

## ОТЗЫВ

**официального оппонента, доктора физико-математических наук Рогановой Татьяны Михайловны на диссертацию Шелепова Марка Дмитриевича на тему: «Выделение событий от ливней высоких энергий и восстановление параметров ливней в экспериментах на первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD» по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Диссертация Шелепова Марка Дмитриевича на тему «Выделение событий от ливней высоких энергий и восстановление параметров ливней в экспериментах на первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Диссертация посвящена решению актуальной задачи современной физики и астрофизики высоких энергий – созданию в Северном полушарии детектора для исследования природных потоков нейтрино на уровне чувствительности, соизмеримой детектором IceCube.

Экспериментальные исследования на оз. Байкал начались 40 лет назад. До недавнего времени исследования на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе NT200 и NT200+, определяли уровень нейтринной астрофизики. В 2011 году на Южном полюсе был введен в строй детектор IceCube, который, благодаря увеличению на один-два порядка чувствительности эксперимента, позволил впервые зарегистрировать нейтрино высоких энергий с энергиями около 1 ПэВ. За 7,5 лет наблюдений в данных IceCube выделено 60 кандидатов астрофизических нейтрино с энергией выше 60 ТэВ и вершиной взаимодействия во внутреннем объеме установки  $0,4 \text{ км}^3$ . Однако, источники этих нейтрино не идентифицированы.

На озере Байкал создаётся детектор кубокилометрового масштаба Baikal-GVD. В настоящее время (2021 г.) установка состоит из 8 кластеров, суммарное число оптических модулей составило 2304, эффективный объем для детектирования нейтрино с энергией выше 100 ТэВ  $0,4 \text{ км}^3$ . Чувствительность, достигнутая на телескопе Baikal-GVD, в задаче регистрации нейтрино по каскадной моде вплотную приблизилась к чувствительности IceCube. Задача создания в Северном полушарии детектора, способного вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube, но с гораздо лучшим угловым разрешением восстановления мюонных траекторий, безусловна актуальна.

**Целью работы** автора диссертации является:

- разработка методов восстановления параметров ливней (определение координат вершины взаимодействия нейтрино, направления развития ливня и его энергии), рожденных во взаимодействии нейтрино в байкальской воде;
- обработка данных телескопа за 2019–2020 годы;
- проведение анализа ливневых событий по триггеру оповещения от других установок в системе мульти-мессенджер и определение верхнего предела на плотность потока от выделенного вероятного источника нейтрино астрофизического происхождения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (60 ссылок) и списка рисунков и таблиц. Полный объем диссертации — 123 страницы.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, её научная новизна, достоверность, практическая значимость её результатов, обозначены цели и задачи исследования, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Все эти пункты представляются достаточно убедительными. Во введении также обозначен личный вклад автора в результаты диссертации. М.Д. Шелепов:

- участвовал в экспериментальных исследованиях, обработке и анализе данных, полученных на первых семи кластерах нейтринного телескопа Baikal-GVD. Им получен верхний предел на плотность потока нейтрино в гравитационном событии GW170817A;
- с 2013 года участвовал в зимних экспедициях на озере Байкал, где отвечал за монтаж глубоководных корпусов регистрирующей системы телескопа и тестирование работы аппаратуры телескопа с момента запуска и набора данных;
- разработал и включил в процесс автоматической обработки программные алгоритмы измерения амплитудных и временных калибровочных коэффициентов;
- контролировал стабильность работы спектрометрических каналов телескопа, что обеспечило возможность участия в международной программе многоканального анализа событий по триггеру оповещения от других установок (алерт-событий);
- выполнил анализ отклика оптического модуля телескопа Baikal-GVD на черенковское излучение ливней высоких энергий и выработал критерии подавления фоновых событий от атмосферных мюонов

**В первой главе** приводится описание структуры нейтринного телескопа Baikal-GVD, описываются методы и процедуры калибровки измерительных каналов. Принцип

работы основан на регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и каскадных ливней, образующихся в нейтринных взаимодействиях, пространственной решеткой фотодетекторов. Мишенью для нейтрино является прозрачная пресная вода оз. Байкал, что позволяет создавать детекторы масштаба нескольких кубических километров. Принципиальным требованием к конструкции телескопа являлась его модульная структура, которая обеспечивает возможность проведения физических исследований уже на ранних стадиях развертывания установки.

В диссертации подробно описывается конструкция телескопа, его калибровочная система, акустическая система позиционирования, которая используется для определения координат оптических модулей.

