

**«УТВЕРЖДАЮ»**

И. о. ректора НИЯУ МИФИ

В.И. Шевченко

---

«\_07\_» декабря 2021 года

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 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 посвящена решению проблемы выделения ливней заряженных частиц от взаимодействия нейтрино высоких энергий в воде озера Байкал на нейтринном телескопе Baikal-GVD. Работа логически разбита на три больших части.

Первая часть посвящена развитию методов калибровки измерительных каналов телескопа в режиме подводного функционирования. Описываются аппаратные средства и методы временной и амплитудной калибровки. Методика и результаты моделирования отклика регистрирующей системы нейтринного телескопа Baikal-GVD на черенковское излучение каскадных ливней в байкальской воде и разработка технологии выделения ливневых нейтринных событий и реконструкции их параметров на основе результатов моделирования подробно описываются во второй части. Важной частью диссертации является описание разработанной на основе проведенных модельных экспериментов технологии обработки данных нейтринного

телескопа за 2019-2020 гг. Приводятся результаты анализа данных и поиск событий по данным алертов других космофизических установок в рамках программы *multi-messenger* астрофизических исследований.

### **Актуальность работы**

Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнения, так как она направлена на решение важной научной проблемы изучения астрофизических нейтрино, которые, наряду с гамма-астрономией, являются критически важным источником информации о процессах, протекающих в активных объектах во Вселенной при высоких и сверхвысоких энергиях. Это даст возможность понять природу происхождения космических лучей высоких энергий и других фундаментальных физических явлений.

Не менее актуальной проблемой является создание в северном полушарии нейтринного телескопа, сопоставимого по масштабам и экспериментальным возможностям с IceCube. Включение обоих действующих детекторов, а при создании KM3NeT и третьего, в единую сеть детекторов в рамках *multi-messenger* астрофизики, значительно повысит достоверность исследования потоков астрофизических нейтрино.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что автор впервые применил разработанные подходы к калибровке такого сложного экспериментального комплекса, как нейтринный телескоп Baikal-GVD, в условиях непрерывного подводного функционирования. С помощью развитого автором на основе моделирования подхода к выделению каскадных ливней от нейтрино им впервые были отобраны 10 кандидатов на нейтрино астрофизического происхождения с энергией выше 100 ТэВ. Также впервые был проведен анализ отклика нейтринного телескопа на алерты от установки IceCube и получено верхнее ограничение на поток нейтрино от источника гравитационных волн события GW170817.

## **Практическая значимость и рекомендации к использованию**

Разработанные и реализованные в действующем нейтринном телескопе процедуры калибровки временных и амплитудных характеристик оптических модулей дали возможность проводить оперативный анализ работоспособности установки и физического анализа данных в течение длительных экспериментальных сеансов. Разработанная технология выделения каскадных нейтринных событий дает возможность в режиме реального времени осуществлять первичный анализ данных. Результаты могут быть использованы для поиска астрофизических нейтринных событий и анализа событий Baikal-GVD по алертам других установок.

## **Достоверность полученных результатов**

Достоверность представленных в диссертации методов выделения каскадов, генерированных нейтрино высоких энергий, определяется качеством регулярной трёхуровневой системы калибровки временных и амплитудных характеристик оптических модулей в режиме подводного функционирования. Алгоритмы и эффективность программ восстановления и программ моделирования проверялись путем восстановления координат лазерных калибровочных источников. Для отработки методики выделения нейтринных ливневых событий использовались программы моделирования, ранее проверенные в рамках эксперимента NT-200.

## **Апробация результатов**

Результаты диссертации докладывались на трех международных школах в 2018-2019 гг., на Международной конференции VLVT-2018 (Россия, Дубна, 2-4 октября 2018, 36-й Международной конференции по космическим лучам ICRC-2019 (USA, Madison, 24 July – 1 August 2019), а также на рабочих совещаниях Международной коллаборации Baikal-GVD.

## **Замечания по работе**

В целом диссертация написана ясно и адекватно освещает цели, методы и результаты проделанной работы. В качестве недостатков, не

снижающих значимости полученных результатов, можно отметить следующее:

1. 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.
2. 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.
3. Часто различные разделы или их части имеют шрифт с различными межстрочными интервалами.
4. Большинство рисунков имеют англоязычные подписи и пояснения, что снижает общее впечатление от диссертации.

## **Заключение**

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Диссертационная работа Шелепова М.Д. является законченной научно-квалификационной работой и соответствует специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц. Она вносит существенный вклад в развитие новых методов калибровки нейтринного телескопа Baikal-GVD, а также выделения и восстановления параметров ливневых событий от нейтрино высоких энергий.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, неоднократно докладывались автором на международных конференциях и рабочих совещаниях коллаборации Baikal-GVD. Содержание диссертации полно и точно отражено в автореферате.

