На правах рукописи

Бондарев Евгений Александрович

Поиск локальных астрофизических источников нейтрино высоких энергий в трековом канале нейтринного телескопа Baikal-GVD

1.3.15 — Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

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

Научный руководитель:

Заборов Дмитрий Николаевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

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

Богданов Алексей Георгиевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Научно-образовательный центр НЕВОД Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ, доцент, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург).

Защита диссертации состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.163.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.163.01,
кандидат физико-математических наук

Демидов Сергей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время нейтринная астрономия переживает расцвет и активно развивается, оставаясь при этом молодой областью науки. Несмотря на то, что уже пройден длинный путь от регистрации первых атмосферных мюонов в подводных установках экспериментом НТ-200 [1] до открытия в эксперименте IceCube диффузного потока космических нейтрино [2] и отдельных локальных источников [3; 4], становление нейтринной астрономии в качестве полноценной ветви астрономии только начинается, открывая простор для исследований.

Нейтрино, будучи электронейтральной частицей с экстремально малым сечением взаимодействия, способно проходить космологические расстояния без взаимодействия с межгалактической и межзвездной средами, не отклоняясь при этом магнитными полями. Это позволяет расширить горизонт астрофизических наблюдений (в сравнении с космическими лучами и гамма-излучением), а также с высокой точностью установить направление на источник. Покидая область рождения вблизи источника, даже окруженного оптически непрозрачной толщей вещества, нейтрино способно нести информацию о физических процессах, недоступную в других каналах регистрации.

Для решения задачи регистрации астрофизических нейтрино в настоящее время построено несколько крупномасштабных нейтринных телескопов, использующих естественные среды в качестве мишени для нейтрино. Принцип работы большинства современных нейтринных телескопов основан на регистрации излучения Вавилова – Черенкова (далее – черенковского излучения), возникающего в оптически прозрачной среде при прохождении в ней ультрарелятивистских заряженных частиц. Последние образуются в результате взаимодействия нейтрино с веществом. События взаимодействия нейтрино с веществом в нейтринных телескопах принято разделять на два основных типа: каскадные и трековые. Каскадные события характеризуются наличием высокоэнергичного адронного или электромагнитного (электрон-фотонного) каскада, который со значительных расстояний (десятки или сотни метров) выглядит как квази-точечный источник света, в то время как трековые события характеризуются наличием высокоэнергичного мюона, длина пробега которого может исчисляться километрами, что определяет большую протяженность области эмиссии Черенковского света. В Южном полушарии

функционирует нейтринный телескоп IceCube, а в Северном завершил работу телескоп ANTARES, но активно строятся установки KM3NeT и Baikal-GVD.

В настоящее время глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD, развернутый глубоко в озере Байкал, является крупнейшим нейтринным телескопом в Северном полушарии, занимая объем в 0.8 км^3, и продолжая расти. На сегодняшний день коллективом коллаборации получен ряд важных физических результатов: получено подтверждение существования диффузного потока космических нейтрино [5], получено указание на наличие нейтринного потока от плоскости Галактики [6], найден триплет высокоэнергичных событий вблизи плоскости Галактики [7], а также высокоэнергичное событие в направлении на блазар TXS 0506+056, скоррелированное по времени с радиовспышкой [8]. Все упомянутые результаты были достигнуты в анализе данных каскадных событий, в то время как трековый канал регистрации находился в разработке. Оптические свойства байкальской воды позволяют достичь углового разрешения при регистрации трековых событий в 1° и менее, что существенно лучше, чем 2°-5°, достижимые в каскадном канале. В сочетании со значительным эффективным объемом высокое угловое разрешение позволяет достичь рекордной чувствительности в поиске сигналов от астрофизических объектов с малым угловым размером. В частности, это касается объектов, расположенных в южном небесном полушарии, где IceCube имеет относительно слабую чувствительность. В самом деле, наилучшая чувствительность к квази-точечным источникам нейтрино достигается при анализе трековых событий, приходящих из нижней полусферы, где фон от атмосферных мюонов подавлен. Для IceCube нижняя полусфера – это Северное небесное полушарие. Для Baikal-GVD наблюдаемая область неба зависит от времени суток, а наилучшая чувствительность в трековом канале регистрации достигается для объектов в Южной небесной полусфере.

Настоящая работа посвящена поиску локальных (квази-точечных с точки зрения наблюдателя) космических источников нейтрино на основе данных Baikal-GVD, используя трековый канал регистрации. Работа включает в себя разработку и оптимизацию процедуры поиска источников, практическое применение разработанной процедуры к данным Baikal-GVD в трековом канале, количественную оценку чувствительности анализа и расчет верхних пределов, используя предварительно составленный список объектов-кандидатов на роль космических источников нейтрино.

Целью работы является обнаружение астрофизических источников нейтрино высоких энергий (при наличии достаточно ярких источников на небе) по экспериментальным данным телескопа Baikal-GVD, полученных в трековом канале, и вычисление верхних пределов на поток нейтрино от ряда астрофизических объектов из предварительно сформированного списка.

Задачи исследования:

1. Разработка программного обеспечения и численных алгоритмов для поиска источников в трековом канале эксперимента Baikal-GVD.

2. Разработка алгоритма и программного обеспечения для оптимизации критериев отбора нейтринных событий в режиме пуассоновской статистики для разных значений экспозиции.

3. Оптимизация критериев отбора для получения наилучшей чувствительности к потоку нейтрино с различным спектром, в частности, для E^{-2}.

4. Применение разработанных алгоритмов к экспериментальным данным Baikal-GVD и постановка ограничений на поток нейтрино от различных астрофизических объектов по заранее сформированному списку.

5. Сравнение полученных результатов с результатами других нейтринных экспериментов.

6. Изучение возможностей по дальнейшему улучшению чувствительности анализа трековых данных Baikal-GVD, включая использование метода максимального правдоподобия.

Методы исследования

Разработка методики анализа данных Baikal-GVD и алгоритмов оптимизации этого анализа опиралась на использование численных методов моделирования физических процессов (Монте-Карло моделирование) и сравнение смоделированных параметров с экспериментальными данными. Результаты получены с использованием общепринятого в физике высоких энергий подхода к работе с данными, когда от исследователя скрыта информация о действительных параметрах событий в установке (направление, энергия) в процессе разработки анализа и оценки его чувствительности (слепой анализ). Для постановки верхних пределов на поток использовались такие статистические методы, как подход Фельдмана – Кузинса

[9] к построению доверительных интервалов, а также метод оценки максимального правдоподобия [10] в контексте проверки статистических гипотез для задач нейтринной астрономии [11].

Научная новизна работы:

- Впервые разработан комплексный алгоритм, позволяющий оптимизировать критерии отбора трековых событий в задаче поиска локальных (с угловым размером менее 2 градусов) астрофизических источников нейтрино по данным Baikal-GVD, в т. ч. в режиме малой статистики («пуассоновский режим»).

- С помощью разработанного алгоритма впервые проведена оптимизация анализа по поиску локальных источников нейтрино по данным Baikal-GVD. Впервые в эксперименте Baikal-GVD получены количественные оценки чувствительности анализа с учетом всех существенных факторов, включая «живое время» набора данных и состояние отдельных компонентов детектора в различные периоды.

- Впервые в эксперименте Baikal-GVD получены ограничения на потоки нейтрино высоких энергий от локальных источников в трековом канале регистрации по данным с длительной экспозицией (четыре года). Впервые достигнута чувствительность к локальным источникам, превышающая чувствительность других нейтринных телескопов, расположенных в Северном полушарии, – ANTARES и KM3NeT ($\sim 5 \cdot 10^{-9}$ ГэВ см$^{-2}$сек$^{-1}$ для спектра E^{-2} на 90%-м доверительном уровне). Впервые получены указания на возможное существование потока нейтрино высоких энергий из области расположения звездного скопления Вестерлунд 1.

Практическая значимость:

Разработанная методика отбора трековых событий и созданный автором программный комплекс расширяют возможности анализа данных Baikal-GVD, позволяя включить трековый канал в программу исследования астрофизических источников на полноценной основе. Полученные ограничения на потоки нейтрино от локальных источников имеют научное значение для астрофизических исследований и сопоставления результатов Байкальского телескопа с результатами других крупномасштабных нейтринных экспериментов (ANTARES, KM3NeT и IceCube).

Результаты работы уже непосредственно используются в научных учреждениях-участниках коллаборации Baikal-GVD для дальнейшего совершенствования методики анализа данных и ускорят исследования разных классов астрофизических объектов как источников нейтрино.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Процедура отбора трековых событий в данных детектора Baikal-GVD, обеспечивающая оптимальную чувствительность в задаче поиска локальных астрофизических источников нейтрино с заданным энергетическим спектром, в т. ч. в условиях малой статистики. Используются события из нижней полусферы, что позволяет минимизировать фон от атмосферных мюонов.

