

УДК 524.1-352

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕЙТРИНО В ТРЕКОВОМ КАНАЛЕ НА ГЛУБОКОВОДНОМ ТЕЛЕСКОПЕ BAIKAL-GVD

© 2023 г. А. В. Аврорин¹, А. Д. Аврорин¹, В. М. Айнутдинов¹, В. А. Аллахвердян², С. Бардачова⁴,
И. А. Белолоптиков², И. В. Борова², Н. М. Буднев⁵, А. Р. Гафаров⁵, К. В. Голубков¹,
Н. С. Горшков², Т. И. Грес⁵, Р. Дворничи⁴, Ж.-А. М. Джилкибаев¹, В. Я. Дик^{2,10},
Г. В. Домогацкий¹, А. А. Дорошенко¹, А. Н. Дьячок⁵, Т. В. Елзов², Д. Н. Заборов¹, В. К. Кебкал³,
К. Г. Кебкал³, В. А. Кожин⁶, М. М. Колбин², К. В. Конищев², А. В. Коробченко², А. П. Кошечкин¹,
М. В. Круглов², М. К. Крюков¹, В. Ф. Кулепов⁷, Ю. М. Малышкин², М. Б. Миленин¹,
Р. Р. Миргазов⁵, В. Назари², Д. В. Наумов², Д. П. Петухов¹, Е. Н. Плисковский², М. И. Розанов⁸,
В. Д. Рушай², Е. В. Рябов⁵, Г. Б. Сафронов^{1, *}, Д. Сеитова^{2, 10}, А. Э. Сиренко², А. В. Скурихин⁶,
А. Г. Соловьев², М. Н. Сорокинов², А. П. Стромаков¹, О. В. Суворова¹, В. А. Таболенко⁵,
Б. А. Таращанский⁵, Л. Файт⁹, А. Хатун⁴, Е. В. Храмов², Б. А. Шайбонов², М. Д. Шелепов¹,
Ф. Шимковиц^{4, 9}, И. Штекл⁹, Э. Эцкерова⁴, Ю. В. Яблокова²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт ядерных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

²Международная межправительственная организация

“Объединенный институт ядерных исследований”, Дубна, Россия

³Общество с ограниченной ответственностью “EvoLogics”, Берлин, Германия

⁴Университет имени Я.А. Коменского, Братислава, Словакия

⁵Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Иркутский государственный университет”, Иркутск, Россия

⁶Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

⁷Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Нижегородский государственный технический университет имени Р.И. Алексеева”, Нижний Новгород, Россия

⁸Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Санкт-Петербургский государственный морской технический университет”, Санкт-Петербург, Россия

⁹Чешский технический университет, Прага, Чешская Республика

¹⁰Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан, Алматы, Республика Казахстан

*E-mail: grigorybs@gmail.com

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Baikal-GVD — это нейтринный телескоп кубокилометрового масштаба, строящийся в озере Байкал. В настоящее время чувствительный объем детектора составляет около 0.5 км^3 . В реакциях взаимодействия мюонных и частично тау-нейтрино вблизи телескопа через обмен W-бозонами образуются мюоны, распространяющиеся на большие расстояния в толще воды и скальной породы. Восстановление траектории мюона позволяет получить наиболее точную оценку направления нейтрино на телескопах такого типа. Для достаточно длинных треков угловое разрешение лучше, чем 0.5° . Изложено состояние дел в анализе трековых событий Baikal-GVD.

