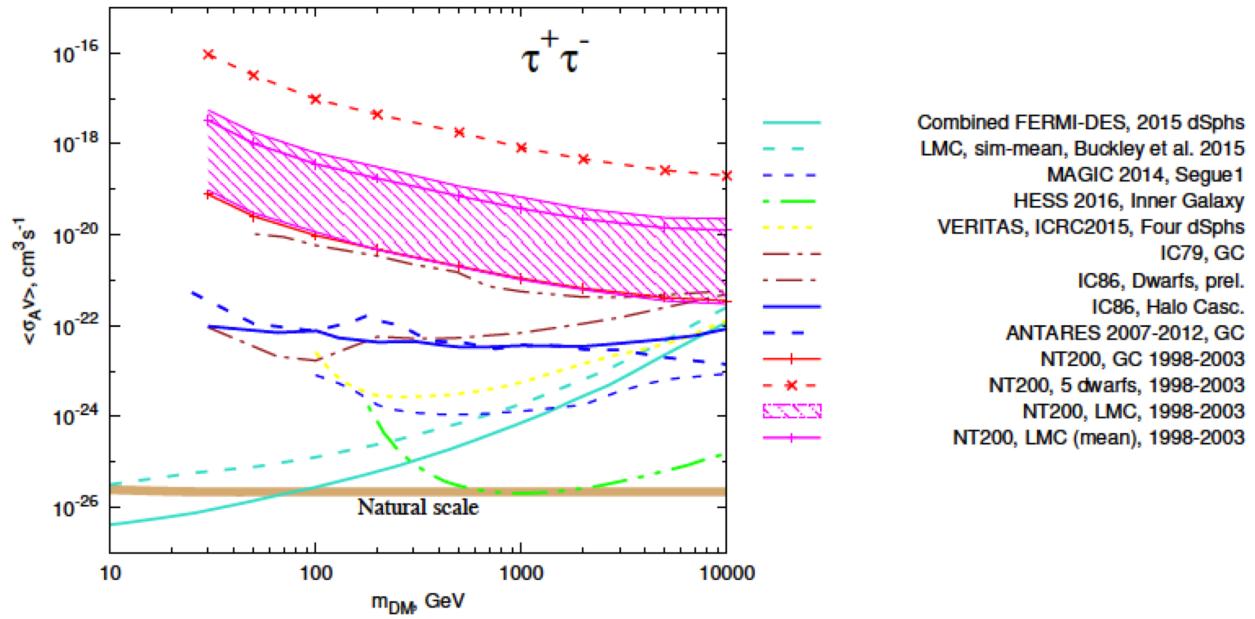


Рис. 8: Верхние пределы на 90% д.у. на сечения аннигиляции частиц темной материи по данным NT200 (с обозначениями как на рис.7) для канала аннигиляции $\tau^+\tau^-$ в сравнении с результатами других экспериментов, также на момент публикации ограничений по данным NT200 [A25].

горизонтальная светло-коричневая линия соответствует сечению аннигиляции термализованных в ранней Вселенной частиц темной материи. Значимость полученных верхних ограничений на сечения рассеяния ВИМП на нуклонах, на сечения аннигиляции ВИМП по нейтринным событиям NT200 остается актуальной [18], [19] в поиске сигнала от частиц темной материи и, в целом, для прояснения вопроса о природе темной материи.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На основе анализа данных телескопа Baikal-GVD были выделены первые кандидаты на астрофизические нейтрино в ливневых событиях с энергией выше 60 ТэВ для нисходящих ливней и выше 15 ТэВ для восходящих ливней, составивших первый каталог нейтрино для исследования их диффузного потока и идентификации локальных источников.
2. Численные исследования показали, что на уровне три сигма в диффузном потоке нейтрино по выделенным на Baikal-GVD ливневым событиям присутствует высокоэнергичная астрофизическая компонента, что впервые подтверждает результаты IceCube в наблюдении нейтринных событий высоких энергий.