2. Оригинальный комплекс программного обеспечения для статистического анализа пространственного распределения треков и расчета верхних пределов на поток от локальных источников.

3. Первые количественные оценки дифференциальной чувствительности трекового канала телескопа Baikal-GVD к нейтринному излучению локальных источников в зависимости от их склонения в области видимости телескопа и показателя степенного спектра (рассматривались три индекса: -2; -2.5; -3).

4. Ограничения (верхние пределы на 90% доверительном уровне) на поток нейтрино от локальных астрофизических источников в Южном небесном полушарии, полученные на основе анализа экспериментальных данных Baikal-GVD в трековом канале. Поиск сигнала осуществлялся по списку источников из 92 астрофизических объектов, в том числе от центральной части Галактики и радиоблазара TXS 0506+056. В анализе использованы данные, набранные с апреля 2019 г. по март 2024 г., что включает в себя 988 событий-кандидатов в нейтрино с энергиями в диапазоне от $\sim$100 ГэВ до $\sim$1 ПэВ. Статистически значимых превышений над фоном не обнаружено. Объектом с наибольшей статистической значимостью среди объектов-кандидатов ($2.7\,\sigma$ без учета поправки на число просмотренных объектов) является молодое звездное скопление Вестерлунд 1.

Достоверность результатов

Все результаты были опубликованы в рецензируемых научных изданиях, а также изложены на международных и российских конференциях. Кроме того,

достоверность полученных результатов подтверждается:

- Использованием верифицированных внутри коллаборации Baikal-GVD массивов экспериментальных данных и стандартных пакетов Монте-Карло моделирования.

- Применением строгих методов математической статистики при обработке данных и написании авторского кода.

- Хорошим качественным и количественным согласием полученных зависимостей верхних пределов от склонения с независимыми результатами глубоководного нейтринного эксперимента ANTARES, полученными в аналогичных физических условиях.

Апробация исследования

Основные результаты по теме диссертации были представлены на следующих международных и российских конференциях, а также рабочих совещаниях коллаборации «Байкал»:

1. 29th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, Дубна, 27 – 30 октября 2025 года.

2. 39-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, 29 июня – 3 июля 2026 года.

3. Рабочие совещания коллаборации «Baikal-GVD» дважды в 2023, 2024, 2025 и 2026 годах.

Личный вклад автора:

Все результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. В частности:

- разработан и применен алгоритм оптимизации критериев отбора для достижения наилучшей чувствительности к астрофизическому потоку нейтрино со спектром E^{-2};

- применена методика оценки чувствительности трекового анализа для квазиточечных астрофизических объектов;

- впервые получены верхние пределы в трековом канале регистрации на астрофизический поток для локальных объектов-кандидатов в нейтринные источники для различных спектральных индексов;

- разработан и применен в рамках коллаборации алгоритм оценки чувствительности при помощи небинированного метода максимального правдоподобия.

Автор на протяжении четырёх лет принимал активное участие в монтажных работах по расширению и модернизации телескопа и наладке механического оборудования.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в 2 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК; статье, вышедшей в сборнике трудов конференции ICRC 2025, а также в виде патента программы ЭВМ:

1. Search for point-like neutrino sources with Baikal-GVD / E. Bondarev, D. Zaborov [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // PEPAN Letters. – 2026. – Vol. 23, iss. 5. – P. 569 – 572.

2. Первые ограничения на точечные астрофизические источники нейтрино с использованием мюонных событий в Baikal-GVD / А. В. Аврорин, . . . , Е. А. Бондарев, [и др.] (Baikal-GVD Collaboration) // Письма в Астрономический журнал. – 2026. – Т. 52, № 5. – С. 213 – 222.

3. Towards neutrino astronomy with tracks at the Baikal-GVD // G. Safronov, E. Bondarev and D. Zaborov [et al.] (Baikal-GVD Collaboration) // Proc. of Sci. – 2025. – PoS ICRC2025. – P. 1162.

4. Е. А. Бондарев, GVDSensitivityOptimization – программа для оптимизации критериев отбора событий для достижения наилучшей чувствительности анализа к потоку астрофизических нейтрино на телескопе Baikal-GVD: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026686615 Российская Федерация : № 2026684852 : заявл. 14.08.2026 : опубл. 01.09.2026, Бюл. № 9 / Е. А. Бондарев, Д. Н. Заборов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 120 страниц, включает в себя 74 рисунка, а также 3 таблицы. Библиографический перечень содержит 100 наименований.

Содержание диссертации

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, формулировку цели работы и задач исследования, а также положений, выносимых на защиту.

В **первой главе** описываются физические механизмы образования нейтрино. Вкратце приводится описание состояния физики космических лучей (КЛ), обсуждаются механизмы ускорения заряженных КЛ и энергетические пределы, реализуемые в источниках. Рассматриваются потенциальные источники высокоэнергичных нейтрино, а также открытые на данный момент. Приводится описание физического принципа регистрации нейтрино высоких энергий в естественных средах по излучению Вавилова-Черенкова, описывается возникновение атмосферных мюонов и нейтрино в каскадах вторичных частиц, рожденных первичными космическими лучами в верхних слоях атмосферы. Также приводится описание существующих нейтринных телескопов, в частности, краткий обзор установки-пионера в области нейтринной астрономии высоких энергий, предшественника эксперимента Baikal-GVD – телескопа НТ-200 и его модификации НТ-200+.

Вторая глава диссертации посвящена описанию конструкции телескопа Baikal-GVD. Она включает в себя общие сведения об устройстве установки, используемых ФЭУ, оптических свойствах байкальской воды, являющейся мишенью для нейтрино. Так, элементарной единицей телескопа можно считать оптический модуль (ОМ), состоящий из 10-дюймового ФЭУ (Hamamatsu R7081-100), высоковольтного источника питания и блока электроники для первичной обработки сигнала, помещенных внутрь прочной стеклянной сферы, устойчивой к высокому внешнему давлению. Подробная схема и составные части ОМ показаны на рис. 1.

Оптические модули смонтированы на вертикальных гирляндах — притопленных буйковых станциях. Каркасом такой станции является кабель-трос из нержавеющей стали, закрепленный якорем на дне. Натяжение создается за счет ОМ, имеющих положительную плавучесть, а также буйковых поплавков в вершине

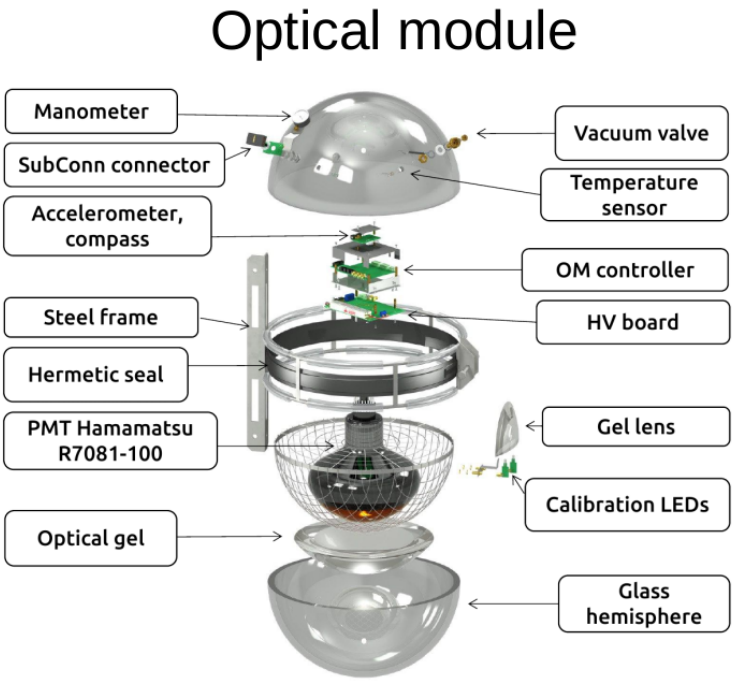


Рис. 1: Схема оптического модуля.

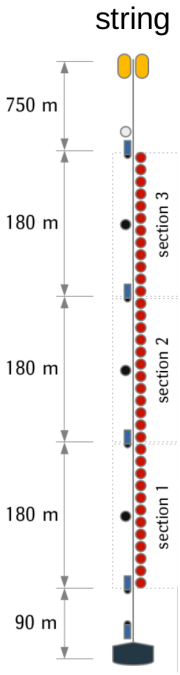


Рис. 2: Схема гирлянды.

