

УДК 524.1-352

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕЙТРИНО В ТРЕКОВОМ КАНАЛЕ НА ГЛУБОКОВОДНОМ ТЕЛЕСКОПЕ ВАИКАЛ-GVD

© 2023 г. А. В. Аврорин<sup>1</sup>, А. Д. Аврорин<sup>1</sup>, В. М. Айнундинов<sup>1</sup>, В. А. Аллахвердян<sup>2</sup>, С. Бардачова<sup>4</sup>,  
И. А. Белолоптиков<sup>2</sup>, И. В. Борина<sup>2</sup>, Н. М. Буднев<sup>5</sup>, А. Р. Гафаров<sup>5</sup>, К. В. Голубков<sup>1</sup>,  
Н. С. Горшков<sup>2</sup>, Т. И. Гресь<sup>5</sup>, Р. Дворниcki<sup>4</sup>, Ж.-А. М. Джилкибаев<sup>1</sup>, В. Я. Дик<sup>2,10</sup>,  
Г. В. Домогацкий<sup>1</sup>, А. А. Дорошенко<sup>1</sup>, А. Н. Дьячок<sup>5</sup>, Т. В. Елжов<sup>2</sup>, Д. Н. Заборов<sup>1</sup>, В. К. Кебкал<sup>3</sup>,  
К. Г. Кебкал<sup>3</sup>, В. А. Кожин<sup>6</sup>, М. М. Колбин<sup>2</sup>, К. В. Конищев<sup>2</sup>, А. В. Коробченко<sup>2</sup>, А. П. Кошечкин<sup>1</sup>,  
М. В. Круглов<sup>2</sup>, М. К. Крюков<sup>1</sup>, В. Ф. Кулепов<sup>7</sup>, Ю. М. Мальшкин<sup>2</sup>, М. Б. Миленин<sup>1</sup>,  
Р. Р. Миргазов<sup>5</sup>, В. Назари<sup>2</sup>, Д. В. Наумов<sup>2</sup>, Д. П. Петухов<sup>1</sup>, Е. Н. Плисковский<sup>2</sup>, М. И. Розанов<sup>8</sup>,  
В. Д. Рушай<sup>2</sup>, Е. В. Рябов<sup>5</sup>, Г. Б. Сафронов<sup>1, \*</sup>, Д. Сеитова<sup>2, 10</sup>, А. Э. Сиренко<sup>2</sup>, А. В. Скурихин<sup>6</sup>,  
А. Г. Соловьев<sup>2</sup>, М. Н. Сороковиков<sup>2</sup>, А. П. Стромаков<sup>1</sup>, О. В. Суворова<sup>1</sup>, В. А. Таболенко<sup>5</sup>,  
Б. А. Таращанский<sup>5</sup>, Л. Файт<sup>9</sup>, А. Хатун<sup>4</sup>, Е. В. Храмов<sup>2</sup>, Б. А. Шайбонов<sup>2</sup>, М. Д. Шелепов<sup>1</sup>,  
Ф. Шимковиц<sup>4, 9</sup>, И. Штекл<sup>9</sup>, Э. Эцкерова<sup>4</sup>, Ю. В. Яблокова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

<sup>2</sup>Международная межправительственная организация

“Объединенный институт ядерных исследований”, Дубна, Россия

<sup>3</sup>Общество с ограниченной ответственностью “EvoLogics”, Берлин, Германия

<sup>4</sup>Университет имени Я.А. Коменского, Братислава, Словакия

<sup>5</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Иркутский государственный университет”, Иркутск, Россия

<sup>6</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

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

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

<sup>7</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

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

<sup>8</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

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

<sup>9</sup>Чешский технический университет, Прага, Чешская Республика

<sup>10</sup>Институт 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.