3. По выделенным на Baikal-GVD ливневым событиям из нижней полусферы с энергией выше 15 ТэВ выполнена численная подгонка измеренного потока нейтрино и впервые определены величина показателя одностепенного спектра нейтрино в диффузном потоке как $\gamma_{astro} = -2,58_{-0,33}^{+0,27}$ и значением нормировки потока при 100 ТэВ на каждый аромат $\phi_{astro} = 3,04_{-1,21}^{+1,52}$ с учетом систематических ошибок измерения.
4. Из выделенных кандидатов на астрофизические нейтрино в ливневых событиях Baikal-GVD впервые получены указания на корреляцию с идентифицированными источниками: каскадное событие из нижней полусферы с энергией выше 200 ТэВ вблизи радио блазара TXS 0506+056 и кластеризация трех нисходящих ливней по направлению галактического микроквара LSI 061+303.
5. В задаче автоматического формирования собственных нейтринных оповещений (алертов) Baikal-GVD были определены критерии отбора, включающие оценки статистической значимости и сигнальности.
6. В задаче автоматического приема оповещений о сигнале астрофизического происхождения были внедрены триггерные программы приема нейтринного алерта от телескопа ANTARES и программное обеспечение от международной координации астрономических сигналов GCN в получении нейтринных алертов телескопа IceCube, гамма-вспышек, оптических транзиентов и гравитационно-волновых событий лазерных интерферометров LVC.
7. Впервые в режиме реального времени зарегистрировано совпадение направлений нейтринного события с внешним алертом от IceCube в установленном временном окне 12 часов и с направлением на радио блазар PKS 0735+178 в период его активности в электромагнитном спектре.
8. Впервые на Baikal-GVD получены ограничения сверху на плотность потока нейтрино в направлении нейтринных алертов по триггерам нейтринных телескопов ANTARES и IceCube.
9. Впервые получено ограничение сверху на плотность потока нейтрино от галактики NGC4993 в гравитационном событии GW170817, где при слиянии двух нейтронных звезд возникла гравитационная волна в серии измерений O3 гравитационными антеннами LVC.

10. Впервые выполнено моделирование отклика телескопа НТ-200 на сигнал от источников аннигиляции гипотетических частиц темной материи ВИМП в Солнце и получены ограничения сверху на 90% д.у. на сечения упругого рассеяния ВИМП на нуклоне.
11. Впервые по данным нейтринного телескопа НТ200 получены ограничения сверху на 90% д.у. на сечения самоаннигиляции ВИМП в потенциально ярких их источниках: в центре Галактики, в 22 карликовых сфероидальных темных галактиках и галактике Большое Магелланово Облако.

Все разработанные в диссертации алгоритмы анализа данных применимы к увеличивающемуся объему телескопа и к новым физическим задачам, включающим мультиканальные исследования в режиме реального времени.

Публикации автора по теме диссертации

1. [A1] Ж.-А.М. Джилкибаев, Г.В. Домогацкий, О.В. Суворова, Черенковские детекторы в нейтринной астрофизике высоких энергий. // Успехи физических наук. -2015. –Т. 85. –В. 5. –С. 531-539. // Cherenkov detectors for high-energy neutrino astrophysics, Phys.Usp. 58 (2015) 5, 495-502.
2. [A2] О.В. Суворова. Природные потоки нейтрино и скрытая масса Вселенной // Ядерная Физика. -2011. –Т. 74. –В. 1. –С. 1-9; // Original neutrino fluxes and hidden mass in the Universe. Physics of Atomic Nuclei. -2011. –Т. 74. -С.122-129.
3. [A3] А.В. Аврорин, ..., О.В. Суворова и др., Слежение за высокоэнергичными нейтрино на Байкальском нейтринном телескопе Baikal-GVD // Письма в Астрономический журнал, -2021. -Т. 47. –В. 2. –С. 114-124; // High-Energy Neutrino Follow-up at the Baikal-GVD Neutrino Telescope // Astronomy Letters -2021. -Т. 47. –В. 2. –С. 94-104.
4. [A4] E.V. Bugaev, S.P.Mikheyev, O.V. Suvorova, Neutral current interactions of high energy neutrinos with matter of the Sun and Earth // Nuova Cim. C. - 1996, -С. 623-804. DOI: 10.1051/epjconf/201920901015.
5. [A5] А.В. Аврорин, ..., О.В. Суворова и др., Глубоководный черенковский детектор в озере Байкал // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. -2022. –Т. 161. –В. 4. –С. 476-496. // Deep-Underwater