гирлянды. Каждая гирлянда несет 36 ОМ с шагом 15 м по вертикали, на глубинах между 750 м и 1275 м под поверхностью озера. Гирлянды объединены в кластеры, каждый из которых содержит по 8 гирлянд, расположенных внутри кластера на расстоянии 60 м друг от друга; расстояние между центрами кластеров составляет 250–300 м. Дополнительные межкластерные гирлянды оснащены лазерными импульсными источниками света и в некоторых случаях также оптическими модулями. На рис. 2 представлена схема гирлянды: красные кружки – ОМ, черные – модули секций, белый – модуль гирлянды, синие прямоугольники – гидрофоны. На рис. 3 показана схема детектора в конфигурации на момент середины 2026 года.

Моделирование потоков атмосферных мюонов и нейтрино, а также нейтрино со спектром E^{-2} осуществляется при помощи разработанного внутри коллаборации пакета SimGVD. Существующий алгоритм трековой реконструкции позволяет достичь углового разрешения до $\approx 0.2^\circ$ для треков, видимая длина которых достигает $\approx$ 500 м (рис. 4). Для учета эффекта ослабления потока нейтрино при прохождении сквозь Землю при помощи пакета νFATE вычисляются коэффициенты ослабления потока, зависящие от зенитного угла и энергии частицы на входе в установку [13; 14].

Завершается глава описанием физических результатов, полученных коллективом коллаборации на телескопе Baikal-GVD.

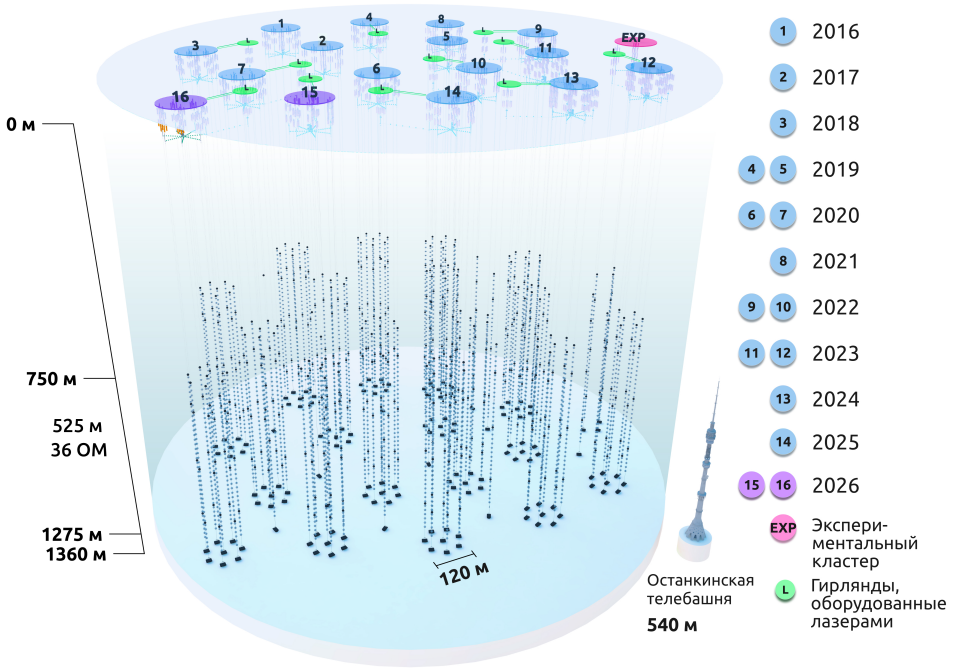


Рис. 3: Схематичное изображение детектора Baikal-GVD. Подпись справа показывает прогресс строительства телескопа по годам.

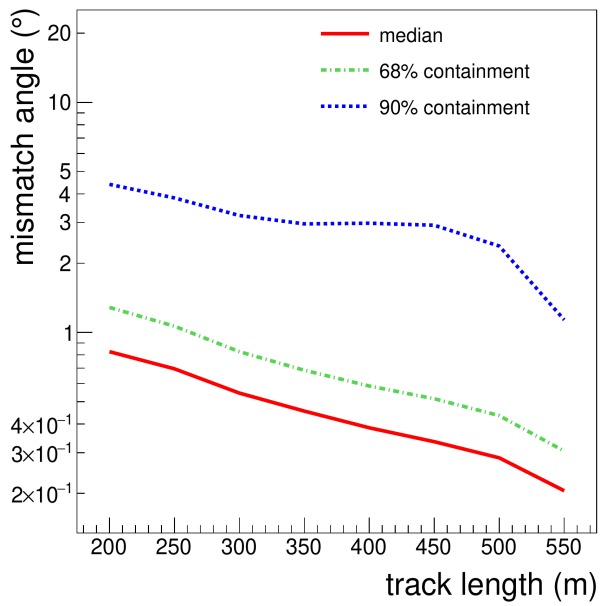


Рис. 4: Угловая точность восстановления направления трека мюона в трековом канале Baikal-GVD в зависимости от наблюдаемой длины трека. Взято из [12].

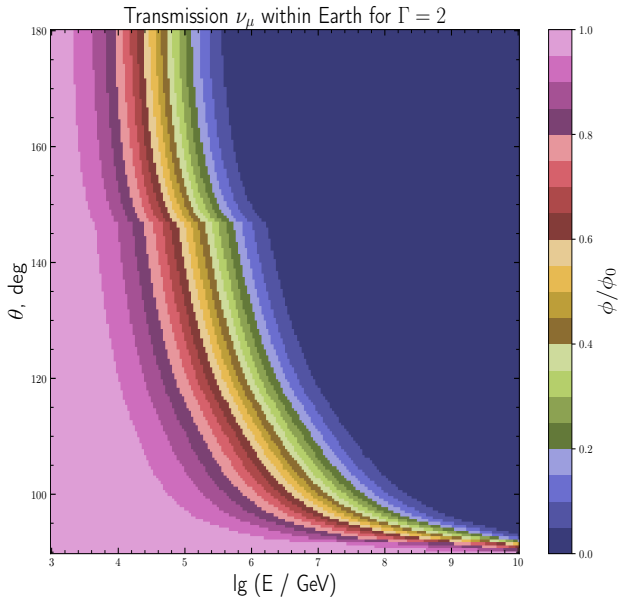


Рис. 5: Матрица коэффициентов ослабления потока для мюонных нейтрино со спектральным индексом $\gamma = 2$, построенная при помощи пакета νFATE [13; 14].

В **третьей главе** представлено описание проведенного автором исследования по разработке и реализации анализа по поиску локальных источников нейтрино.

Анализ заключается в подсчете отобранных событий из реальных данных, попавших в конус поиска вокруг какого-либо астрономического объекта-кандидата в источники. Внутри конуса поиска оценивается средний уровень фона (рис. 6). Сравнение числа экспериментально зарегистрированных событий в пределах конуса поиска с оцененным уровнем фона в этом конусе поиска позволяет проверить гипотезу о наличии сигнала от источника, а при отсутствии значимого сигнала - поставить верхний предел на число сигнальных событий и, следовательно, на поток нейтрино от источника. Чувствительностью анализа будем называть средний ожидаемый верхний предел на 90% доверительном уровне (д. у.) на поток нейтрино от источника γ.

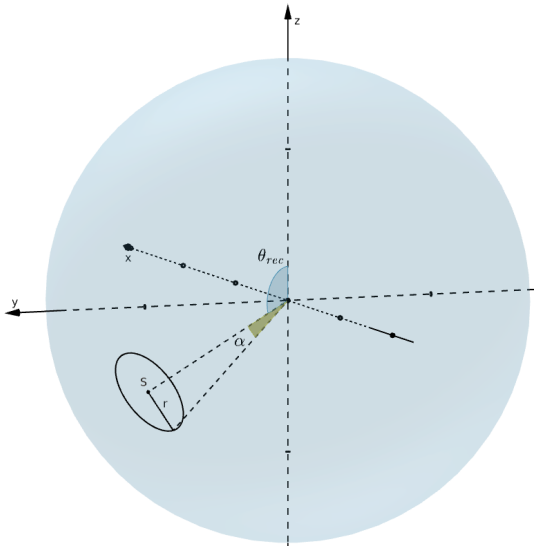


Рис. 6: Схематичное изображение поиска событий от источника: подсчет событий в конусе поиска с радиусом α. Реконструированный зенитный угол обозначен θ_{rec}.

Поток нейтрино от источника как функция энергии в ограниченном энергетическом диапазоне приближенно может быть описан степенной функцией:

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}E_\nu} = \phi(E_\nu, \gamma) = \phi_0 \left(\frac{E_\nu}{E_0}\right)^{-\gamma}, \tag{1}$$

где E_ν – энергия нейтрино, γ – спектральный индекс, ϕ_0 – нормировка потока, E_0 – произвольно выбранная опорная величина энергии.

