

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.119.01
НА БАЗЕ Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **23.12.2021 № 8/73**

О присуждении Шелепову Марку Дмитриевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «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 принята к защите 30 сентября 2021 года протокол № 5/70 диссертационным советом Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), 117312, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а., приказ Министерства образования и науки России № 75/нк от 15 февраля 2013 года.

Соискатель – Шелепов Марк Дмитриевич, 1993 года рождения. В 2016 году соискатель окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)». С 2016 по 2020 год соискатель обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук. В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника в лаборатории обработки больших данных в физике частиц и астрофизике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук, в лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий.

Научный руководитель – Суворова Ольга Васильевна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, лаборатория нейтринной астрофизики высоких энергий, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Роганова Татьяна Михайловна, доктор физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова, лаборатория теории электронно-фотонных ливней, заведующий лабораторией.

Рябов Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, дирекция, заместитель директора по научной работе
- дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ» (г. Москва), в своем положительном заключении, подписанном Яшиным Игорем Ивановичем, доктором физико-математических наук, профессором Офиса образовательных программ Института ядерной физики и технологий, и утвержденном директором Института ядерной физики и технологий Барбашиной Натальей Сергеевной, кандидатом физико-математических наук, доцентом, указала, что работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Шелепов Марк Дмитриевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Соискатель имеет 26 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 10 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях,

рекомендованных ВАК [1-10]. Представленные соискателем сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны. Текст опубликованных работ полностью соответствует тематике диссертации, они написаны либо при решающем участии соискателя, либо им самостоятельно. Список работ, по результатам диссертационного исследования:

1. A.D. Avrorin, ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // High-Energy Neutrino Follow-up at the Baikal-GVD Neutrino Telescope, Astron.Lett. 47, 2, 94-104 (2021).
2. A.D. Avrorin, ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // Search for cascade events with Baikal-GVD, PoS ICRC2019, 873, e-Print: 1908.05430, (2021).
3. A.D. Avrorin, ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. //Calibrating the Measuring Channels of the Baikal-Gvd Neutrino Telescope, Instrum.Exp.Tech. 63 4, 551-560, (2020).
4. A.D. Avrorin, ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // Baikal-GVD experiment, Phys.Atom.Nucl. 83, 6, 916-921, (2020).
5. A.D. Avrorin, ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // Recent progress of the Baikal-GVD project, PoS EPS-HEP2019 (2020) 050 (2020).
6. A.D. Avrorin, ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // Time calibration of the neutrino telescope Baikal-GVD, EPJ Web Conf. 207, 07003, (2019).
7. A.D. Avrorin , ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // Baikal-GVD: cascades, EPJ Web Conf. 207, 05001, 4pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920705001, (2019).
8. A.D. Avrorin , ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // Baikal-GVD: first results and prospects, EPJ Web Conf. 209, 01015. DOI: 10.1051/epjconf/201920901015, (2019).
9. A.D. Avrorin , ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // Search for High-energy Neutrinos from GW170817 with the Baikal-GVD Neutrino Telescope, JETP Lett. 108 no.12, 787-790; e-Print:1810.10966, (2018).
10. A.Allakhverdyan, ..., **M.D .Shelepov**, ... et al. // The Baikal-GVD neutrino telescope: search for high-energy cascades // PoS(2021)1144(2021). DOI:<https://doi.org/10.22323/1.395.1144>.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы оппонентов и ведущей организации, в которых отмечено, что работа представляет собой законченное

исследование, выполненное на высоком научном уровне, и полностью отвечает всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым Положением о порядке присуждения ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

Отмечены следующие критические замечания:

- Для формулы на стр. 74, которая оказалась не пронумерована, желательно указать более раннюю ссылку на первоисточник этой формулы.
- На стр. 76 на рисунках 4.11 и 4.12 приведены спектры электронных и тау-нейтрино до энергии 20 ПэВ без пояснения этого ограничения. В этом же разделе требуется также пояснить отсутствие на данных рисунках аналогичных спектров для мюонных нейтрино.
- На стр.80 требуется пояснить почему для астрофизических нейтрино в спектре выбрана степень -2.46 , хотя в статьях коллаборации IceCube проводится диапазон показателей спектра.
- На стр. 82 на рисунке 4.17 показаны 72 события, хотя в тексте речь идет о 10 событиях, и их распределение по энергии нигде не представлено.
- На стр.89 из рисунка 4.23 не понятно в каком энергетическом интервале лежат выделенные события. Более уместно было бы использовать стандартную гистограмму вместо интегральной.
- На стр. 84 в абзаце с описанием рисунка 4.19. недостаточно четко определена процедура розыгрыша мюонов с весом. Из рисунка не следует, что распределения модели и данных согласуются.
- В выводе 7 раздела Заключение не представлено полученное значение ограничения на поток от события гравитационной волны GW170817A, которое есть в самом тексте раздела 4.6. Кроме того, требуется пояснить соответствие этого значения предела в тексте и на графике рисунка 4.34.
- Вызывает вопрос правомерности аппроксимации несимметричного распределения зарядов однофотоэлектронного спектра сигналов оптического модуля распределением Гаусса. Это было бы оправдано, если нужно определить пиковое (наиболее вероятное) значение заряда по спектру. Но в диссертации указывается, что по полученному распределению Гаусса определяется среднее значение заряда одного

фотоэлектрона, которое для несимметричных распределений не совпадает с наиболее вероятным значением.