DOI: 10.31857/S0367676523701740, EDN: ORKZIK

ВВЕДЕНИЕ

Глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD [1, 2] расположен в южной части озера Байкал. Глубина озера в районе установки примерно постоянна и составляет около 1366 м. Телескоп имеет модульную структуру и в настоящее время состоит из 10 независимых детекторов — так на-

зываемых “кластеров”. Каждый кластер включает в себя 8 гирлянд, несущих оптические модули (ОМ), снабженные фотоумножителями, расположенные на глубинах 750–1275 м с шагом 15 м (кластер 9 имеет дополнительную 9-ю гирлянду). Каждый кластер соединен с береговым центром эксперимента гибридным опто-электрическим кабелем, обеспечивающим питание оптических

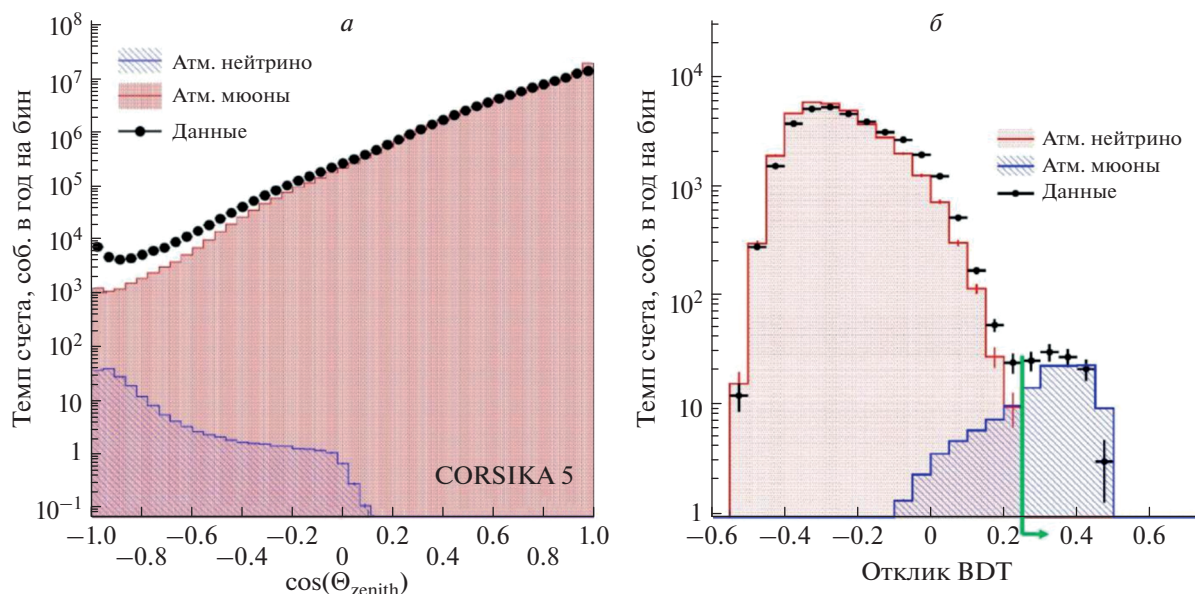


Рис. 1. Угловое распределение восстановленных атмосферных мюонов, полученное в данных 2019 г. (черные точки), в сравнении с предсказаниями Монте-Карло для атмосферных мюонов (красная гистограмма) и атмосферных нейтрино (синяя гистограмма) (а). Распределение событий по отклику классификатора событий (BDT), полученное в данных в сравнении с фоном от атмосферных мюонов (красная гистограмма) и откликом для атмосферных нейтрино (синяя гистограмма) (б).

модулей и передачу данных. События с каждого кластера независимо передаются на берег в случае срабатывания триггера любой из гирлянд. Данные из берегового центра передаются в ОИ-ЯИ (Дубна), где происходит их обработка и осуществляется долговременное хранение. Сохраняемые данные разделяются на так называемые однокластерные события — отдельные события для каждого кластера и многокластерные — объединенные события, в которых было обнаружено совпадение срабатывания триггеров на различных кластерах (во временном окне, заданном временем распространения мюона между кластерами).