В настоящей работе использовался набор модельных данных (Монте-

Карло) для трёх типов событий: атмосферных мюонов, атмосферных нейтрино и нейтрино со спектром E^{-2}. Для расчета ожидаемого числа сигнальных событий N_s в данном анализе использовались нейтрино со спектром E^{-2}, которые могут быть перевзвешены на другую желаемую форму спектра, в то время как фоном являлась совокупность атмосферных нейтрино и мюонов $N_b = N_\nu^{\mathrm{atm}} + N_\mu^{\mathrm{atm}}$. Оценка фона была выполнена с использованием реальных данных. С целью подавления фона проводится отбор событий с использованием классификатора на основе дерева решений (BDT_{HE}), включающего в себя множество параметров реконструкции. Отобранные события формируют выборку событий-кандидатов в нейтрино.

Вокруг каждого астрономического объекта из предварительно сформированного списка мы можем произвести подсчет числа событий-кандидатов в пределах заданного конуса поиска (см. рис. 6). Зная средний ожидаемый уровень фона N_b в пределах конуса поиска и число попавших в него событий, можем получить верхний предел по методу Фельдмана-Кузинса [9] на число сигнальных событий на 90% д.у. $n_s^{90\%C.L.}$. Полученный верхний предел на число сигнальных событий может быть легко пересчитан в величину потока:

$$\Phi^{90\%C.L.} = \frac{n_s^{90\%C.L.}}{N_s} \cdot \phi_0, \tag{2}$$

где ϕ_0 является нормировкой потока нейтрино от источника, использованной при расчете, для которой предсказывается ожидаемое число сигнальных событий N_s.

Для оценки чувствительности выполнялся розыгрыш большого числа псевдоэкспериментов, результатом каждого из которых являлось число попавших в зону поиска событий и соответствующий верхний предел, рассчитанный как показано выше. Полученный результат усреднялся по всем псевдоэкспериментам, а замена в формуле (2) $n_s^{90\%C.L.}$ на $\langle n_s^{90\%C.L.} \rangle$ позволила получить оценку среднего ожидаемого верхнего предела на поток нейтрино от источника, т.е. чувствительность.

Описываемый анализ имеет два настраиваемых параметра, влияющих на его чувствительность: угол раствора конуса поиска и минимальное значение величины BDT_{HE}. По техническим причинам оптимизация данных BDT_{HE} проводится в два этапа: предварительный и окончательный. Задачей предварительного этапа является выбор такого значения параметра, которое позволяет подавить основную часть фона и может служить хорошей стартовой точкой для запуска алго-

ритма окончательной оптимизации. На рис. 7 показано распределение параметра BDT_{HE} для модельных данных однокластерной реконструкции. График отражает распределение данной величины для соответствующих типов модельных данных на примере 2019 года. Результатом предварительной оптимизации стало значение $BDT_{HE} \geq 0.1$. Как видно из графика (рис. 7), такое значение BDT_{HE} пропускает достаточно много фона от атмосферных мюонов.

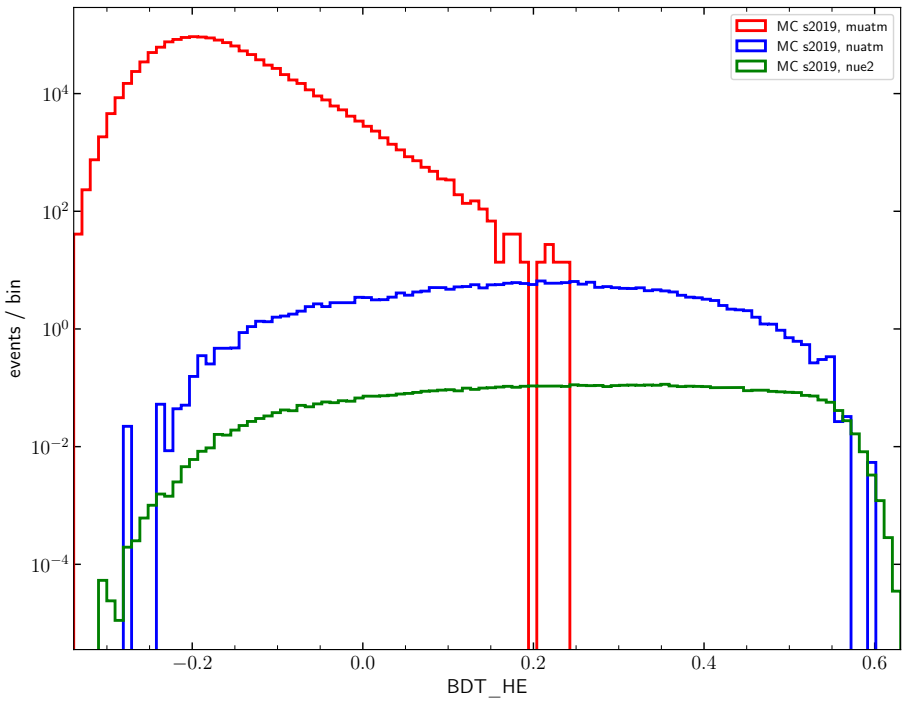


Рис. 7: Распределение параметра BDT_{HE} на основе Монте-Карло для однокластерной реконструкции на примере 2019 года. Красным показаны атмосферные мюоны, синим – атмосферные нейтрино, а зеленым – нейтрино со спектром E^{-2}. Все события реконструированы как восходящие. Живое время составляет 750 кл.-дней (суммарное по всем кластерам время накопления статистики в днях; кл.-лет – в годах). По оси ординат отложено число событий в бине за 750 кл.-дней. Для спектра E^{-2} учтено поглощение в Земле.

После проведения предварительной процедуры оптимизации и получения начального значения критерия отбора по BDT_{HE}, выполнялась более тонкая настройка критериев отбора как по BDT_{HE}, так и по угловому размеру конуса поиска α. Для каждого параметра (с заданным шагом) выполнялась оценка верхнего предела на поток на 90% д.у. $\Phi^{90\%CL}$. Значения параметров, обеспечивающих минимальную величину потока, выбирались в качестве оптимальных. На рис. 8 и 9 проиллюстрировано определение оптимальных значений для величин α и BDT_{HE} соответственно. Оба графика (рис. 8 и 9) получены для экспозиции длительно-

стью 7.9 кл.-лет (сезоны 2019 и 2020). В результате нескольких итераций работы алгоритма были получены значения двух параметров анализа $\alpha \leq 2^{\circ}$ и $BDT_{HE} \geq 0.25$.

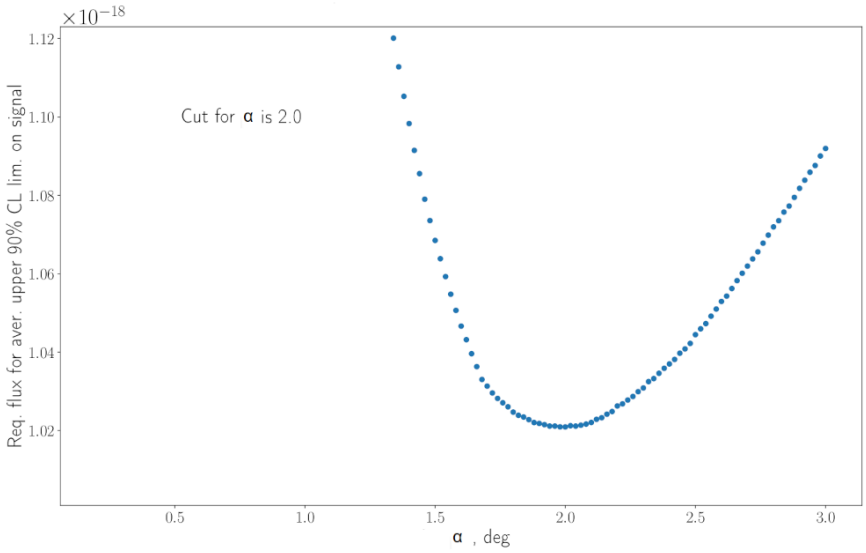


Рис. 8: Определение оптимального значения радиуса конуса поиска α. Положению минимума соответствуют искомое значение $\hat{\alpha}$.

