

## ОТЗЫВ

**официального оппонента, доктора физико-математических наук Дворникова Максима Сергеевича на диссертацию Суворовой Ольги Васильевны «Исследование потоков нейтрино астрофизической природы в экспериментах первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15 – физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.**

Диссертация Суворовой О.В. посвящена решению актуальной задачи современной физики и астрофизики высоких энергий - исследованию потоков нейтрино в области энергий ТэВ-ПэВ, регистрируемых по ливням заряженных частиц от взаимодействия нейтрино в воде озера Байкал на строящемся глубоководном нейтринном телескопе Baikal-GVD с уровнем чувствительности соизмеримым с детектором IceCube, размером кубокилометр. Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Актуальность работы определяется двумя исследуемыми фундаментальными проблемами физики высоких энергий: идентификация природных пэватронов как источников нейтрино астрофизического происхождения и поиск сигнала от процессов с частицами темной материи, ВИМП. До сих пор нет достоверного знания об источниках нейтрино высоких энергий и доминирующих процессов их генерации, несмотря на десятилетний период детектирования нейтрино высоких энергий подледным телескопом IceCube на Южном полюсе. Новизна диссертационной работы в том, что все результаты диссертации впервые получены на самом крупном нейтринном телескопе Северного полушария, Baikal-GVD и что выделены первые кандидаты на нейтрино астрофизического происхождения, измерен диффузный поток нейтрино по всему небу, подтверждено присутствие астрофизической компоненты на уровне трех сигма для событий из нижней полусферы. В модели равновесного потока трех ароматов нейтрино с одностепенным спектром определены спектральный индекс и нормировочный коэффициент. Впервые получены указания на потенциальные астрофизические источники нейтрино и ограничения на потоки нейтрино в мульти-волновых астрометрических исследованиях, включая гравитационно-волновые события. В детектировании нейтрино с низким порогом по энергии (10 ГэВ) по данным Байкальского телескопа NT200 сделан анализ поиска сигнала от процессов с ВИМП-частицами темной материи в их потенциально значимых скоплениях в Солнце, в центре Галактики, в 22-х темных сфероидальных карликовых галактиках и в галактике Большое Магелланово Облако. Получены ограничения на 90% доверительном уровне на сечения рассеяния ВИМП на нуклоне и на сечения само-аннигиляции ВИМП в каналах генерации нейтрино с мягкими и жесткими спектрами, включая пары нейтрино и антинейтрино.

Диссертация Суворовой О.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений и списка литературы, а также списка рисунков и таблиц, всего объемом 278 страниц.

Во введении содержится обоснование актуальности работы, цели и методы исследования, результаты, представляемые к защите, описание их апробации и практической значимости.

В первой главе диссертации обсуждаются современные представления о компонентах и источниках потоков нейтрино в области энергий ТэВ-ПэВ на основе имеющихся

экспериментальных данных. Приведены подходы в решении транспорта нейтрино в веществе, с учетом процессов их поглощения и регенерации. Процессы осцилляции нейтрино учтены в задаче прохождения нейтрино с энергией десятка ТэВ в случае их генерации в центре Солнца от аннигиляции ВИМП-частиц темной материи. Определены эффективные площади регистрации нейтрино трех ароматов в реконструкции каскадных событий на телескопе Baikal-GVD от взаимодействия нейтрино в байкальской воде.

Вторая глава диссертации состоит из шести разделов, посвященных анализу данных телескопа Baikal-GVD, зарегистрированных за время его развертывания в сезоны 2018-2021 гг., где последовательно изложено описание структуры телескопа и методы калибровки его измерительных каналов, методики выделения ливней от взаимодействия нейтрино высоких энергий в воде. и процедуры восстановления координат, направления и энергии ливней. Сделана оценка точности характеристик восстановления параметров каскадных событий. Подробно описана процедура подавления фоновых событий от атмосферных мюонов и обоснован выбор критериев отбора каскадных событий. Из представленных оценок ожидаемого числа событий атмосферного происхождения и числа астрофизических нейтрино в потоке со спектром  $E^{-2.46}$ , в соответствии с результатами IceCube, следует, что в экспериментально выделенных 25 событиях по всему небу с энергиями выше 60 ТэВ не менее половины нейтринных событий имеют астрофизическое происхождение. С набором выделенных 11 каскадных событий из нижней полусферы с энергиями выше 15 ТэВ сделан вывод о существовании диффузного потока нейтрино астрофизической природы на уровне достоверности 99.76%. Численным методом подгонки распределений событий по энергии в числе ожидаемых фоновых и астрофизических событий относительно измеренного числа, вычислены параметры диффузного потока в модели равновесного по ароматам нейтрино и с одностепенным спектром. Вычисленное значение спектрального индекса с учетом систематических ошибок составляет  $-2.58_{-0.33}^{+0.27}$ , что согласуется с данными IceCube в пределах одной сигма.

