

УДК 524.1-352

ОТСЛЕЖИВАНИЕ НЕЙТРИННЫХ ОПОВЕЩЕНИЙ ТЕЛЕСКОПА IceCube ГЛУБОКОВОДНЫМ ТЕЛЕСКОПОМ BAIKAL-GVD

© 2023 г. А. В. Аврорин¹, А. Д. Аврорин¹, В. М. Айнутдинов¹, В. А. Аллахвердян², С. Бардачова⁴, И. А. Белолепиков², 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. Кеббал³, К. Г. Кеббал³, 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. Сафронов¹, 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: viktoriya@jinr.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Основной целью глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD является регистрация высокоэнергичных нейтрино астрофизического происхождения через восстановление направления движения мюонов илиливней частиц, образующихся во взаимодействиях нейтрино с водной средой. С 2020 г. Baikal-GVD отслеживает оповещения подледного телескопа IceCube о регистрации нейтрино с энергией свыше 100 ТэВ. Представлены результаты поиска совпадений событий Baikal-GVD с нейтринными оповещениями IceCube с сентября 2020 г. по апрель 2022 г.

DOI: 10.31857/S0367676523701739, EDN: ORIGDF

ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение диффузной астрофизической компоненты в потоке нейтрино с энергиями выше десятков ТэВ [1] и ассоциация нейтрино с энергией выше 200 ТэВ с блазаром TXS0506 + 056 в наблюдениях обсерватории IceCube [2] положи-

ли начало поиску и идентификации астрофизических тэватронов и процессов генерации в них нейтрино. В рамках сотрудничества по развитию данного направления IceCube рассылает оповещения о нейтринных кандидатах с энергией выше 100 ТэВ с помощью системы GCN [3].

Baikal Gigaton Volume Detector (Baikal-GVD) — строящийся в озере Байкал нейтринный телескоп объемом 1 км^3 [4]. Первый кластер телескопа, представляющий собой систему из 288 оптических сенсоров, был установлен в 2016 г. На 2022 г. телескоп состоит из 10 кластеров, каждый из которых работает в автономном режиме [5]. С 2020 г. Baikal-GVD обрабатывает приходящие сообщения в режиме, близком к режиму реального времени, позволяя давать быстрый отклик. В работе представлены результаты поиска совпадений событий Baikal-GVD с нейтринными оповещениями IceCube.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЕЛЕСКОПА BAIKAL-GVD

Работа глубоководных и подледных нейтринных телескопов основана на регистрации черенковского излучения от вторичных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтрино с веществом [6]. В результате взаимодействия ν_μ с веществом через заряженные токи образуются трековые события. Электромагнитные и адронные ливни, называемые каскадами, возникают при взаимодействии ν_e , ν_μ , ν_τ со средой через нейтральные токи, а также ν_e и ν_τ — через заряженные токи.

Для мюонных треков протяженностью в сотни метров внутри телескопа угловое разрешение восстановления координат события соответствует менее 1° для Baikal-GVD и IceCube [7, 8]. Для подавления атмосферных мюонов при отборе треков Baikal-GVD рассматриваются треки с зенитным углом (Zen) более 120° [9]. Угловое разрешение в реконструкции каскадов менее точное, чем для треков, так как источник черенковского излучения от ливня квазиточечный (4.5° для GVD и 15° для IceCube) [10, 8]. Точность восстановления энергии зависит от направления прихода каскада и оценки величины его энергии и соответствует 10–30% для энергий 1 ТэВ–10 ПэВ [10].

Для формирования физических событий из первичных данных было разработано специальное программное обеспечение, обеспечивающее их геометрическую реконструкцию и восстановление энергии. С осени 2020 г. Baikal-GVD работает одновременно в быстром режиме и в режиме оффлайн обработки данных. Первичные данные передаются на берег по оптоволоконному кабелю, далее по радиоканалу в г. Байкальск, затем по каналу Internet в компьютерный центр ОИЯИ (г. Дубна), где данные хранятся и обрабатываются. В режиме оффлайн обработка начинается после поступления в компьютерный центр всех файлов данных, соответствующих одному сеансу их набора (ран), что составляет в среднем 24 ч. Время обработки данных в ране зависит от уровня

