

«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 НТ-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

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: https://mephi.ru/</p>
<p>Список основных публикаций работников Структурного подразделения, составляющих отзыв, за последние 5 лет по теме диссертации</p>	<ol style="list-style-type: none"> 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. 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). 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. 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. 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. 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. 7. M. B. Amelchakov, A. G. Bogdanov, E. A. Zadeba et

- 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.