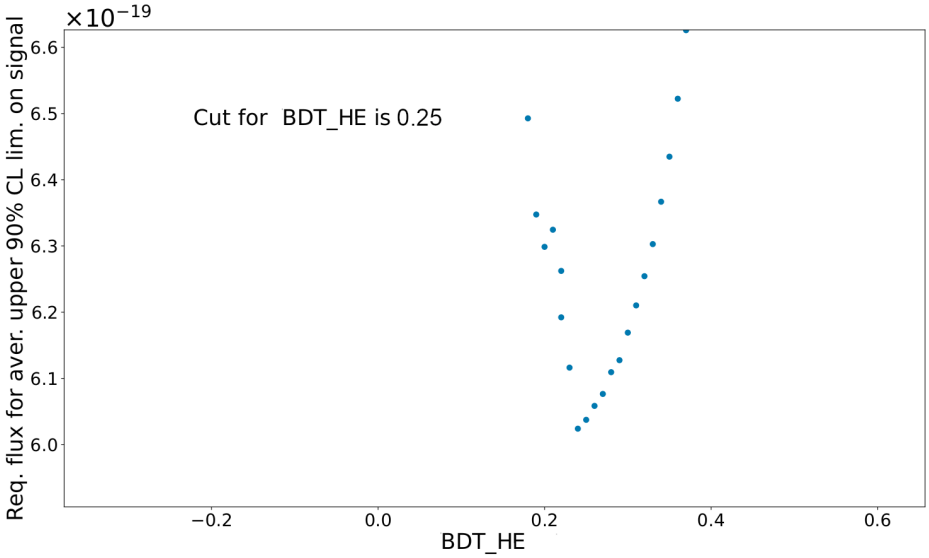


Рис. 9: Аналогично рис. 8, изображена зависимость $\Phi^{90\%CL}$ от оптимизируемой переменной. В данном случае – BDT_{HE}.

Используя найденные значения критериев отбора, для нейтрино со спектром E^{-2} была получена оценка чувствительности за весь рассматриваемый в данном анализе период наблюдений. На рис. 10 показаны полученные кривые чувствитель-

ности в зависимости от склонения δ условного источника. Показано значительное улучшение чувствительности анализа с ростом длительности экспозиции.

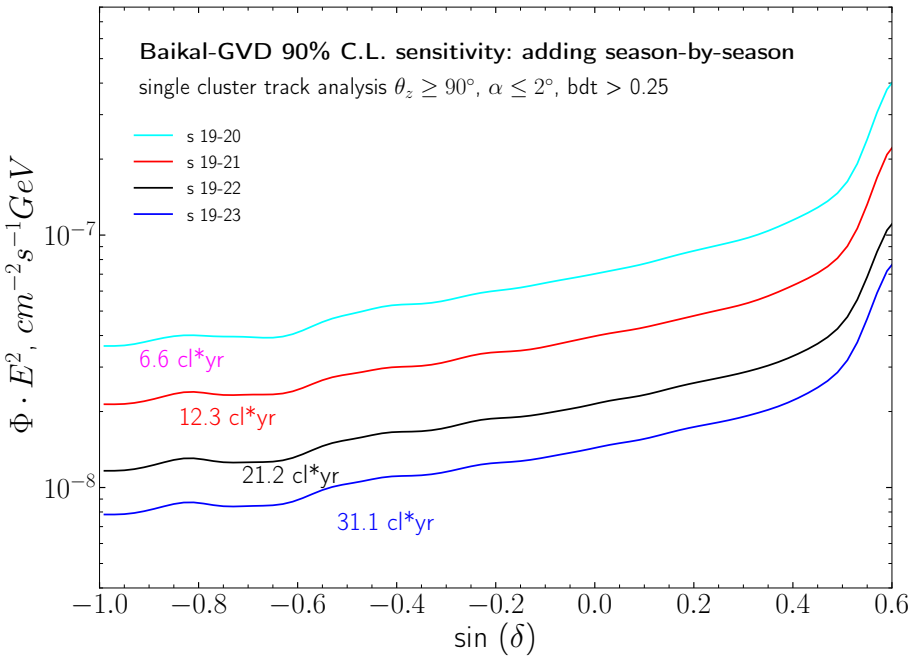


Рис. 10: Изменение чувствительности к потоку нейтрино со спектром E^{-2} при увеличении экспозиции за счет добавления статистики из новых сезонов.

В результате применения полученных ранее критериев отбора к реальным данным эксперимента Baikal-GVD получена выборка, которая содержит 988 событий-кандидатов в нейтрино с энергиями в диапазоне от ∼100 ГэВ до ∼1 ПэВ. В данном наборе преобладают события от атмосферных нейтрино с медианной энергией нейтрино порядка 1 ТэВ. На основе выборки трековых событий проводился целенаправленный поиск точечных источников нейтрино. Для этого был сформирован перечень интересующих нас астрономических объектов. После отбора объектов, находящихся в поле зрения нашего анализа ($\delta < +38.8°$), в этом списке осталось 92 объекта. Данный список включает в себя такие известные источники, как TXS 0506+056 и NGC 1068, а также опубликованное направление на нейтринное событие со сверхвысокой энергией KM3-230213A [15], Центр Галактики, некоторые объекты, ассоциируемые с нейтринными событиями и областями с повышенной плотностью нейтринных событий IceCube и ANTARES, а также ряд гамма-источников, таких как сейфертовские галактики и некоторые другие примечательные галактические и внегалактические объекты. Перечень объектов сформирован таким образом, чтобы охватить все объекты, для которых ранее заявлялись ассоциации (совпадения) с нейтринными событиями, а также ряд других объектов,

представляющих интерес для нейтринной астрономии, в особенности — внегалактических, однако он не претендует на полноту по какому-либо объективному критерию (полный список объектов находится в Приложении А диссертации).

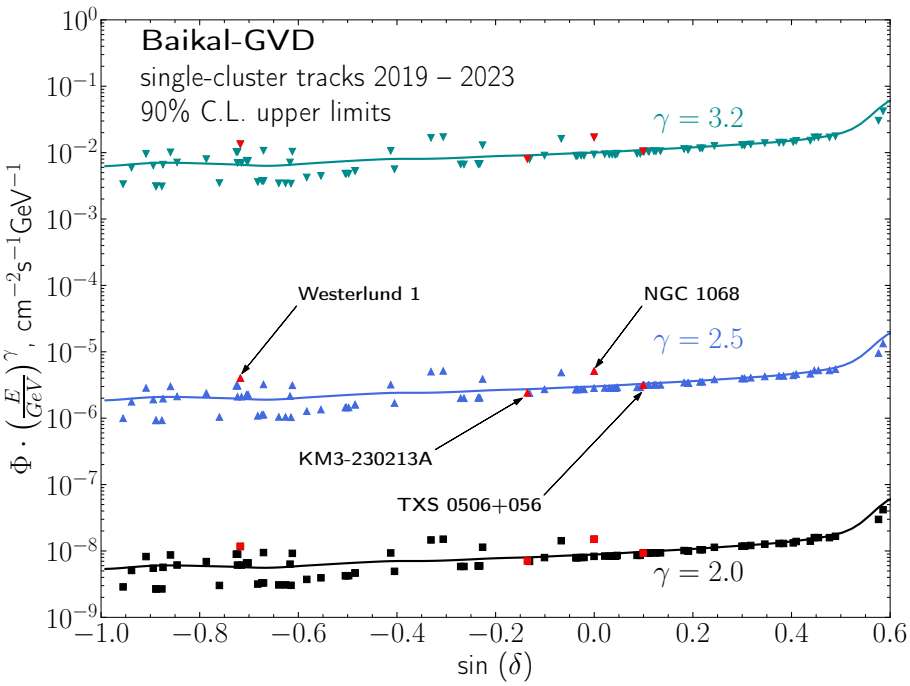


Рис. 11: Чувствительность к локальным (квази-точечным) источникам нейтрино (ожидаемый средний верхний предел на 90% д.у. на поток нейтрино одного аромата, сплошные цветные линии) и верхние пределы на 90% д.у. на поток, посчитанные для трех предполагаемых спектральных индексов γ для списка из 92 источников-кандидатов, используя выборку трековых событий Baikal-GVD, зарегистрированных в период с апреля 2019 г. по март 2024 г. (квадраты и треугольники).