Основной целью эксперимента является изучение потока астрофизических нейтрино, открытого телескопом IceCube в 2013 г. [3]. Взаимодействия нейтрино вблизи установки сопровождаются каскадом заряженных частиц и/или мюоном, который распространяется на большие расстояния в толще воды и с хорошей точностью (улучшающейся с энергией) сохраняет направление нейтрино. Направление и энергия мюона могут быть восстановлены по временам и интегральным зарядам импульсов, зарегистрированных в ОМ [4, 5]. Угловое разрешение для трековых событий составляет 0.3° – 0.5° для мюонов с достаточно длинным треком в чувствительном объеме установки, что превосходит типичное разрешение для каскадов. В то же время энергетическое разрешение для мюонов значительно хуже, чем для каскадов и составляет около 300% для энергии мюона ~ 100 ТэВ. Хорошее угловое разрешение делает трековый анализ особенно

важным для поиска точечных источников нейтрино. Основной поток нейтрино, регистрируемых детектором, составляют атмосферные нейтрино. Спектр атмосферных нейтрино быстро спадает с энергией, и при энергиях частиц $> \sim 60$ ТэВ начинает доминировать поток астрофизических нейтрино. Для трекового анализа важны и однокластерные и мультикластерные события. Однокластерные события обеспечивают чувствительность телескопа к восходящим нейтрино с зенитными углами более $\sim 120^\circ$. Многокластерные события обеспечивают чувствительность к околоразрешенным событиям, которые особенно важны для высоких энергий ($> O(500$ ТэВ)), при которых Земля теряет прозрачность для нейтрино. Анализ трековых событий направлен на точное и эффективное восстановление мюонных нейтрино для энергий от 100 ГэВ до нескольких ПэВ. В работе описано развитие методик восстановления мюонных треков в Baikal-GVD.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Восстановление треков осуществляется в два этапа: на первом этапе отбираются импульсы, образованные черенковским светом излученным мюоном, и подавляются импульсы от свечения воды озера, на втором этапе восстанавливаются направление, энергия и различные параметры качества трека (например, сходимость фита, значение фитирующей функции). Первый набор событий-кандидатов в атмосферные нейтрино был

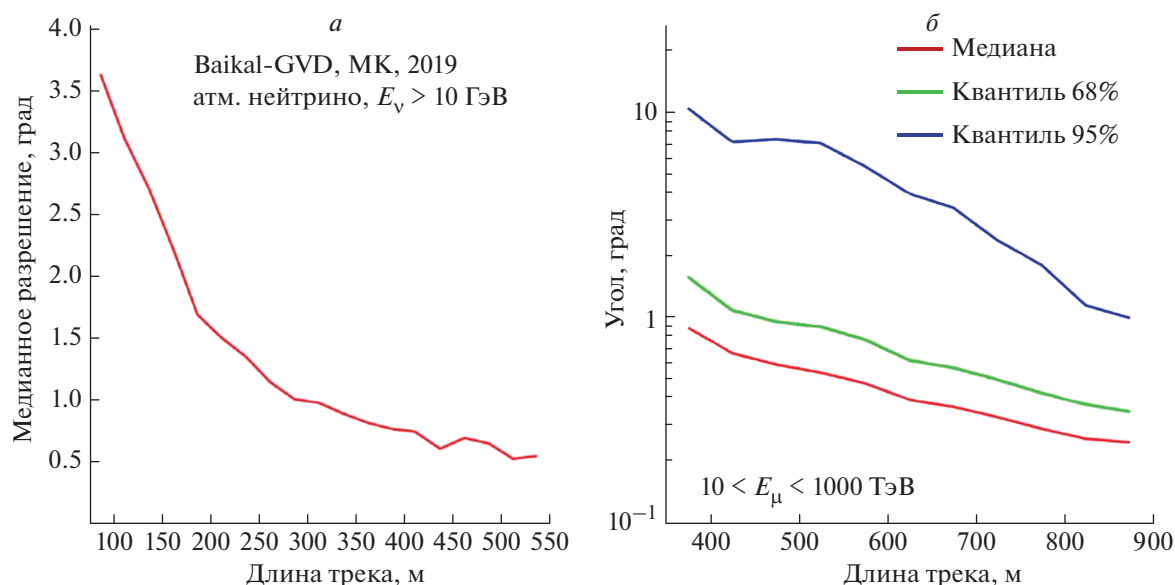


Рис. 2. Угловое разрешение в зависимости от длины трека в чувствительном объеме установки: для однокластерного анализа для низкоэнергетичных нейтрино (*а*); для многокластерного анализа для спектра астрофизических нейтрино с $E > 10$ ТэВ (*б*).