**Во второй главе** подробно обсуждаются методы и процедуры калибровки измерительных систем нейтринного телескопа Baikal-GVD. В ней рассматриваются аппаратура и методика амплитудной и временной калибровки каналов в широком динамическом диапазоне ( $10^2 - 10^5$  ф.э.), описан набор программ, позволяющих проводить калибровку измерительных каналов телескопа в режиме подводного функционирования установки в автоматическом режиме. На основе результатов калибровки и анализа точности, надежности и эффективности разработанных калибровочных процедур автор делает вывод, что достигнутая точность достаточна для задачи восстановления координат ливней высоких энергий, что позволяет использовать полученные результаты калибровок для анализа данных телескопа.

**В третьей главе** подробно описано **восстановление параметров каскадов высоких энергий**. Автором описывается процедура моделирования отклика оптического модуля (ОМ) на излучение Вавилова-Черенкова электромагнитных каскадов высоких энергий в байкальской воде. Рассмотрены оптические характеристики глубинных вод оз. Байкал, угловые и спектральные характеристики ОМ. Приведены результаты моделирования отклика ОМ на излучение каскада. В этой главе в разделе 3.2 рассмотрена также методика восстановления координат, энергии и направления каскада. Точность восстановления энергии и направления ливня оценивалась при восстановлении событий из набора данных, разыгранных методом Монте-Карло в детектирующем объеме кластера Baikal-GVD. Точность восстановления энергии 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  $2^\circ - 4^\circ$ .

**В четвертой главе** представлен анализ экспериментальных данных, приводятся результаты выделения ливневых событий и восстановление их параметров при обработке данных телескопа. Подробно описана стратегия поиска событий от нейтрино высоких энергий в нейтринном телескопе Baikal-GVD, основанная на моделировании событий от атмосферных мюонов и от нейтрино

В результате анализа экспериментальных данных, полученных с 2019 по 2020 годы за 2915 дней эффективного набора данных на нейтринном телескопе Baikal-GVD, было зарегистрировано  $6,34 \cdot 10^9$  событий. После применения процедур восстановления ливневых событий и наложения ограничений на количество сработавших каналов, а также дополнительного подавления фоновых событий число кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы составило 10 событий. Одно из этих событий имеет восстановленную энергию порядка 1 ПэВ. Одно событие восстановлено как событие из-под горизонта с зенитным углом  $109^\circ$ .

Анализ этих данных в четвертой главе был продолжен автором в режиме поиска нейтринных событий, совпадающих с оповещениями других нейтринных телескопов. В рамках международной программы многоканальных исследований было проанализировано девять трековых событий нейтринного телескопа IceCube. Источники этих событий зарегистрированы в Северной небесной полусфере с направлением для IceCube снизу вверх. Все события имеют энергию выше 100 ТэВ и хорошую точность восстановления направления прихода. На Baikal-GVD такие события должны наблюдаться как события сверху. Подробный анализ, который проиллюстрирован рисунками и таблицами показал, что на установке Baikal-GVD не выявлено статистически значимого превышения числа зарегистрированных каскадных событий, ассоциированных с рассмотренными событиями IceCube, над ожидаемым числом фоновых событий.

И наконец, М.Д.Шелепов в разделе 4.6 приводит результаты поиска нейтринного сигнала от события GW170817, зарегистрированного 17 августа 2017 года. Детекторы LIGO и Virgo зарегистрировали сигнал гравитационной волны GW170817 от столкновения двух нейтронных звезд, короткий всплеск гамма-излучения был зафиксирован детекторами Fermi-GBM и INTEGRAL. Последующие наблюдения в оптическом диапазоне позволили установить координаты источника гравитационной волны NGC 4993. Для поиска нейтрино, ассоциированного с гамма-излучением в событии GRB170817A, при анализе данных Baikal-GVD использовалось временное окно  $\pm 500$  сек вокруг гравитационного сигнала. Событий в интервале  $\pm 500$  сек, которые могли быть связаны с событием GW170817, не обнаружено, что позволяет установить ограничение на

поток нейтрино от такого источника. В диапазоне энергий от 5 ТэВ до 10 ПэВ на уровне достоверности 90% верхний предел на нейтринный поток со спектром  $E^{-2}$  согласно статистике Фелдман-Кузинс составил  $5.2 \times (E/\text{ТэВ})^{-2} \text{ ГэВ}^{-1}\text{см}^{-2}$  для временного окна +500 секунд и  $9 \times (E/\text{ТэВ})^{-2} \text{ ГэВ}^{-1}\text{см}^{-2}$  для временного окна +14 суток. Полученные ограничения сверху на плотность потока нейтрино в известном гравитационном событии GW170817A сопоставимы с результатами мировых экспериментов.

**В заключении** автор приводит 7 основных результатов диссертационной работы:

1. Разработаны **методы калибровки** оптического модуля, позволяющие проводить калибровку в режиме подводного функционирования установки с точностью  $\sim 2$  нс, что обеспечивает точность реконструкции направления треков меньше градуса.