Для периода набора данных Baikal-GVD с апреля 2019 года по март 2024 года были получены оценки чувствительности нашего анализа к локальным (квазиточечным) источникам нейтрино в предположении, что поток нейтрино подчиняется степенному закону со спектральными индексами γ = 2.0; 2.5; 3.2 (рис. 11). Величины верхних пределов приведены в диссертации для суммы потоков мюонных нейтрино и анти-нейтрино с учетом эффекта ослабления потока в Земле. Объектом с наибольшим числом событий-кандидатов в нейтрино, попавших в конус поиска 2° (три события), является молодое звездное скопление Вестерлунд 1 [17]. Ожидаемый уровень фона для данного объекта составляет 0.98 событий. Соответствующее значение вероятности для нулевой гипотезы до коррекции на количество просмотренных объектов (предварительное p-значение) составляет 0.0036, что соответствует значимости 2.7 σ (без учета штрафного фактора). Полученные результаты находятся в согласии с нулевой гипотезой, т.е. наличием фона

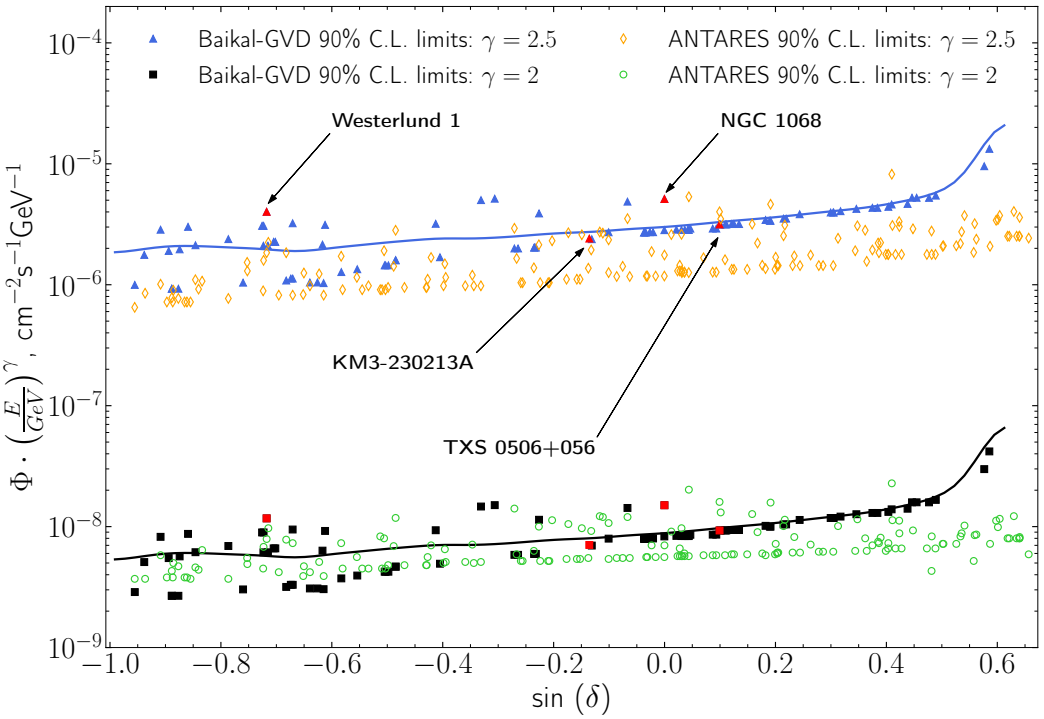


Рис. 12: Сравнение результатов Baikal-GVD (квадраты и треугольники сплошным цветом) с верхними пределами ANTARES за 15 лет [16] (пустые кружки и ромбы).

при отсутствии сигнала. Отсутствие статистически значимого превышения над фоном для NGC 1068 ожидаемо, принимая во внимание тот факт, что суммарная экспозиция в данном анализе на порядок меньше накопленной экспозиции IceCube, позволившей обнаружить этот источник на уровне значимости $4\,\sigma$ [4]. Тот же аргумент применим и к TXS 0506+056 с поправкой на неопределенность, обусловленную переменной природой этого источника [3; 18].

Верхние пределы, представленные в данной работе, не учитывают систематических ошибок. Результаты, представленные в настоящей работе, используют ограниченный набор данных Baikal-GVD, а также упрощенные методы реконструкции и анализа. Экспозиция анализа соответствует 30 кластеро-годам, или 1.5 годам работы детектора в полной конфигурации (1 км^3). Как можно видеть, достигнутая чувствительность уже сравнима с чувствительностью телескопа ANTARES, достигнутой по результатам 15 лет наблюдений [16] (см. рис. 12). Можно утверждать, что представленные в настоящей работе верхние пределы на поток нейтрино сравнимы с пределами, опубликованными другими экспериментами, и, таким образом, вносят значительный вклад в суммарную чувствительность мировой сети нейтринных телескопов. Чувствительность анализа данных Baikal-GVD будет улучшена по мере роста детектора и накопления статистики, а также по мере

улучшения методики анализа.

Четвертая глава посвящена разработке усовершенствованной версии анализа, использующей метод максимального правдоподобия и статистическую проверку гипотез.

В нейтринной астрономии для оценки физических параметров широко применяется небинированный метод максимального правдоподобия, а для проверки гипотез используется соотношение правдоподобий [10; 11]. В сравнении с простым анализом, основанным на подсчете числа событий, удовлетворяющих четким критериям отбора, использование этих методов позволяет повысить чувствительность водного черенковского телескопа до ~ 2 раз для событий от источников с жестким ($\gamma \sim 2$) спектром [11].

Пусть имеются две противоположные гипотезы о составе данных:

- наблюдаемые данные не содержат ничего кроме фона (H_0);
- данные представляют собой сочетание фона и сигнала (H_1). Доля сигнала в наборе данных неизвестна, как и то, какие события могут быть отождествлены с ним.

Назовем их нулевой и альтернативной гипотезами, и обозначим H_0 и H_1 соответственно.

Количественную разницу в этих гипотезах покажет отношение функций правдоподобия, построенных для каждой из них. Функция правдоподобия использует информацию о пространственном распределении сигнала и фона, а также о форме их энергетического спектра.

Построим функцию правдоподобия следующим образом:

$$\ln \mathcal{L}(\mathbf{x_i}, n_s, E_i, \gamma) = \sum_{i=1}^{N} \ln \left[\frac{n_s}{N} \mathcal{S}(\mathbf{x_i}, \mathbf{x_s}, E_i, \gamma) + \left(1 - \frac{n_s}{N}\right) \mathcal{B}(E_i, \delta_i) \right] \qquad (3)$$

где $\mathcal{S}$ и $\mathcal{B}$ – функции плотности вероятности (в дальнейшем – ФПВ) для сигнала и фона соответственно, N – полное число восстановленных событий в рассматриваемой выборке данных, n_s – неизвестное число сигнальных событий, $\mathbf{x_i}$, $\mathbf{x_s}$ – небесные координаты i-го восстановленного события и источника, E_i – восстановленное значение энергии события, γ – спектральный индекс источника, δ_i – склонение i-го восстановленного события.

Функция плотности вероятности сигнала содержит две компоненты: пространственную и энергетическую. Предполагая, что сигнал сконцентрирован непосредственно вблизи направления на источник $\mathbf{x_s}$ и распределен в его окрестности согласно закону гауссового распределения, запишем пространственную компоненту сигнала в виде двумерного гауссового распределения. ФПВ для энергии учитывает распределение энергии для заданного спектрального индекса и определяется из МК. Таким образом, ФПВ для сигнала можно записать в следующем виде:

$$\mathcal{S}(\mathbf{x_i}, \mathbf{x_s}, \gamma, E_i) = \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{|\mathbf{x_i} - \mathbf{x_s}|^2}{2\sigma_i^2}\right) \cdot \mathcal{E}(E_i, \gamma, \theta_i) \tag{4}$$

где σ_i – угловая ошибка восстановления направления события, $\mathbf{x_i}$ – восстановленное направление прихода i-го события, γ – спектральный индекс источника, θ_i – зенитный угол восстановленного события.

Функция плотности вероятности фона состоит из двух компонент аналогично ФПВ сигнала. В отличие от сигнала, фон распределен по всей небесной сфере, поэтому пространственную ФПВ можно принять равной константе по всей области вблизи источника, нормированной на телесный угол данной области. Энергетический член описывает распределение фоновых событий по реконструированной энергии, характерное для фона, которое может быть определено из Монте-Карло либо из экспериментальных данных. Для удобства дальнейшего анализа фоновую ФПВ определим как функцию склонения, а не зенитного угла. В результате ФПВ фона имеет вид:

$$\mathcal{B}(\delta_i, E_i) = \frac{\mathcal{P}(E_i, \delta_i)}{\Omega_i}, \tag{5}$$

где Ω_i – телесный угол области вокруг источника, являющийся нормировочной константой для данной области (функция склонения).

На данном этапе работы энергетическая компонента ФПВ сигнала и фона не учитывается в анализе в целях его упрощения. Введение ФПВ энергии является следующим шагом в эволюции анализа.