фоновое свечения воды в озере и составляет 3–5 ч. Для уменьшения временной задержки была реализована быстрая обработка, которая запускается сразу после появления каждого файла данных в хранилище. Промежуток времени с момента регистрации события до момента завершения обработки файла с предоставлением информации о событии в быстром режиме составляет около 3 мин. при минимальном уровне фона и 5–10 мин при повышенном уровне [11]. На данный момент в быстром режиме используется только статическая информация о координатах фотодетекторов, в то время как в режиме оффлайн используется более точная информация о координатах фотодетекторов по данным акустической системы позиционирования и проводится дополнительный анализ качества данных [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ОТСЛЕЖИВАНИЯ СОБЫТИЙ ICESUBE

С осени 2020 г. было принято и обработано 54 оповещения о трековых событиях IceCube с $E > 100 \text{ ТэВ}$. Для большинства событий направления прихода являются нисходящими относительно горизонта Baikal-GVD ($Zen < 90^\circ$). Далее приведены основные результаты поиска совпадений между треками IceCube и каскадами Baikal-GVD, восстановленными в однокластерном анализе, в конусе с половинным углом раствора $\Psi = 5^\circ$ и во временном окне $\pm 500 \text{ с}$, $\pm 12 \text{ ч}$, $\pm 24 \text{ ч}$ [13]. Значение Ψ учитывает величину углового разрешения рассматриваемого типа событий обоих телескопов.

Анализ событий IceCube включает в себя несколько этапов: пространственно-временной анализ, анализ соответствующего фона, расчет p -value с нулевой гипотезой принадлежности к фону, а также вычисление верхних пределов на поток нейтрино, используя значения эффективных площадей [14].

По итогам 2020 г. в отсутствие значимых превышений над фоном в окне $\pm 12 \text{ ч}$. были подсчитаны верхние пределы на потоки нейтрино для спектра E^{-2} : $\sim 1\text{--}2.5 \text{ ГэВ/см}^2$ в интервале энергий 1 ТэВ–10 ПэВ [15]. За сезон 2021 г. (апрель 2021–апрель 2022) было обнаружено пять совпадений, соответствующих всем условиям отбора, из них два события прошли оффлайн-отбор. Событие GVD211208A стало кандидатом на нейтрино от яркого радио-блара PKS0735 + 178 наряду с нейтринными событиями от IceCube, Baksan и KM3Net [16–18]. Каскад Baikal-GVD с $E = 45 \text{ ТэВ}$ был зарегистрирован через 3.95 ч. после события IC211208A на расстоянии 5.3° от него и на расстоянии 4.68° от активного блара [19]. Вероятность принадлежности GVD211208A к фону составляет 0.0044 без учета trial-фактора и 0.176 с его учетом, как полного числа событий, по которым анализировались данные каскадов Baikal-GVD. Значения

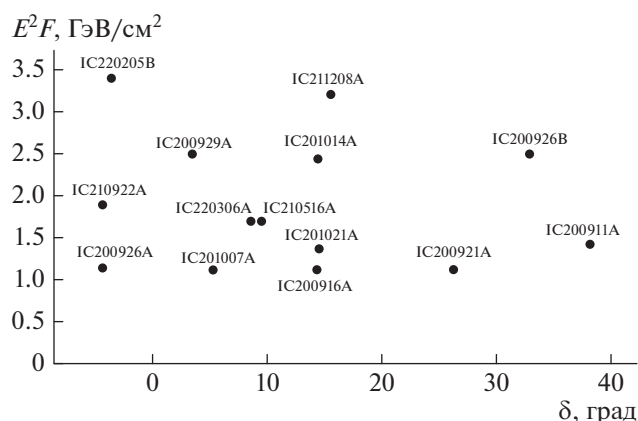


Рис. 1. Верхние пределы на 90% д.у. на поток нейтрино для энергий 1 ТэВ–10 ПэВ для спектра E^{-2} в предположении о равной доле типов нейтрино в полном потоке, рассчитанные для событий IceCube 2020–2022 для временного окна ± 12 ч. от времени события.

