

# О Т З Ы В

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

Диссертация Шелепова М.Д. посвящена исследованию ливней заряженных частиц от взаимодействия нейтрино высоких энергий в воде озера Байкал с помощью данных, полученных на строящемся глубоководном нейтринном телескопе Baikal-GVD масштаба кубического километра. Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Актуальность работы определяется задачей идентификации нейтрино астрофизического происхождения и тем обстоятельством, что 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, размером кубокилометр. Новизна диссертационной работы заключается в том, что все результаты диссертации впервые получены на самом крупном нейтринном телескопе Северного полушария, Baikal-GVD, где выделены первые кандидаты на нейтрино астрофизического происхождения и получены ограничения на потоки нейтрино в мульти-волновых астрофизических исследованиях.

Диссертация Шелепова М.Д. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, а также списка рисунков и таблиц, всего объемом 123 страницы. Введение содержит обоснование актуальности работы, цели и методы исследования, результаты, представляемые к защите, описание их апробации и практической значимости.

В первой главе диссертации представлено подробное описание базовых структурных элементов и регистрирующих систем Байкальского глубоководного телескопа Baikal-GVD.

Во второй главе диссертации представлены разработанные методы временной и амплитудной калибровки измерительных каналов телескопа Baikal-GVD в автоматизированном режиме. Подробно обсуждаются результаты калибровки и вопросы точности и эффективности разработанных процедур в калибровки.

В третьей главе диссертации подробно описывается процедура восстановления координат, направления и энергии ливней (каскадов), регистрируемых глубоководным телескопом Baikal-GVD. Показаны характеристики отклика оптического модуля телескопа при моделировании светового потока от ливней в байкальской воде и методы вычисления параметров ливня. Сделана оценка точности характеристик восстановления каскадных событий.

В четвертой главе диссертации представлен анализ набора экспериментальных данных телескопа Baikal-GVD за период его работы в 2019 и 2020 году. Подробно описана процедура подавления фоновых событий от атмосферных мюонов и обоснован выбор критериев отбора каскадных событий. Показан новый подход в селекции ливней с энергией около 100 ТэВ и выше. Представлены результаты по ограничению нейтринных потоков 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 и в событиях класса “астротрек” нейтринного телескопа IceCube.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы из 7 положений.

Достоверность результатов показана проверкой методики калибровки измерительных каналов установки и эффективности алгоритма восстановления параметров ливней высоких энергий путем восстановления координат и энергии по лазерному калибровочному источнику, а также подтверждением точности калибровки и моделирования отклика оптического модуля Baikal-GVD на черенковское излучение от прохождения электромагнитного каскада в байкальской воде. Положения, выносимые на защиту, и выводы, приведенные в диссертации, обладают высокой степенью обоснованности. По материалам диссертации опубликовано 9 работ, 3 из которых – в журналах рекомендованных ВАК и индексируемых в базах Web of Science и Scopus, 7 – в тезисах конференций.

Практическая значимость заключается в том, что основные выводы диссертации, результаты и методы работы 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 нейтринного телескопа Baikal-GVD, включая разработанные новые методы и процедуры калибровки измерительных каналов и оценки качества восстановления ливней с энергий выше десятков и сотен ТэВ. В диссертационной работе впервые приведены характеристики выделенных 10 высокоэнергичных событий, как первых кандидатов на нейтрино астрофизического происхождения. В целом, запуск нейтринного телескопа Baikal-GVD и полученные на нем первые физические результаты, представленные в диссертации Шелепова М.Д., открывают новый горизонт возможностей нейтринной астрофизики высоких энергий.

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

1. Для формулы на стр. 74, которая оказалась не пронумерована, желательно указать более раннюю ссылку на первоисточник этой формулы.
2. 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.
3. На стр.80 требуется пояснить почему для астрофизических нейтрино в спектре выбрана степень  $-2.46$ , хотя в статьях коллаборации IceCube проводится диапазон показателей спектра.
4. 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.
5. 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.

6. 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.

7. 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.

Приведенные замечания не умаляют значимости представленной работы и не влияют на полученные результаты и общую высокую оценку диссертационной работы. Диссертация Шелепова М.Д. 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 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.