Минимизируя $-\ln\mathcal{L}$ в уравнении (3) относительно n_s и γ, получим оптимальные значения $\hat{n_s}$ и $\hat{\gamma}$, и вычислим тестовую статистику $\mathcal{TS}$ как логарифм отношения нулевой $\mathcal{L}(\mathbf{x_i}, \hat{n_s} = 0)$ и альтернативной $\mathcal{L}(\mathbf{x_i}, \hat{n_s}, \hat{\gamma})$ гипотез. Таким образом, $\mathcal{TS}$ определяется как:

$$\mathcal{TS} = -2 \cdot \ln \left[\frac{\mathcal{L}(\mathbf{x_i}, \hat{n_s} = 0)}{\mathcal{L}(\mathbf{x_i}, \hat{n_s})} \right] \tag{6}$$

Используя описанный подход, моделировалась серия псевдоэкспериментов, где некоторый условный источник помещался в точку с координатами (δ, α') – склонением и прямым восхождением. Для серии таких псевдоэкспериментов строилось распределение $\mathcal{TS}$ для фона ($\mathcal{TS}_{bg}$, рис. 13), что необходимо для определения положения уровня 3σ, а также для дальнейшего расчета чувствительности для заданного доверительного уровня.

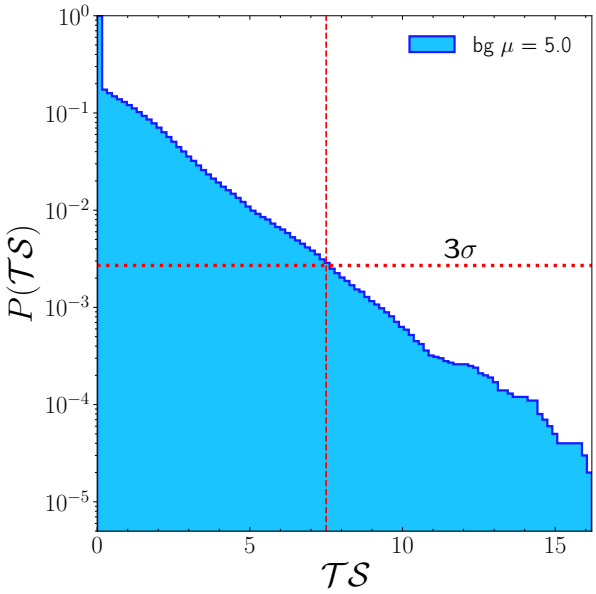


Рис. 13: Дополнительная кумулятивная функция распределения тестовой статистики, полученная по результатам серии псевдоэкспериментов с уровнем фона, равным 5.0, при отсутствии сигнала. Красная вертикальная линия показывает значение $\mathcal{TS}$, соответствующее доверительному уровню $3\,\sigma$.

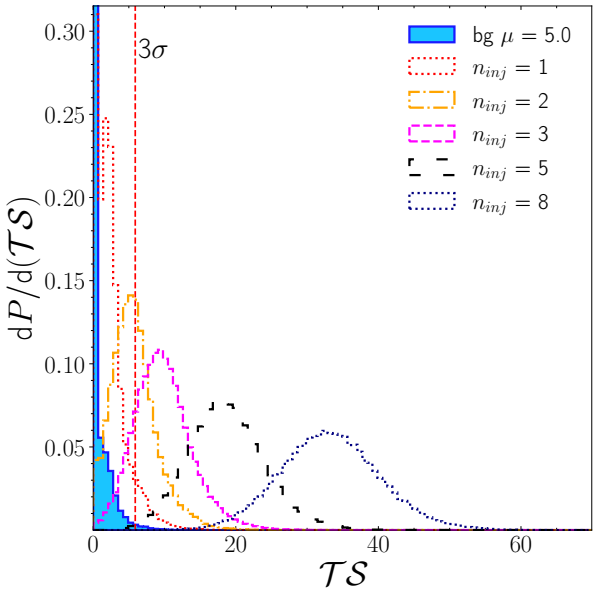


Рис. 14: Функция плотности вероятности тестовой статистики, полученная для нескольких значений числа инжектированных событий n_{inj}. Сплошным синим показано распределение ФПВ тестовой статистики для нулевой гипотезы (данные состоят только из фона).

Далее, инжектировались сигнальные события, ФПВ которых задается формулой (4), в неизменном количестве: одно, два, три и т. д. Положение инжектированных событий случайным образом было разыграно по двумерному нормальному распределению с фиксированным значением $\sigma = 0.5°$. В результате можно построить распределения функции плотности вероятности тестовой статистики (рис. 14). Добавление сигналоподобных событий, распределенных вблизи источника соглас-

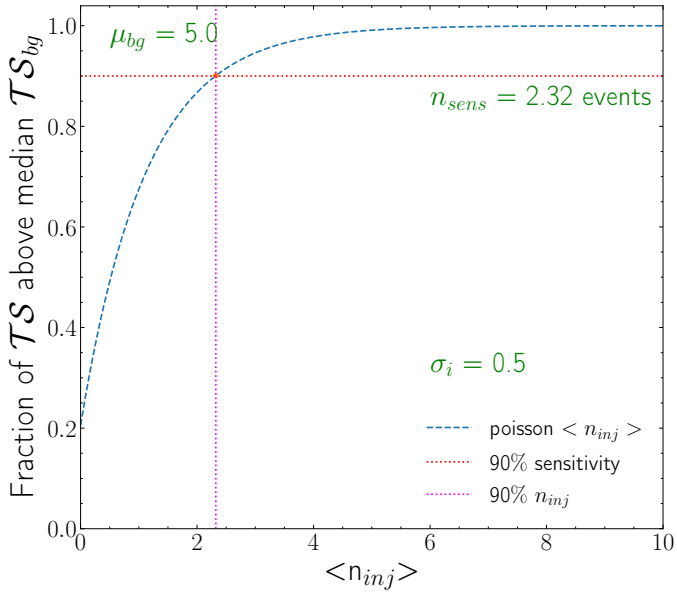


Рис. 15: Иллюстрация определения среднего числа инжектированных сигнальных событий, соответствующее чувствительности на 90% доверительном уровне.

но нашей гипотезе, увеличивает среднее ожидаемое значение $\mathcal{TS}$, указывая на то, что гипотеза H_1 более состоятельна. Медиана распределений $\mathcal{TS}$ сигнала монотонно растет с ростом числа инжектированных событий. Из рис. 14 видно, что для достижения порога $3\,\sigma$ по результатам псевдоэкспериментов достаточно 3 событий в половине случаев.

Используя данные о $\mathcal{TS}$ с примесью инжектированных сигнальных событий, была найдена такая величина среднего ожидаемого числа сигнальных событий, для которой 90% псевдоэкспериментов (со случайно разыгранными значениями числа сигнальных событий) дают значения $\mathcal{TS}$ больше, чем медиана $\mathcal{TS}_{bg}$ (рис. 15). Далее, был выполнен пересчет числа сигнальных событий в поток (см. формулу (2)) для различных склонений. Результирующие кривые чувствительности для спектров $E^{-2.5}$ и E^{-2}, построенные без учета энергии, показаны зеленым и фиолетовым пунктирами соответственно на рис. 16. На графике видно, что с использованием только пространственной компоненты функции правдоподобия чувствительность анализа для спектра E^{-2} улучшается по сравнению с простым анализом, основанным на подсчете событий внутри конуса поиска, в среднем на 12%. При этом в области склонений ниже $-30°$, где чувствительность анализа максимальна, а анализ выполняется в условиях существенного фона, эффект достигает почти 30%.