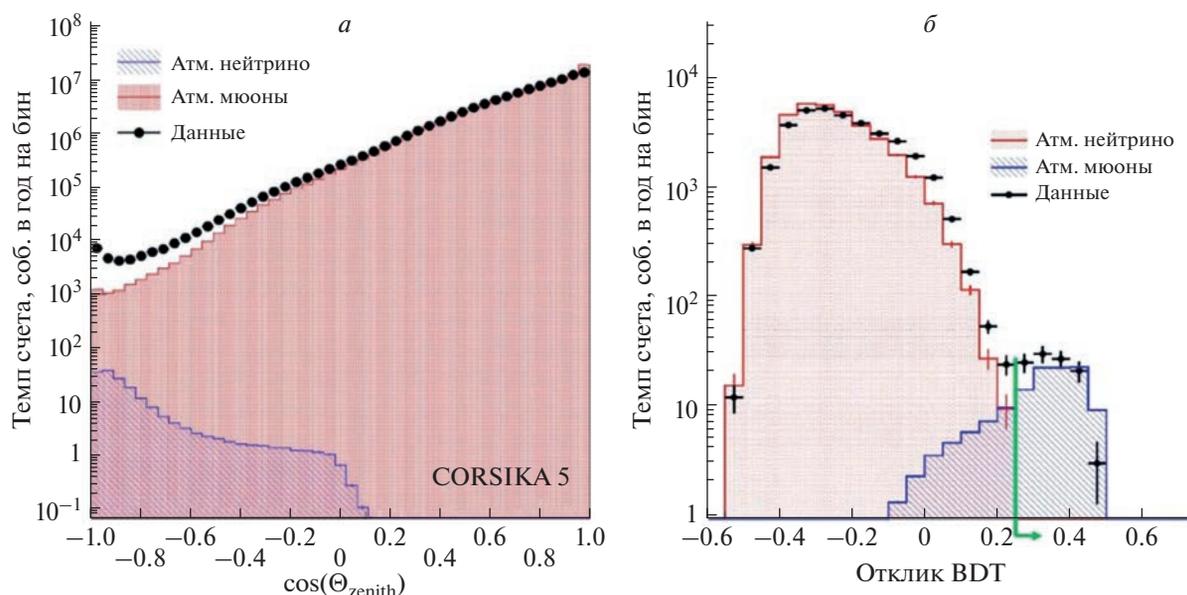
Baikal-GVD — это нейтринный телескоп кубокилометрового масштаба, строящийся в озере Байкал. В настоящее время чувствительный объем детектора составляет около  $0.5 \text{ км}^3$ . В реакциях взаимодействия мюонных и частично тау-нейтрино вблизи телескопа через обмен W-бозонами образуются мюоны, распространяющиеся 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  $0.5^\circ$ . 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).