Представленная диссертация «Выделение событий от ливней высоких энергий и восстановление параметров ливней в экспериментах на первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD» отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шелепов Марк Дмитриевич, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

**Отзыв составил заместитель директора по научной работе ФИАН, заведующий Отделом космических излучений ФИАН, доктор физико-математических наук  
Владимир Алексеевич Рябов**

\_\_\_\_\_  
**Рябов Владимир Алексеевич**  
« 03 » декабря 2021года

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53  
Тел.: +7(499) 132-61-42; e-mail [ryabov@lebedev.ru](mailto:ryabov@lebedev.ru)

**Подпись Рябова Владимира Алексеевича удостоверяю,  
Ученый секретарь ФИАН кандидат физико-математических наук**

\_\_\_\_\_  
**Колобов Андрей Владимирович**  
« 03 » декабря 2021года

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53  
Тел.: +7(499) 132-69-78; e-mail: [kolobov@lebedev.ru](mailto:kolobov@lebedev.ru)

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

1. Adamson P., Aliaga L., Ambrose D., **Ryabov V.** et al. // *Measurement of the neutrino mixing angle  $\theta_{23}$  in NOvA* // Physical Review Letters, 2017, Vol. 118, p. 151802; DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.151802;
2. Adamson P., Aliaga L., Ambrose D., **Ryabov V.** et al. // *Constraints on Oscillation Parameters from  $\nu_e$  Appearance and  $\nu_\mu$  Disappearance in NOvA* // Physical Review Letters, 2017, Vol. 118, p. 231801; DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.231801;
3. Adamson P., Aliaga L., Ambrose D., **Ryabov V.** et al. // *Search for active-sterile neutrino mixing using neutral-current interactions in NOvA* // Physical Review D, 2017, Vol. 96, 072006; DOI: 10.1103/PhysRevD.96.072006;
4. Рябов В.А., Чечин В.А. // *Излучение каскада вблизи плоской границы раздела и в плоском слое* // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2018, том 153, вып.1, стр. 45 – 53; DOI: 10.7868/S0044451018010042;
5. Gurevich A.V., Garipov G.K., Almenova A.M., **Ryabov V.** et al. // *Simultaneous observation of lightning emission in different wave ranges of electromagnetic spectrum in Tien Shan mountains* // Atmospheric Research, 2018, Vol. 211, pp. 73 – 84; <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.018>;
6. Acero M. A., Adamson P., Aliaga L., ..., **Ryabov V.** et al. // *New constraints on oscillation parameters from  $\nu_e$  appearance and  $\nu_\mu$  disappearance in the NOvA experiment* // Physical Review D, 2018, Vol. 98, 032012; DOI: 10.1103/PhysRevD.98.032012;
7. Acero M. A., Adamson P., Aliaga L., **Ryabov V.**, et al. // *Observation of seasonal variation of atmospheric multiple-muon events in the NOvA Near Detector* // Physical Review D, 2019, Vol. 99, 122004; DOI: 10.1103/PhysRevD.99.122004;
8. Beisembaev R.U., Beisembaeva E.A., Vildanova M.I., **Ryabov V.A.**, et al. // *Unusual time structure of extensive air showers at energies exceeding  $10^{17}$  eV* // Physics of atomic nuclei, 2019, Vol. 82, #4, PP. 330 – 333; DOI: 10.1134/S1063778819040057;
9. Acero M. A., Adamson P., Aliaga L., **Ryabov V.**, et al. // *First measurement of neutrino oscillation parameters using neutrinos and antineutrinos by NOvA* // Physical Review Letters, 2019, Vol. 123, p. 151803; DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.151803;
10. Shepetov A., Chubenko A., Iskhakov B., **Ryabov V.**, et al. // *Measurements of the low-energy neutron and gamma ray accompaniment of extensive air showers in the knee region of primary cosmic ray spectrum* // Eur. Phys. J. Plus, 2020, 135: 96; <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-019-00092-1>;
11. Acero M.A., Adamson P., Adam G, **Ryabov V.**, et al. // *Supernova neutrino detection in NOvA* // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP), 2020, 10, 014; DOI: [10.1088/1475-7516/2020/10/014](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/10/014);
12. Iskhakov B.A., Argynova A.Kh., Beisenova A.D., **Ryabov V.A.**, et al. // *“HADRON-55” complex setup for study of hadron interactions within the central part of cosmic ray extensive air showers (EAS) cores* // Journal of Instrumentation (JINST), 2020, Vol. 15, C12002; <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/12/C12002>;
13. Shepetov A., Antonova V., Kalikulov O, **Ryabov V.**, et al. // *The prolonged gamma ray enhancement and the short radiation burst events observed in thunderstorms at Tien Shan* // Atmospheric Research, 2021, Vol. 248, 105266; <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105266>;
14. Acero M.A., Adamson P., Adam G, **Ryabov V.**, et al. // *Seasonal variation of multiple-muon cosmic ray air showers observed in the NOvA detector on the surface* // Physical Review D, 2021, Vol. 104, 012014; DOI: 10.1103/PhysRevD.104.012014;
15. Shepetov A.L., Shaulov S.B., Likiy O.I., **Ryabov V.A.**, et al. // *The rise of muon content in extensive air showers after the 3 PeV knee of the primary cosmic ray spectrum according to data of the Tien Shan mountain installation* // Astroparticle Physics, 2021, Vol. 133, 102642; <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2021.102642>.