2. Разработаны **новые алгоритмы и программное обеспечение** для автоматической калибровки, позволяющие в короткие сроки проводить калибровку оптических модулей на всех кластерах установки, при любом их количестве.

3. Впервые для кластера Baikal-GVD сделана **оценка точности калибровки** и эффективности алгоритма восстановления параметров ливней высоких энергий путем восстановления координат лазерного калибровочного источника: точность восстановления координат ливня до 3 метров, медианное значение в определении направления  $3.5^\circ$  и 30% погрешность восстановления энергии ливня.

4. Впервые для кластера Baikal-GVD показана **область направлений** и расстояний от вершины взаимодействия нисходящих ливней с **эффективностью регистрации не менее 90%**, полученная из моделирования отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде.

5. Впервые по данным Baikal-GVD выделены нейтринные события с энергией выше 60 ТэВ и выше 100 ТэВ, как **кандидаты** на события **астрофизического происхождения**.

6. Впервые по данным Baikal-GVD в режиме обработки данных проведен анализ оповещений от нейтринного телескопа IceCube. Корреляций каскадов с алертами по направлению и времени в интервале времени  $\pm 12$  часов не обнаружено, что позволило получить оценки чувствительности телескопа Baikal-GVD в композиции 5 кластеров к потоку нейтрино от источников Северного неба на уровне  $1.1\text{--}2.5 \text{ ГэВ}/\text{см}^2$  для спектра нейтрино  $E^{-2}$  в диапазоне энергий нейтрино от 1 ТэВ до 10 ПэВ.

7. Получены ограничения сверху на 90% доверительном уровне на поток нейтрино от источника гравитационной волны в событии GW170817A для двух кластеров

Baikal-GVD в двух режимах наблюдения: прямом ( $\pm 500\text{с}$ ) и после вспышки в течение 14 суток, для спектра нейтрино  $E^{-2}$  в интервале энергий от  $10^3$  ГэВ до  $10^8$  ГэВ.

**Актуальность избранной темы**, связанной с созданием в Северном полушарии детектора по изучению нейтринных потоков галактического и внегалактического происхождения, способного вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube и хорошим угловым разрешением восстановления мюонных траекторий, не вызывает сомнений

**Обоснованность** научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, базируется на материалах научных работ автора и результатах работы участников коллаборации Baikal-GVD. В обоснованности результатов работы сомнений не возникает. Обработка и анализ данных осуществляются в единой программной среде BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software). Все детали проведения калибровок и моделирования подробно изложены в тексте и снабжены иллюстративным материалом.

**Научная новизна** заключается в разработке автором новых алгоритмов и программ калибровки оптических модулей нейтринного телескопа Baikal-GVD в режиме подводного функционирования установки. Впервые создана база данных ливневых событий на Baikal-GVD и среди них выделены первые ливни с энергией выше 100 ТэВ. Кроме того, впервые проведен анализ данных Baikal-GVD в рамках международной программы мульти-мессенджер. Впервые на установке Baikal-GVD получено ограничение сверху на плотность потока нейтрино от галактики NGC4993, в пределах которой возникла гравитационная волна, в событии GW170817.

**Практическая ценность** диссертации состоит в возможности дальнейшего использования приведенного в диссертации экспериментального материала и базы данных ливневых событий на Baikal-GVD для всестороннего анализа.

**Достоверность и корректность** как методики калибровки, так и моделирования отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде, подтверждается результатами восстановления координат лазерного калибровочного источника.

**К недостаткам** работы можно отнести:

1. Для лучшего понимания полученных в диссертации результатов было бы полезным сопроводить главы выводами по главам.
2. Диссертационная работа содержит 70 рисунков и 2 таблицы. 37 рисунков относятся к

первым 3-м главам, тогда как оставшиеся 33 – к 4 главе, в которой содержится анализ экспериментального материала. К сожалению, не везде приведено подробное описание выводов, которые автор делает на основе приведенных рисунков.

3. Для оценки выполненной автором работы по моделированию было бы полезным указать статистику разыгранных событий и затраченное при этом машинное время.
4. К сожалению, в диссертационной работе и автореферате, в целом хорошо оформленным и написанным хорошим русским языком, встречаются досадные опечатки. Например, на стр.103 пропущено значение верхнего предела для временного окна  $\pm 14$  суток от времени регистрации гравитационной волны, которое равно  $9 \times (E/\text{ГэВ})^{-2} \text{ГэВ}^{-1} \text{см}^{-2}$  (как следует из автореферата на стр.25).
5. Затрудняет чтение диссертации и автореферата использование ссылок на собственные работы автора без указания DOI или возможной ссылки на сайт. Кроме того, полученные в диссертации результаты по анализу оповещений (алертов) от нейтринного телескопа IceCube представляются чрезвычайно интересными, и заслуживают публикации в высокорейтинговом журнале.