- Cherenkov Detector in Lake Baikal // J.Exp.Theor.Phys. 134 (2022) 4, 399-416.
6. [A6] O.V. Suvorova, A.D. Avrorin et al., (Baikal-GVD Collaboration), Baikal-GVD: first cluster Dubna // PoS EPS-HEP2015 (2015) 418, DOI: <https://doi.org/10.22323/1.234.0418>.
 7. [A7] A.D. Avrorin , ..., O.V. Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration), Baikal-GVD: first results and prospects // EPJ Web Conf. 209, 01015 (2019).
 8. [A8] A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration), Calibrating the Measuring Channels of the Baikal-GVD Neutrino Telescope // Instrum.Exp.Tech. – 2020. –T. 63. –B. 4., -C. 551-560.
 9. [A9] V.A. Allakhverdyan, ..., O.V.Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration), The Baikal-GVD neutrino telescope: search for high-energy cascades // PoS ICRC2021 (2021) 1144, DOI: <https://doi.org/10.22323/1.395.1144>.
 10. [A10] V.A. Allakhverdyan, ..., O.V.Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration), Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope // Physical Review D. -2023. –T. 107. –C. 042005.
 11. [A11] V.A. Allakhverdyan, ..., O.V.Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration and Yu.Yu.Kovalev et al.), High-energy neutrino-induced cascade from the direction of the flaring radio blazar TXS 0506+056 observed by Baikal-GVD in 2021 // Mon.Not.Roy.Astron.Soc. -2023. -T. 527. -B. 3. -C. 8784-8792.
 12. [A12] V.A. Allakhverdyan, ..., O.V.Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration and Yu.Yu.Kovalev et al.), Search for directional associations between Baikal Gigaton Volume Detector neutrino-induced cascades and high-energy astrophysical sources // Mon.Not.Roy.Astron.Soc. -2023. -T. 526. -B. 1. -C. 942-951.
 13. [A13] O.V.Suvorova, V.A. Allakhverdyan et al., (Baikal-GVD Collaboration), Multi-messenger and real-time astrophysics with the Baikal-GVD telescope // PoS ICRC2021 (2021) 946, DOI: 10.22323/1.395.0946.
 14. [A14] A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration), Search for High energy Neutrinos from GW170817 with the Baikal-GVD

- Neutrino Telescope // JETP Lett. -2018. –Т. 108. -В. 12. –С. 787-790; e-Print:1810.10966.
15. [A15] V.Dik, O.V.Suvorova et al. (Baikal-GVD Collaboration), The Baikal-GVD telescope follow up analysis of the IceCube alerts // PoS ECRS2022 (2022) 096, DOI: 10.22323/1.423.0096.
 16. [A16] V.M. Aynutdinov, ..., O.V. Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration), Baikal-GVD Astrophysical Neutrino Candidate near the Blazar TXS 0506+056 // PoS ICRC2023 (2023) 1457, DOI: 10.22323/1.444.1457. e-Print: 2308.13686 [astro-ph.HE].
 17. [A17] O. V. Suvorova. Status of indirect dark matter search with neutrino telescopes // Физика элементарных частиц и атомного ядра. -2016. -Т.47. -В. 6, -С.938-946.
 18. [A18] O. Suvorova, Indirect method of cold dark matter seach // DARK2000, 1st ed. 2001 Edition by H.V. Klapdor-Kleingrothaus, ISBN 3-540-41797-4 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; ISBN-10: 3642626084, ISBN-13 : 978-3642626081, Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 2001 edition (October 3, 2013), <https://inspirehep.net/literature/542489>.
 19. [A19] O. V. Suvorova, Status and perspectives of indirect search for dark matter // Beyond the dissert: Accelerator, non-accelerator and space approaches into the next millennium. Proc., 2nd International Conference Physics Beyond the Standartd Model, Ringberg Castle, Tegernsee, Germany, June 6-12, 1999, 853-867. // arXiv:hep-ph/9911415.
 20. [A20] Суворова О.В., Болиев М.М., Демидов С.В., Михеев С.П., Ограничения на сечения упругого рассеяния нейтралино на нуклоне в нейтринном эксперименте на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе, // Ядерная физика. – 2013. – Т. 76, В. 11. – С. 1433–1442; //Upper limit on the cross section for elastic neutralino-nucleon scattering in a neutrino experiment at the Baksan Underground Scintillator Telescope // Phys.Atom.Nucl. -2013. -Т.76. -С. 1367-1376.
 21. [A21] M.M. Boliev, C.V. Demidov, O.V. Suvorova, Neutrino physics with the Baksan Underground Scintillation Telescope. // Nuovo Cimento C. -2014. -Т.37. –В. 03. -С. 193-195.