- Встречаются повторы и небольшое количество орфографических ошибок, а также некорректные утверждения, например, на стр. 4: «Особенность таких детекторов в том, что по черенковскому излучению можно восстановить энергию нейтрино и направление его движения, что делает возможным поиск космических источников нейтрино». Понятно, что имеет в виду автор, но сформулировано не корректно.
- Часто различные разделы или их части имеют шрифт с различными межстрочными интервалами.
- Большинство рисунков имеют англоязычные подписи и пояснения, что снижает общее впечатление от диссертации.
- Для лучшего понимания полученных в диссертации результатов было бы полезным сопроводить главы выводами по главам.
- 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.
- Для оценки выполненной автором работы по моделированию было бы полезным указать статистику разыгранных событий и затраченное при этом машинное время.
- 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 ± 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).
- Затрудняет чтение диссертации и автореферата использование ссылок на собственные работы автора без указания DOI или возможной ссылки на сайт.

- Полученные в диссертации результаты по анализу оповещений (алертов) от нейтринного телескопа IceCube представляются чрезвычайно интересными, и заслуживают публикации в высокорейтинговом журнале. Данные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой квалификацией ученых по сходной тематике.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Разработан новый алгоритм и программное обеспечение для автоматической калибровки оптических модулей на всех кластерах телескопа Baikal-GVD с точностью ~ 2 нс в режиме его подводного функционирования.
- Осуществлена проверка точности калибровки и эффективности восстановления параметров ливней высоких энергий по данным кластера Baikal-GVD путем восстановления координат глубоководного лазерного источника. Показано, что точность восстановления координат ливня до 3 метров, медианное значение в определении направления 3.5 градуса и погрешность восстановления энергии ливня 30% .
- Проведен анализ моделированного отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде и показана область направлений и расстояний от вершины взаимодействия нисходящих и восходящих ливней с эффективностью их регистрации не менее 90% кластером Baikal-GVD.
- Впервые по данным Baikal-GVD выделены нейтринные события с энергией выше 60 ТэВ и выше 100 ТэВ, как кандидаты на события астрофизического происхождения.
- Впервые по данным Baikal-GVD в квази-онлайн режиме обработки данных проведен анализ оповещений (алертов) от нейтринного телескопа IceCube. В отсутствии корреляций каскадов с алертами по направлению и времени в интервале времени ± 12 часов получены оценки чувствительности телескопа Baikal-GVD в композиции 7 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.

- Получены ограничения сверху на 90% доверительном уровне на поток нейтрино $5.2 \times (E/\text{ГэВ})^{-2} \text{ ГэВ}^{-1}\text{см}^{-2}$ и $9 \times (E/\text{ГэВ})^{-2} \text{ ГэВ}^{-1}\text{см}^{-2}$ от источника гравитационной волны в известном мульти-волновом событии GW170817A в двух режимах наблюдения двух кластеров Baikal-GVD сезона 2017 года, соответственно, в интервале ± 500 секунд и в течение 14 суток после вспышки, для спектра нейтрино E^{-2} в интервале энергий от 10^3 ГэВ до 10^8 ГэВ .

Оценка достоверности результатов выявила:

- Обоснованность методики калибровки измерительных каналов установки, эффективности алгоритма восстановления параметров ливней высоких энергий путем восстановления координат и энергии по лазерному калибровочному источнику.
- Соответствие реальных физических данных, полученных за время работы телескопа Baikal-GVD в 2019-2020 году, результатам, полученным при осуществлении моделирования атмосферных мюонов и нейтрино в данном эксперименте детектирования нейтрино высоких энергий.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработана и внедрена методика калибровки оптического модуля в режиме подводного функционирования установки с точностью ~ 2 нс; создана база данных нейтринных событий с энергией выше 60 ТэВ и выше 100 ТэВ; получены пределы на поток нейтрино от источников Северного неба в период отслеживания оповещений от телескопа IceCube телескопом Baikal-GVD в 2020 году; получены ограничения сверху на 90% доверительном уровне на поток нейтрино от источника гравитационной волны в событии GW170817A для двух кластеров Baikal-GVD. Разработанные диссертантом методики и полученные результаты могут найти дальнейшее применение в исследованиях, выполняемых в ИЯИ РАН, ФИАН, МИФИ, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, ИКИ РАН и других научных центрах.

Личный вклад соискателя состоит в его участии 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 известном гравитационном событии GW170817A в направлении галактики NGC4993. Автор участвовал в экспериментах на озере Байкал с 2013 года. В период зимних экспедиций на оз. Байкал отвечал за монтаж глубоководных корпусов регистрирующей системы телескопа и высокое качество проводимых тестов, связанных с обеспечением стабильности работы аппаратуры нейтринного телескопа с момента запуска и набора данных. Разработал и включил в процесс автоматической обработки программные алгоритмы измерения амплитудных и временных калибровочных коэффициентов, исследовал и учел амплитудный эффект в коррекции погрешности временной калибровки, что обеспечило точность реконструкции направления треков менее градуса и ливней до 3.5 градусов. В конечном итоге, реализованный соискателем быстрый анализ калибровочных данных позволил участвовать в мульти-сигнальном анализе нейтринных алертов с энергиями нейтрино десятки и сотни ТэВ.

На заседании 23 декабря 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Шелепову Марку Дмитриевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **21** человека (в т.ч. **9** - в удаленном интерактивном режиме), из них **8** докторов наук по специальности 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц, участвовавших в заседании, из **27** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **-0** человек, проголосовали: за – **21**, против – **0**.

Председатель заседания,
заместитель председателя
диссертационного совета Д 002.119.01
доктор физ.-мат. наук

_____ Безруков Л.Б.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.119.01
кандидат физ.-мат. наук

_____ Демидов С.В.

23.12. 2021 г.

м.п.