Диссертация Шелепова Марка Дмитриевича «Выделение событий от ливней высоких энергий и восстановление параметров ливней в экспериментах на первой очереди нейтринного телескопа Baikal-GVD» отвечает требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц – за решение проблемы выделения ливней заряженных частиц от взаимодействия нейтрино высоких энергий в воде озера Байкал на нейтринном телескопе Baikal-GVD.

Диссертация Шелепова М. Д. заслушана на научном семинаре Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ 24 ноября 2020 года, на котором был одобрен отзыв ведущей организации.

Директор ИЯФиТ,  
к.ф.-м.н., доцент

Н.С. Барбашина

Отзыв составил:

д.ф.-м.н., профессор Офиса  
ОП(М) ИЯФиТ,  
Тел.: +7(916) 354-16-46  
e-mail: [iyashin@mephi.ru](mailto:iyashin@mephi.ru)

И.И. Яшин

## Сведения о ведущей организации

<p>Полное и сокращенное наименование организации</p>	<p>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» НИЯУ МИФИ</p>
<p>Место нахождения (город, область)</p>	<p>Г. Москва</p>
<p>Почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, адрес официального сайта организации в сети Internet (при наличии)</p>	<p>115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел.: +7 495 788-5699, e-mail: info@mephi.ru, сайт в сети Internet: <a href="https://mephi.ru/">https://mephi.ru/</a></p>
<p>Список основных публикаций работников Структурного подразделения, составляющих отзыв, за последние 5 лет по теме диссертации</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bogdanov, A. G., Barbashina, N. S., Dushkin, L., et al. Investigation of the energy characteristics of EAS muon component with the NEVOD-DECOR setup. 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 675 032035.</li> <li>2. Khomyakov, V.A., Bogdanov, A.G., Kindin, V.V. et al. Spatial distribution of Cherenkov light from cascade showers in water. Phys. Atom. Nuclei 79, 1546–1551 (2016).</li> <li>3. Petrukhin A.A., Yashin I.I. Cherenkov Water Detectors in Particle Physics and Cosmic Rays // Physics of Atomic Nuclei, 2017 Vol. 80, No. 10, pp. 1557-1566.</li> <li>4. V. A. Khomyakov, A. G. Bogdanov, V. V. Kindin, et al. Investigating Cherenkov radiation from electromagnetic cascades in a water calorimeter // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017 Vol. 81, No. 4, Q4 pp. 490-492.</li> <li>5. A.G. Bogdanov, R.P. Kokoulin, G. Mannocchi et al. Investigation of very high energy cosmic rays by means of inclined muon bundles. Astroparticle Physics 98 (2018) 13–20.</li> <li>6. V. V. Kindin, M. B. Amelchakov, N. S. Barbashina et al. A Cherenkov Water Calorimeter Based on Quasi-Spherical Modules. Instruments and Experimental Techniques, 2018, Vol. 61, No. 5, pp. 649–657.</li> <li>7. M. B. Amelchakov, A. G. Bogdanov, E. A. Zadeba et</li> </ol>

- al. The Calibration Telescope System of the NEVOD Cherenkov Water Detector. *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, Vol. 61, No. 5, pp. 673–679.
8. V. A. Khomyakov, A. G. Bogdanov, V. V. Kindin et al. Techniques for Detecting the Cherenkov Light from Cascade Showers in Water. *Physics of Particles and Nuclei*, 2018, Vol. 49, No. 1, pp. 60–63.
9. R. P. Kokoulin, N. S. Barbashina, A. G. Bogdanov et al. Investigating Cascade Showers Generated by Muons in a Cherenkov Water Detector. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2019, Vol. 83, No. 8, pp. 930–932.
10. Khokhlov, S. S., Bogdanov, AG, Khomyakov, VA et al. Energy spectrum of cascade showers initiated by cosmic ray muons in the Cherenkov water detector. *EPJ Web of Conferences*, (2019), 208, 080018.
11. R.P. Kokoulina, N.S. Barbashina, A.G. Bogdanov et al. Measuring the Cherenkov light yield from cosmic ray muon bundles in the water detector. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 952 (2020) 161586.
12. S.S.Khokhlov A.G.Bogdanov V.A.Khomyakov et al. Cascade showers in the Cherenkov light in water // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020 Vol. 952.
13. E. A. Yurina, N. S. Barbashina, A. G. Bogdanov et al. NEVOD–DECOR Experiment on the Measurement of the Energy Deposit of Cosmic Ray Muon Bundles. *Physics of Atomic Nuclei*, 2020, Vol. 83, No. 9, pp. 1369–1374.
14. I.I. Yashin, M.B. Amelchakov, I.I. Astapov NEVOD - An experimental complex for multi-component investigations of cosmic rays and their interactions in the energy range 1–1010 GeV. 2021 *JINST* 16 T08014.