22. [A22] A. D. Avrorin , ..., O.V. Suvorova et al., (Baikal Collaboration and S.V. Demidov), Search for neutrino emission from relic dark matter in the Sun with the Baikal NT200 detector // *Astroparticle Physics*. -2015. -Т. 62. –С. 12-20. e-Print 1405.3551 [astro-ph.HE].
23. [A23] A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova et al., (Baikal Collaboration and S.V. Demidov), A search for neutrino signal from dark matter annihilation in the center of the Milky Way with Baikal NT200 // *Astroparticle Physics*. -2016 -Т. 81 –С. 12-20. e-Print 1512.01198[astro-ph.HE].
24. [A24] A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova et al., (Baikal-GVD Collaboration and S.V. Demidov), Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* -2015. -Т. 101. -В. 5, -С. 289-294. e-Print: 1412.3672 [astro-ph.HE].
25. [A25] A.D. Avrorin, ..., O.V. Suvorova et al., (Baikal Collaboration and S.V. Demidov), Dark matter constraints from an observation of dSphs and the LMC with the Baikal NT200 // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. -2017. –Т. 125. -В. 1. -С. 80-90, *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. -2017. –Т. 152. –В.1. –С. 97-109. e-Print: arXiv:1612.03836 [astro-ph.HE].

Список литературы

- [1] V.M. Aynutdinov et al. (Baikal-GVD Collaboration), Large neutrino telescope Baikal-GVD: recent status // *PoS ICRC2023 (2023) 976*, DOI:10.22323/1.444.0976.
- [2] M. G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector. // *Science*. -2013. -V. 342. -P. 1242856.
- [3] M.G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data // *Phys. Rev. Lett.* -2014. -V. 113. -P. 101101.
- [4] M.G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Atmospheric and astrophysical neutrinos above 1 TeV interacting in IceCube // *Phys. Rev. D* -2015. -V. 91. -P. 022001.

- [5] M.G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration), Characteristics of the Diffuse Astrophysical Electron and Tau Neutrino Flux with Six Years of IceCube High Energy Cascade Data // *Phys. Rev. Lett.* -2020. -V. 125. -P. 121104.
- [6] R. Abbasi et al. (IceCube Collaboration), IceCube high-energy starting event sample: Description and flux characterization with 7.5 years of data // *Phys. Rev. D* -2021. -V. 104. -P. 022002.
- [7] R. Abbasi et al. (IceCube Collaboration), Improved Characterization of the Astrophysical Muon–neutrino Flux with 9.5 Years of IceCube Data // *ApJ* -2022. -V. 928. -P. 50.
- [8] Markus Ackermann, Mauricio Bustamante, . . . , Zhan-Arys Dzhilkibaev, . . . , Olga Vasil’evna Suvorova et al., High-energy and ultra-high-energy neutrinos: A Snowmass white paper, // *JHEAp.* -2022. -B. 36. –P. 55-110.
- [9] Айнутдинов В.М., Кластер Baikal-GVD - основная структурная единица Байкальского глубоководного нейтринного телескопа - Дисс. докт. физ.-мат. наук, ИЯИ РАН, Москва, 2018.
- [10] A. Plavin, Yu. Y. Kovalev, Yu. A. Kovalev, and S. Troitsky, Observational Evidence for the Origin of High-energy Neutrinos in Parsec-scale Nuclei of Radio-bright Active Galaxies // *ApJ.* -2020. -V. 894. -N. 2. -P. 101.
- [11] Марков М.А. О природе материи.// М., Наука, -1976. -С. 282.
- [12] Джилкибаев Ж.-А.М., Поиск нейтрино сверхвысоких энергий и гипотетических частиц темной материи в экспериментах на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ-200 - Дисс. докт. физ.-мат. наук, ИЯИ РАН, Москва, 2005.
- [13] Суворова О.В., Поиск сигнала от холодной темной материи в нейтринном эксперименте на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе, - Дисс. канд. физ.-мат. наук, ИЯИ РАН, Москва, 1996.
- [14] S. Demidov and O. Suvorova, Annihilation of NMSSM neutralinos in the Sun and neutrino telescope limits // *JCAP* -2010. -V. 1006. -P. 018.
- [15] M. M. Boliev, S. V. Demidov, S. P. Mikheyev and O. V. Suvorova, Search for muon signal from dark matter annihilations in the Sun with the Baksan Underground Scintillator Telescope for 24.12 years // *JCAP* -2013. -V. 1309. -P. 019.