верхних пределов на поток нейтрино во временном окне ± 12 ч. в направлении событий IceCube по итогам наблюдений сентябрь 2020 г.–апрель 2022 г. приведены на рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным достижением Baikal-GVD в задаче отслеживания оповещений IceCube является значение временной задержки от 3 до 10 мин между получением оповещения IceCube и предоставлением предварительного ответа. За весь период отслеживания в отсутствие статистически значимых совпадений полученные на 90% д.у. значения пределов на поток нейтрино находятся в диапазоне $\sim 1\text{--}3$ ГэВ/см² для энергий 1 ТэВ–10 ПэВ и во временном окне ± 12 ч.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта “Наука” (проект № 075-15-2020-778). Работа В. Дик поддержана грантом ОИЯИ для молодых ученых и специалистов № 22-202-02. Большую роль в обработке данных сыграла возможность использования облачной инфраструктуры ОИЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aartsen M.G., Abbasi R., Abdou Y. et al. // Science. 2013. V. 342. Art. No. 1242856.
2. Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. // Science. 2018. V. 361. P. 147.
3. https://gcns.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html.
4. Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Балканов В.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. С. 1016; Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Балканов В.А. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 921.
5. Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 7. С. 991; Ав-

rorin A.V., Avrorin A.D., Aynutdinov V.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 7. (In print).

6. Айнутдинов В.М., Балканов В.А., Белолепников 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.
7. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // EPJ C. 2021. V. 81. P. 1025.
8. Aartsen M.G., Ackermann M., Adams J. et al. // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. Art. No. 51103.
9. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 7. (In print).
10. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // Proc. 37th ICRC (Berlin, 2021). P. 1144.
11. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // Proc. 37th ICRC (Berlin, 2021). P. 1040.
12. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // Proc. 37th ICRC (Berlin, 2021). P. 1094.
13. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // Proc. 37th ICRC (Berlin, 2021). P. 946.
14. Аврорин А.В., Айнутдинов В.М., Балканов В.А. и др. // Письма в Астрон. журн. 2009. Т. 35. С. 651.
15. Allakhverdyan V.A., Avrorin A.D., Avrorin A.V. et al. // JINST. 2021. V. 16. Art. No. C11008.
16. IceCube Collaboration // GRB Coordinates Network. Circular Service No. 31191. 2021.
17. Petkov V.B., Novoseltsev Y.F., Novoseltseva R.V. (Baksan Underground Scintillation Telescope Group) // The Astronomer's Telegram No. 15143. 2021.
18. Filippini F., Illuminati G., Heijboer A. et al. // The Astronomer's Telegram No. 15290. 2021.
19. Dzhlkibaev Z.A., Suvorova O.V. et al. // The Astronomer's Telegram No. 15112. 2021.

The deep-water BAIKAL-GVD telescope follow-up analysis of the IceCube neutrino alerts

A. V. Avrorin^a, A. D. Avrorin^a, V. M. Aynutdinov^a, V. A. Allakhverdyan^b, Z. Bardáčová^d,
I. A. Belolaptikov^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. Malyshev^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^h, 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, Yu. V. Yablokova^b

^a*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

^b*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia*

^c*EvoLogics GmbH, Berlin, 13355 Germany*

^d*Comenius University, Bratislava, 81499 Slovakia*

^e*Irkutsk State University, Irkutsk, 664003 Russia*

^f*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^g*Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^h*St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, 190008 Russia*

ⁱ*Czech Technical University, Institute of Experimental and Applied Physics, Prague, 11000 Czech Republic*

^j*Institute of Nuclear Physics Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, 050032 Kazakhstan*

^{*}*e-mail: viktoriya@jinr.ru*

The main goal of the Baikal-GVD deep-sea neutrino telescope is to detect high-energy neutrinos of astrophysical origin by reconstruction of muon tracks or showers of particles generated in interactions of neutrino with water. Since September 2020, Baikal-GVD has been monitoring IceCube telescope alerts about detection of neutrinos with the energy over 100 TeV. When follow-up analysis is carried out in real time, the delay between an IceCube notification and Baikal-GVD analysis does not exceed three minutes. The fast follow-up is complemented by an offline search for coincidences in time intervals of ± 1 and ± 12 h with refinement of event's reconstruction. In the absence of a coincidence or in a case of a single coincidence, the value of expected background is calculated and upper limits on the neutrino flux are set.