В поиске ассоциации выделенных астрофизических кандидатов с астрофизическими источниками показаны особенности событий в направлениях на радио блазар TXS 0506+056, положение которого попадает в область 90% вероятности сигнала от положения нейтрино с энергией выше 200 ТэВ, и на микроквazar LSI +061 303, вблизи которого зарегистрированы три события с энергией выше 100 ТэВ. Эти источники также хорошо известны по анализу данных телескопа IceCube. Полученные для выделенных событий значимости совпадений по направлению с источником не превышают трех сигма, при этом параметр “сигнальности” событий выше 97%.

В третьей главе диссертации представлен анализ данных на основе быстрой обработки в реализации автоматического выделения нейтрино высоких энергий и формирования оповещения (алерта) во вне и в слежении за внешними нейтринными алертами и астрономическими оповещениями о вспышке. Представлен анализ при обнаружении корреляции каскадного события на Baikal-GVD с энергией 43 ТэВ с алертом IceCube с энергией выше 100 ТэВ и вспышкой радио блазара PKS0735+178 в декабре 2021 года. Получены ограничения на потоки энергии нейтрино в направлении отслеживания оповещений от других установок в системе мультимессенжер, в частности, в мульти-волновом событии GW170817A от гравитационной волны в направлении источника NGC 4993, в событиях класса “астротрек” нейтринного

телескопа IceCube и мюонных нейтрино от глубоководного телескопа ANTARES. Наибольший интерес анализ алерта в период вспышки блазара PKS0735.

В четвертой главе диссертации исследуются потенциальные источники нейтринного сигнала от процессов аннигиляции частиц темной материи ВИМП с набором экспериментальных данных Байкальского телескопа NT200 с порогом регистрации 10 ГэВ в период его функционирования с 1999 по 2003 гг. Ограничения на сечения процессов упругого рассеяния ВИМП в Солнце и ограничения на сечения само-аннигиляции ВИМП в нашей Галактике и в рассмотренных двадцати двух темных карликовых галактиках и Большое Магелланово Облако получены на уровне достоверности 90% численными методами оптимизации угла поиска сигнала относительно уровня фона от атмосферных нейтрино. Результаты включены в обзоры Particle Data Group.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы из 11 положений.

Достоверность результатов показана тестированием методов моделирования восстановления параметров ливней высоких энергий по искусственным источникам черенковского света от глубоководных лазерных станций и от светодиодных матрица, встроенных в оптические модули, и подтверждением точности калибровки и моделирования отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде. Моделирование прохождения нейтрино в веществе и расчеты по аннигиляции ВИМП сравнивались с аналогичными расчетами других авторов. О корреляции со вспышкой радио блазара PKS0735+178 зарегистрированного нейтрино с энергией порядка 43 ТэВ было сделано оповещение по каналу астрономических сообщений The Astronomer's telegram в рамках многоканальной астрономии. Положения, выносимые на защиту, и выводы, приведенные в диссертации, обладают высокой степенью обоснованности. По материалам диссертации опубликовано 25 работ, 17 из которых – в журналах рекомендованных ВАК и индексируемых в базах Web of Science и Scopus, 8 – в тезисах конференций.

Практическая значимость заключается в том, что основные выводы диссертации, результаты и методы работы применимы к увеличивающемуся объему телескопа Baikal-GVD и могут найти дальнейшее применение в исследованиях, выполняемых в ИЯИ РАН, ФИАН, МИФИ, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, ИКИ РАН и других научных центрах.

Сильной стороной диссертации является последовательное и подробное представление всех этапов анализа данных Байкальского телескопа Baikal-GVD, включая процедуры калибровки измерительных каналов и оценки качества восстановления ливней с энергией выше десятков и сотен ТэВ. В диссертационной работе впервые приведены характеристики выделенных 25 высокоэнергичных событий, как первых кандидатов на нейтрино астрофизического происхождения и приводится подтверждение на уровне значимости три сигма результата телескопа IceCube о существовании астрофизической компоненты в диффузном потоке нейтрино. В целом, запуск Байкальского телескопа Baikal-GVD и полученные на нем первые физические результаты, представленные в диссертации Суворовой О.В., открывают новый горизонт возможностей нейтринной астрофизики высоких энергий.