выделен с помощью т. н. быстрого алгоритма реконструкции однокластерных событий, примененного к первым трем месяцам данных 2019 г. В результате был выделен набор из 44 событий — кандидатов в нейтрино, в котором доминируют атмосферные нейтрино со средней энергией ~ 500 ГэВ [6]. Быстрый алгоритм используется в автоматической системе обработки данных Baikal-GVD и для выработки внутренних оповещений о событиях-кандидатах в нейтрино [7, 8]. В настоящее время разработана более чувствительная методика реконструкции мюонных нейтрино для однокластерных событий, основанная на эффективном алгоритме отбора импульсов [9] и применении машинного обучения для отбора событий — кандидатов в нейтрино.

Подавление шумовых импульсов осуществляется алгоритмом, сканирующим небесную сферу с настраиваемым шагом ($5-10^\circ$). Для каждого направления определяется набор импульсов, попадающих в зависящее от направления временное окно. Направление с достаточно большим числом отобранных импульсов и минимальным значением штрафной функции выбирается в качестве предварительного и соответствующий набор импульсов используется для точного восстановления параметров трека. Подробное описание методов реконструкции мюонов можно найти в [9, 10]. Полученное с помощью такого алгоритма распределение треков по зенитному углу представлено на рис. 2а. Процедура восстановления была применена к наборам событий Монте-Карло (МК) симуляций атмосферных мюонов и атмосферных нейтрино. События от атмосферных мюонов, неверно реконструированные как вос-

ходящие, составляют фон к атмосферным нейтрино, превосходящий сигнал на данном этапе в 10^2-10^4 раз. Чтобы подавить этот фон была разработана методика классификации на основе деревьев принятия решений с использованием программы TMVA [11]. Деревья были обучены на наборах сигнальных и фоновых событий МК с восстановленным зенитным углом $> 120^\circ$. Было получено, что порог на значение классификатора 0.25 (см. рис. 2б) полностью подавляет фон для живого времени работы телескопа, соответствующего первым трем месяцам сезона 2019, при этом сохраняя 70% сигнала. В результате применения этого классификатора к данным был выделен набор из 106 событий-кандидатов в нейтрино в наборе данных, соответствующем 326 дням работы одного кластера. При этом, ожидаемое число событий-кандидатов из МК для атмосферных нейтрино составляет 81.2. Обнаруженное расхождение в $\sim 30\%$ изучается. В результате проделанной работы чувствительность телескопа к низкоэнергетичным нейтрино была улучшена примерно в два раза по сравнению с [6].

Многокластерные события позволяют полностью раскрыть потенциал угловой точности телескопа. Для многокластерных событий была разработана и изучена на МК с энергией нейтрино до 1 ПэВ специальная методика реконструкции, основанная на оценке параметров трека по набору ОМ выработавших триггер в различных кластерах. Методика отбора нейтрино в мультикластерных событиях в настоящее время находится в разработке. Для многокластерного восстановления получено, что угловое разрешение для треков