- [16] Lee F. Thompson et ANTARES Collaboration, Dark Matter Searches with ANTARES Neutrino Telescope // Proc. 28th ICRC, Tsukuba, Japan, World Academy Press. -2003. P. 1743.
- [17] J. Elbs, Yu.M. Bunkov, E. Collin, H. Godfrin, O. Suvorova, Electron - nuclear recoil discrimination by pulse shape analysis // J.Low Temp.Phys. -2008. V. 150. -P. 536.
- [18] M. Tanabashi et al. (Particle Data Group). - Phys.Rev.D. -2018. V. 98. -P. 030001. // <https://pdg.lbl.gov/2018/listings/rpp2018-list-wimps-dark-matter-searches.pdf>
- [19] R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog.Theor.Exp.Phys. -2022. -P. 083C01. // <https://pdg.lbl.gov/2022/listings/rpp2022-list-wimps-dark-matter-searches.pdf>
- [20] ATel 15112; Zh.-A. Dzhilkibaev and O. Suvorova (et Baikal-GVD Collaboration), Baikal-GVD observation of a high-energy neutrino candidate event from the blazar PKS 0735+17 at the day of the IceCube-211208A neutrino alert from the same direction // <https://www.astronomerstelegam.org/?read=15112>
- [21] T. Ohlsson and H. Snellman, Neutrino oscillations with three flavors in matter of varying density // Eur. Phys. J. C -2001. -V. 20. -P. 507.
- [22] P.Lipari, Lepton spectra in the Earth's atmosphere. // Astropart. Phys. -1993 -V. 1 -P. 195-227.
- [23] И. Е. Тамм, И. М. Франк, Когерентное излучение быстрого электрона в среде // УФН. -1967 -Т. 93. -С. 388.
- [24] Шелепов М.Д., Выделение событий от ливней высоких энергий и восстановление параметров ливней в экспериментах на первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD - Дисс. канд. физ.-мат. наук, ИЯИ РАН, Москва, 2021.
- [25] I. A. Belolaptikov et al., The Baikal underwater neutrino telescope: Design, performance, and first results // Astropart. Phys. -1997. -V. 7. -P. 263.
- [26] D. Heck et al., CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers // Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA-6019. -1998. -P.42.

- [27] T.K. Gaisser, T.Stanev, S.Tilav, Cosmic Ray Energy Spectrum from Measurements of Air Showers. // *Front. Phys. (Beijing)*. -2013. -V. 8. -P. 748.
- [28] I. Sokalski, E.V. Bugaev, and S.I. Klimushin, MUM: Flexible precise Monte Carlo algorithm for muon propagation through thick layers of matter // *Phys. Rev.* -2001, -V. D64, P. 074015(1-19).
- [29] Л.В. Волкова, Энергетические спектры и угловые распределения нейтрино атмосферного происхождения // *Ядерная Физика*, -1980. -Т. 31. С. 1510-1521.
- [30] A. Bhattacharya, R. Enberg, M. H. Reno, I. Sarcevic, and A. Stasto, Perturbative charm production and the prompt atmospheric neutrino flux in light of RHIC and LHC // *J. High Energ. Phys.* -2015. -V. 6. -P. 110.
- [31] D. Dornic, et al., (ANTARES and TAROT Collab.), Search for neutrinos from transient sources with the ANTARES telescope and optical follow-up observations (TAToO) // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* -2011. -V. S183. -P. 626.
- [32] C.A.Garre, ..., O.V.Suvorova, (Baikal-GVD and ANTARES Collaborations) ANTARES offline study of three alerts after Baikal-GVD follow-up found coincident cascade neutrino events // *PoS ICRC2021*. -2021. P. 1121.
- [33] The IceCube, Fermi-LAT, et al., Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A // *Science*. -2018. -V. 361. -P. eaat1378.

Научное издание

Суворова Ольга Васильевна

Исследование потоков нейтрино астрофизической природы
в экспериментах первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Принято в печать 01.06.2023

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 2,26 Зак. № 22545 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

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