Диссертационная работа не лишена **недостатков**, к которым можно отнести следующее:

1. Есть общее замечание по главе 3, в которой подробно описан процесс регистрации нейтрино от блазаров и сливающихся нейтронных звезд. Несомненно, как член коллаборации Baikal-GVD, диссертант определенным образом участвовала в данных исследованиях. Однако конкретный вклад соискателя в полученные результаты описан в диссертации недостаточно четко. Это является **недостатком** работы.
2. Ряд формул в диссертации записаны неверно. Например, на стр. 37 спектр космических лучей, ускоренных за счет механизма Ферми, приведен в виде  $E^{-\gamma}$ . При этом ниже написано, что показатель  $\gamma = -2$ . Видимо, предполагалось, что  $\gamma = +2$ . На странице 47, «*sin*» написан курсивом вместо прямого шрифта. Затем, на странице 65, в формуле для определения косинуса «черенковского» угла не закрыта скобка. Эти небольшие неточности представляют собой **недостатки** работы.
3. Имеется замечание по терминологии. На стр. 13 «Multi-messenger» следует переводить как многоканальный, а не «мультиволновой». Данный факт является **недостатком** диссертации.
4. Также необходимо отметить некоторую небрежность в оформлении диссертации, в тексте которой присутствуют многочисленные опечатки. Например, «бльшим» и «энергиями» на стр. 10, «нейтринного» на стр. 144 и т.п. Это относится к **недостаткам** работы.

Приведенные замечания не умаляют значимости представленной работы и не влияют на полученные результаты и общую высокую оценку диссертационной работы. Диссертация Суворовой О.В. представляет собой законченный научный труд.

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 Суворовой О.В. 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.

Представленная диссертация «Исследование потоков нейтрино астрофизической природы в экспериментах первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD» отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Суворова О.В. безусловно заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.15 – физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Отзыв составил заведующий теоретическим отделом ИЗМИРАН, доктор физико-математических наук Максим Сергеевич Дворников

Дата: 28.10 2024 года

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник,  
заведующий теоретическим отделом  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

\_\_\_\_\_ М.С. Дворников

[maxim.dvornikov@gmail.com](mailto:maxim.dvornikov@gmail.com), 8 (495) 851-09-12

108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4 , ИЗМИРАН

Подпись М.С.Дворникова удостоверяю

Ученый секретарь ИЗМИРАН  
кандидат физ.-мат. наук

Рез А.И.

\_\_\_\_\_

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

1. Дворников М.С. Neutrino spin oscillations in a magnetized Polish doughnut // JCAP, 2023. – № 09. – 039.
2. Дворников М.С. Neutrino Spin and Flavor Oscillations in Gravitational Fields // Phys.Part.Nucl.Lett., 2023. – № 77. – 439-441.
3. Дворников М.С. Neutrino Oscillations in Gravitational Fields and Astrophysical Applications // Moscow Univ.Phys.Bull., 2023. – № 20. – 461-465.
4. Дворников М.С. Gravitational scattering of spinning neutrinos by a rotating black hole with a slim magnetized accretion disk // Class.Quant.Grav., 2023. – № 40. – 015002.
5. Дворников М.С. Interaction of supernova neutrinos with stochastic gravitational waves // Phys.Rev.D, 2021. – № 104. – 043018.
6. Дворников М.С. Impact of hypermagnetic fields on relic gravitational waves, neutrino oscillations and baryon asymmetry // Int.J.Mod.Phys.D, 2023. – № 32. – 2250141.
7. Дворников М.С. Neutrino scattering off a black hole surrounded by a magnetized accretion disk // JCAP, 2021. – № 04. – 005.
8. Дворников М.С. Flavor ratios of astrophysical neutrinos interacting with stochastic gravitational waves having arbitrary spectra // JCAP, 2020. – № 12. – 022.
9. Дворников М.С. Spin oscillations of neutrinos scattered off a rotating black hole // Eur.Phys.J.C, 2020. – № 80. – 474.
10. Дворников М.С. Spin effects in neutrino gravitational scattering // Eur.Phys.J.C, 2020. – № 5. – 056018.