с длиной более ~600 м в чувствительном объеме телескопа составляет лучше 0.5° (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Телескоп Baikal-GVD в настоящее время включает 10 полномасштабных кластеров. Разработанные методики реконструкции мюонов позволяют достичь углового разрешения лучше 0.5° для достаточно длинных треков. В первых трех месяцах набора данных 2019 г. в однокластерном анализе отобрано 106 событий-кандидатов в нейтрино. Была разработана и валидирована на МК реконструкция мюонов для многокластерных событий для энергий до 1 ПэВ.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука”, грант № 075-15-2020-778. Большую роль в обработке данных сыграла возможность использования облачной структуры ОИЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // arXiv: 2109.14344. 2021.
2. Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 8. С. 1016.
3. Айнутдинов В.М., Балканов В.А., Белолептиков И.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 3. С. 410; Aynutdinov V.M., Balkanov V.A., Belolapnikov I.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2005. V. 69. No. 3. P. 470.
4. Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Белолептиков И.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 3. С. 443; Avrorin A.V., Aynutdinov V.M., Belolapnikov I.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. No. 3. P. 414.
5. Aartsen M.G., Abbasi R., Abdou Y. et al. // Science. 2013. V. 342. Art. No. 1242856.
6. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. P. 1025.
7. Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 7. С. 987; Avrorin A.V., Avrorin A.D., Aynutdinov V.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 7. (In print).
8. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 7. (In print).
9. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // arXiv: 2108.00208. 2021.
10. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // arXiv: 2108.11217. 2021.
11. Hocker A., Speckmayer P., Stelzer J. et al. // CERN-OPEN-2007-007. 2007.

Results of the track-like neutrino event reconstruction at the BAIKAL-GVD neutrino telescope

A. V. Avrorin^a, A. D. Avrorin^a, V. M. Aynutdinov^a, V. A. Allakhverdyan^b, Z. Bardachová^d, I. A. Belolapnikov^b, I. V. Borina^b, N. M. Budnev^d, A. R. Gafarov^e, K. V. Golubkov^a, N. S. Gorshkov^b, T. I. Gress^e, R. Dvornický^d, Zh.-A. M. Dzhilkibaev^a, V. Ya. Dik^{b,j}, G. V. Domogatsky^a, A. A. Doroshenko^a, A. N. Dyachok^e, T. V. Elzhov^b, D. N. Zaborov^a, V. K. Kebkal^c, K. G. Kebkal^c, V. A. Kozhin^f, M. M. Kolbin^b, K. V. Konischev^b, A. V. Korobchenko^b, A. P. Koshechkin^a, M. V. Kruglov^b, M. K. Kryukov^a, V. F. Kulepov^g, Yu. M. Malyshkin^b, M. B. Milenin^a, R. R. Mirgazov^e, V. Nazari^b, D. V. Naumov^b, D. P. Petukhov^a, E. N. Pliskovsky^b, M. I. Rozanov^b, V. D. Rushay^b, E. V. Ryabov^e, G. B. Safronov^{a,*}, D. Seitova^{b,j}, A. E. Sirenko^b, A. V. Skurikhin^f, A. G. Solovjev^b, M. N. Sorokovikov^b, A. P. Stromakov^a, O. V. Suvorova^a, V. A. Tabolenko^e, B. A. Tarashansky^e, L. Fajtⁱ, A. Khatun^d, E. V. Khramov^b, B. A. Shaybonov^b, M. D. Shelepov^a, F. Šimkovic^{d,i}, I. Šteklⁱ, E. Eckerová^d, Y. V. Yablokova^b

^aInstitute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

^bJoint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

^cEvoLogics GmbH, Berlin, 13355 Germany

^dComenius University, Bratislava, 81499 Slovakia

^eIrkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

^fSkobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^gNizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

^hSt. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, 190008 Russia

ⁱCzech Technical University, Institute of Experimental and Applied Physics, Prague, CZ-11000 Czech Republic

^jInstitute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, 050032 Kazakhstan

*e-mail: grigorybs@gmail.com

Baikal-GVD is a 1 km³ – scale neutrino telescope being constructed in Lake Baikal. Presently the sensitive volume of the detector constitutes about 0.5 km³. Muons being produced in muon and partly tau-neutrino interactions in the vicinity of the telescope ongoing through the W-boson exchange propagate at large distances in Lake water. Reconstructed muon trajectory provides the most precise probe of the neutrino direction attainable at large-volume neutrino telescopes. Angular resolution can be as good as 0.5° for muon tracks of sufficient length. The status of the data analysis in the muon channel at the Baikal-GVD is discussed.