В **заключении** сформулированы основные результаты первого анализа по

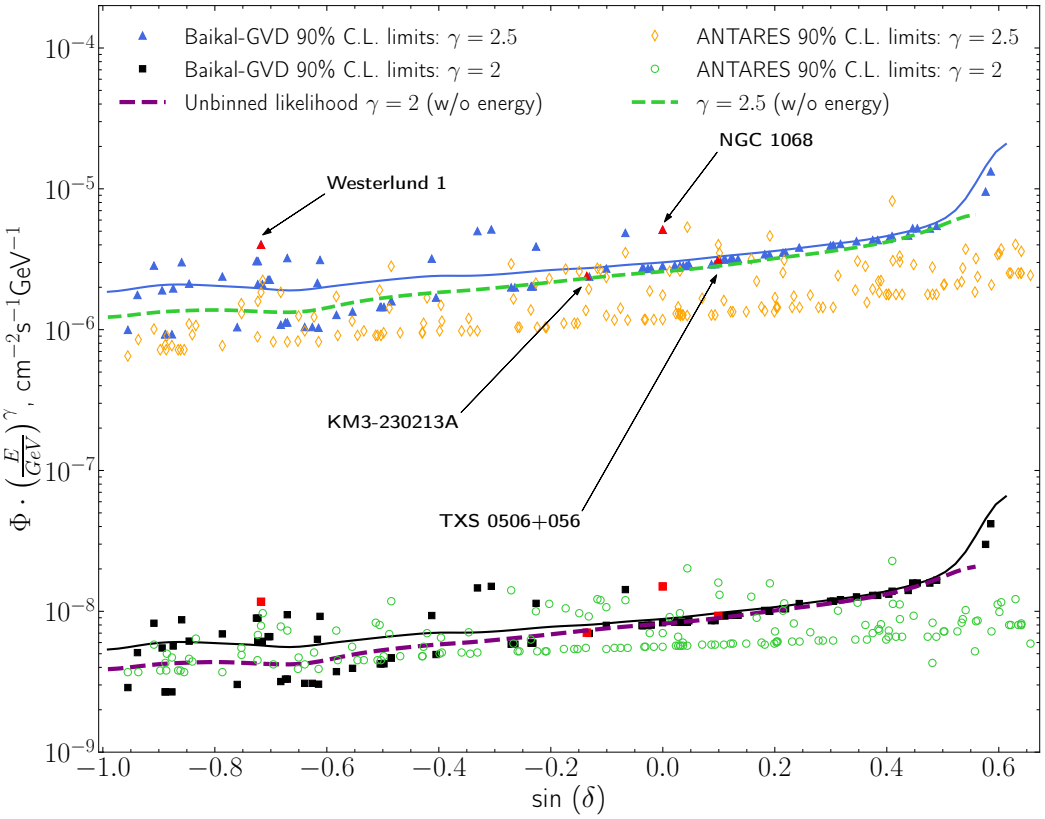


Рис. 16: То же, что на рис. 12, с дополнительными кривыми чувствительности, соответствующими анализу с использованием пространственной компоненты функции правдоподобия (зеленый пунктир для спектра $E^{-2.5}$, фиолетовый – спектра E^{-2}).

поиску локальных (квази-точечных) астрофизических источников нейтрино высоких энергий в данных глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD с использованием трекового канала регистрации. Проведенное исследование включает в себя решение комплекса задач: от разработки методики отбора событий и создания специализированного программного обеспечения до анализа многолетних экспериментальных данных и получения физических результатов.

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. Разработана и оптимизирована процедура отбора трековых событий для задач поиска локальных источников. Создан алгоритм, позволяющий оптимизировать критерии отбора событий в трековом канале регистрации Baikal-GVD для задачи поиска локальных астрофизических источников. Особенностью разработанной методики является ее применимость в условиях малой статистики («пуассоновский режим»), что позволяет работать с фоном и сигналом в рамках малых зон поиска. В качестве минимизируемой величи-

ны использовалось среднее ожидаемое значение верхнего предела на поток на 90% д.у. по методу Фельдмана-Кузинса [9]. Для минимизации фона от атмосферных мюонов анализ был ограничен событиями, приходящими из нижней небесной полусферы. Всё перечисленное позволило обеспечить оптимальную чувствительность анализа к излучению источников с заданным энергетическим спектром.

2. Создан специализированный комплекс программного обеспечения для статистического анализа данных телескопа Baikal-GVD, который обеспечивает выделение событий-кандидатов в нейтрино астрофизического происхождения, расчет верхних пределов на потоки нейтрино от локальных источников, оценку чувствительности анализа с учетом реальных условий накопления данных, включая различия в живом времени для разных кластеров в течение сезона, а также состояние отдельных гирлянд детектора в различные временные отрезки.

3. Впервые получены количественные оценки чувствительности к локальным астрофизическим источникам в трековом канале Baikal-GVD. В частности, получены оценки чувствительности в зависимости от склонения источника для различных показателей спектра (рассматривались индексы -2.0, -2.5 и -3.0). Показано, что чувствительность Baikal-GVD в трековом канале сравнима или превышает чувствительность других установок в Северном полушарии: ANTARES и KM3NeT.

4. Впервые получены экспериментальные ограничения (верхние пределы на 90% д.у.) на потоки нейтрино от ряда объектов-кандидатов в источники нейтрино по данным трекового канала Baikal-GVD. Анализ экспериментальных данных был выполнен на статистике, накопленной в период с апреля 2019 года по март 2024 года. Итоговая выборка после применения всех критериев отбора составила 988 событий-кандидатов в нейтрино с энергиями в диапазоне от $\sim$100 ГэВ до $\sim$1 ПэВ. Поиск совпадений в данных осуществлялся по предварительно составленному списку объектов, включающему 92 астрофизических объекта, в том числе область Галактического центра, известный блазар TXS 0506+056, галактику NGC 1068, а также направление на высокоэнергичное событие KM3-230213A. Анализ не выявил статистически значимого превышения над фоном. Полученные верхние пределы сопоста-

вимы с последними результатами измерений на установках ANTARES и KM3NeT.

5. Среди отобранных событий-кандидатов в нейтрино найдены возможные ассоциации с молодым массивным звездным скоплением Вестерлунд 1. Значение вероятности для нулевой гипотезы до коррекции на количество просмотренных объектов составляет 0.0036, что соответствует значимости 2.7 σ. И хотя этого недостаточно для констатации факта обнаружения сигнала от данного объекта, это является определенным маркером для более предметного изучения, поскольку Вестерлунд 1 теоретически рассматривается как возможный ускоритель частиц. Полученное указание на возможный поток нейтрино из этой области требует дальнейшего накопления статистики и уточнения методик анализа, что будет сделано в продолжении данной работы.

Список литературы

1. Doroshenko A. [et al.]. Preliminary results on a search for neutrinos from the center of the earth with the Baikal underwater telescope // DARK SIDE. — 1996. — P. 221.
2. Aartsen R. [et al.]. First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube // Physical review letters. — 2013. — Vol. 111, no. 2. — P. 021103.
3. Abbasi R. [et al.]. Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922 // Science. — 2018. — Vol. 361, no. 6398. — eaat1378.
4. Abbasi R. [et al.]. Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068 // Science. — 2022. — Vol. 378, no. 6619. — P. 538–543.
5. Allakhverdyan V. [et al.]. Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope // Physical Review D. — 2023. — Vol. 107, no. 4. — P. 042005.
6. Allakhverdyan V. A. [et al.]. Probing the Galactic Neutrino Flux at Neutrino Energies above 200 TeV with the Baikal Gigaton Volume Detector // The Astrophysical Journal. — 2025. — Mar. — Vol. 982, no. 2. — P. 73. — ISSN 1538-4357.
7. Allakhverdyan. V. [et al.]. Search for directional associations between Baikal Gigaton Volume detector neutrino-induced cascades and high-energy astrophysical sources // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — Vol. 526, no. 1. — P. 942–951.
8. Allakhverdyan V. [et al.]. High-energy neutrino-induced cascade from the direction of the flaring radio blazar TXS 0506+056 observed by Baikal-GVD in 2021 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2024. — Vol. 527, no. 3. — P. 8784–8792.
9. Feldman G. J., Cousins R. D. Unified approach to the classical statistical analysis of small signals // Phys. Rev. D. — 1998. — Apr. — Vol. 57, issue 7. — P. 3873–3889.

10. Suvorova O., Ovsiannikova T. Statistical approaches in search for astrophysical neutrino sources with Baikal deep underwater telescopes // arXiv preprint arXiv:1406.24 2014.

11. Braun J. [et al.]. Methods for point source analysis in high energy neutrino telescopes // Astroparticle Physics. — 2008. — Vol. 29, no. 4. — P. 299–305.

12. Allakhverdyan V. [et al.]. Muon Track Reconstruction Procedures at the Baikal-GVD Neutrino Telescope // Physics of Atomic Nuclei. — 2025. — Vol. 88, Suppl 4. — S401–S407.

13. Vincent A. C., Argüelles C. A., Kheirandish A. High-energy neutrino attenuation in the Earth and its associated uncertainties // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2017. — т. 2017, № 11. — с. 012—012.

14. Kleimenov M., Zaborov D. Expected Neutrino Rates from Point-Like Astrophysical Sources in Baikal-GVD // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2024. — т. 21, № 4. — с. 646—649.

15. Observation of an ultra-high-energy cosmic neutrino with KM3NeT // Nature. — 2025. — т. 638, № 8050. — с. 376—382.

16. Albert A. [et al.]. Search for steady and flaring neutrino emission from cosmic sources using the complete ANTARES dataset // The European Physical Journal C. — 2026. — Vol. 86, no. 8. — P. 918.

17. Aharonian F. [et al.]. A deep spectromorphological study of the γ-ray emission surrounding the young massive stellar cluster Westerlund 1 // Astronomy & Astrophysics. — 2022. — Vol. 666. — A124.

18. IceCube Collaboration [et al.]. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert // Science. — 2018. — Vol. 361, no. 6398. — P. 147–151.

Научное издание

Бондарев Евгений Александрович

Поиск локальных астрофизических источников
нейтрино высоких энергий
в трековом канале нейтринного телескопа Baikal-GVD

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Принято в печать 15.10.2025

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,2 Зак. № 034/26 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