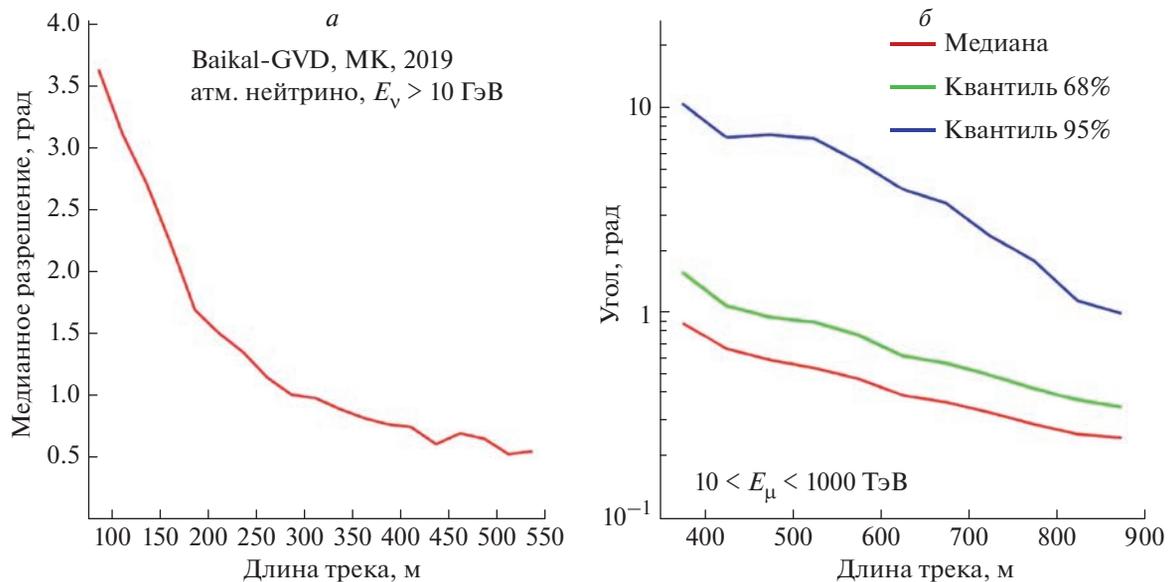
модулей и передачу данных. События с каждого кластера независимо передаются на берег в случае срабатывания триггера любой из гирлянд. Данные из берегового центра передаются в ОИ-ЯИ (Дубна), где происходит их обработка и осуществляется долговременное хранение. Сохраняемые данные разделяются на так называемые 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  $0.3^\circ$ – $0.5^\circ$  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  $\sim 100$  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, сходимости 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  $\sim 500$  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 набором 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<sup>a</sup>, A. D. Avrorin<sup>a</sup>, V. M. Aynutdinov<sup>a</sup>, V. A. Allakhverdyan<sup>b</sup>, Z. Bardáčová<sup>d</sup>, I. A. Belolapnikov<sup>b</sup>, I. V. Borina<sup>b</sup>, N. M. Budnev<sup>d</sup>, A. R. Gafarov<sup>e</sup>, K. V. Golubkov<sup>a</sup>, N. S. Gorshkov<sup>b</sup>, T. I. Gress<sup>e</sup>, R. Dvornický<sup>d</sup>, Zh.-A. M. Dzhilkibaev<sup>a</sup>, V. Ya. Dik<sup>b,j</sup>, G. V. Domogatsky<sup>a</sup>, A. A. Doroshenko<sup>a</sup>, A. N. Dyachok<sup>e</sup>, T. V. Elzhov<sup>b</sup>, D. N. Zaborov<sup>a</sup>, V. K. Kebkal<sup>c</sup>, K. G. Kebkal<sup>c</sup>, V. A. Kozhin<sup>f</sup>, M. M. Kolbin<sup>b</sup>, K. V. Konischev<sup>b</sup>, A. V. Korobchenko<sup>b</sup>, A. P. Koshechkin<sup>a</sup>, M. V. Kruglov<sup>b</sup>, M. K. Kryukov<sup>a</sup>, V. F. Kulepov<sup>g</sup>, Yu. M. Malyshkin<sup>b</sup>, M. B. Milenin<sup>a</sup>, R. R. Mirgazov<sup>e</sup>, V. Nazari<sup>b</sup>, D. V. Naumov<sup>b</sup>, D. P. Petukhov<sup>a</sup>, E. N. Pliskovsky<sup>b</sup>, M. I. Rozanov<sup>h</sup>, V. D. Rushay<sup>b</sup>, E. V. Ryabov<sup>e</sup>, G. B. Safronov<sup>a,\*</sup>, D. Seitova<sup>b,j</sup>, A. E. Sirenko<sup>b</sup>, A. V. Skurikhin<sup>f</sup>, A. G. Solovjev<sup>b</sup>, M. N. Sorokovikov<sup>b</sup>, A. P. Stromakov<sup>a</sup>, O. V. Suvorova<sup>a</sup>, V. A. Tabolenko<sup>e</sup>, B. A. Tarashansky<sup>e</sup>, L. Fajt<sup>i</sup>, A. Khatun<sup>d</sup>, E. V. Khramov<sup>b</sup>, B. A. Shaybonov<sup>b</sup>, M. D. Shelepov<sup>a</sup>, F. Šimkovic<sup>d,i</sup>, I. Štekl<sup>i</sup>, E. Eckerová<sup>d</sup>, Y. V. Yablokova<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

<sup>b</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

<sup>c</sup>EvoLogics GmbH, Berlin, 13355 Germany

<sup>d</sup>Comenius University, Bratislava, 81499 Slovakia

<sup>e</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia

<sup>f</sup>Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>g</sup>Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

<sup>h</sup>St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, 190008 Russia

<sup>i</sup>Czech Technical University, Institute of Experimental and Applied Physics, Prague, CZ-11000 Czech Republic

<sup>j</sup>Institute 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 km<sup>3</sup> – scale neutrino telescope being constructed in Lake Baikal. Presently the sensitive volume of the detector constitutes about 0.5 km<sup>3</sup>. 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.