Указанные замечания не меняют общей высокой оценки работы.

Диссертация Шелепова Марка Дмитриевича на соискание ученой степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи получения и использования данных уникального детектора эксперимента Baikal-GVD для изучения нейтринных потоков галактического и внегалактического происхождения, а также поиска и идентификации их источников. Диссертация имеет существенное значение для соответствующей отрасли знаний, а именно астрофизики частиц высоких энергий.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года. Основные результаты диссертационной работы Шелепова М.Д. докладывались на международных конференциях и совещаниях, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI. Материалы диссертации со всей полнотой изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат отражает содержание диссертации.**

Диссертация Шелепова Марка Дмитриевича **«Выделение событий от ливней высоких энергий и восстановление параметров ливней в экспериментах на первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD»** представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет всем требованиям к кандидатским

диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Шелепов Марк Дмитриевич, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв составила заведующая лабораторией теоретических и экспериментальных исследований взаимодействий и переноса излучений в различных средах  
Отдела космических наук НИИЯФ МГУ, доктор физико-математических наук

\_\_\_\_\_ Роганова Татьяна Михайловна

\_\_1\_\_ декабря 2021 года

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Тел. +7(495)9393553

e-mail [rogatm@yandex.ru](mailto:rogatm@yandex.ru)

Подпись Рогановой Татьяны Михайловны удостоверяю

Ученый секретарь НИИЯФ МГУ кандидат физико-математических наук

\_\_\_\_\_ Сигаева Екатерина Александровна

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Тел. +7(495)9391818

[info@sinp.msu.ru](mailto:info@sinp.msu.ru)

Роганова Татьяна Михайловна - доктор физико-математических наук,  
доцент.

Специальность 01.04.23- Физика высоких энергий.

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. T.Roganova et al. / First observation of a tau neutrino charged current interaction with charm production in the OPERA experiment // *European Physical Journal C*. — 2020. — Vol. 80, no. 8. — P. 699.
2. T.Roganova et al. / Measurement of the muon flux from 400 GeV/c protons interacting in a thick molybdenum/tungsten target // *European Physical Journal C*. — 2020. — Vol. 80, no. 3. — P. 1–6.
3. T. Roganova et al. / Fast simulation of muons produced at the SHiP experiment using generative adversarial networks // *Journal of Instrumentation*. — 2019. — Vol. 14, no. 11. — P. P11028.
4. T. Roganova et al. / Final results on neutrino oscillation parameters from the OPERA experiment in the CNGS beam // *Physical Review D*. — 2019. — Vol. 100, no. 5. — P. 051301–1–051301–8.
5. T. Roganova et al. / Sensitivity of the SHiP experiment to heavy neutral leptons // *Journal of High Energy Physics*. — 2019. — Vol. 2019, no. 4. — P. 1–23.
6. T. Roganova et al. / Discovery potential for directional dark matter detection with nuclear emulsions // *European Physical Journal C*. — 2018. — Vol. 78, no. 7. — P. 578.
7. T. Roganova et al. / Final results of the OPERA experiment on  $\nu_\tau$  appearance in the CNGS neutrino beam // *Physical Review Letters*. — 2018. — Vol. 120, no. 211801. — P. 1–7.
8. T.Roganova et al. / Final results of the search for  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  oscillations with the OPERA detector in the CNGS beam // *Journal of High Energy Physics*. — 2018. — Vol. 2018, no. 6. — P. 1–12.
9. T. Roganova et al. / New method for estimating the energy of extensive air showers from signals of ground-based detectors of the Yakutsk extensive shower array // *JETP Letters*. — 2018. — Vol. 108, no. 2. — P. 142–146
10. T. Roganova et al. / T.Roganova et al. / Study of charged hadron multiplicities in charged-current neutrino–lead interactions in the OPERA detector // *European Physical Journal C*. — 2018. — Vol. 78, no. 62. — P. 1–8. [ DOI ]
11. T. Roganova et al. / Method of muonic radiography for fundamental and applied researches // *Physics Uspekhi*. — 2017. — Vol. 60, no. 12. — P. 1–18. [ DOI ]
12. T. Roganova et al. / New energy estimates of extensive air showers using signals detected at great distances from the shower axis // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2017. — Vol. 72, no. 2. — P. 187–190
13. T. Roganova et al. / New estimates of extensive-air-shower energies on the basis of signals in scintillation detectors // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2017. — Vol. 80, no. 2. — P. 260–265.
14. T.Roganova et al. / Search for sterile neutrinos in muon neutrino disappearance mode // *European Physical Journal C*. — 2017. — Vol. 77. — P. 1–19.
15. T. Roganova et al. / Determination of the muon charge sign with the dipolar spectrometers of the OPERA experiment // *Journal of Instrumentation*. — 2016. — Vol. 11. — P. P07022.