

ПОИСК ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРИНО НА БАКСАНСКОМ ПОДЗЕМНОМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОМ ТЕЛЕСКОПЕ

М. М. Болиев^{1,*}, *А. В. Буткевич*¹, *В. И. Волченко*¹,
И. М. Дзапарова^{1,2}, *М. М. Кочкаров*¹, *Р. В. Новосельцева*¹,
В. Б. Петков^{1,2}, *П. С. Стриганов*¹, *А. Ф. Янин*¹

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва

² Институт астрономии РАН, Москва

Представлены результаты поиска локальных источников мюонных нейтрино по данным Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа. За период с декабря 1978 г. по май 2017 г. (живое время — 31,05 года) зарегистрировано 1635 нейтринных событий в диапазоне зенитных углов 95–180°. Локальных источников мюонных нейтрино с энергиями ≥ 1 ГэВ не обнаружено. Установлены верхние пределы на поток нейтрино от известных астрофизических объектов.

The results of a search for muon neutrino local sources based on the data collected with the Baksan Underground Scintillation Telescope are presented. For the period from December 1978 to May 2017 (live time = 31.05 y), 1635 neutrino-induced muons were detected in the zenith angle range of 95–180°. No significant excess of muon neutrinos with energy ≥ 1 GeV produced by astrophysical sources is found. An upper limit on muon neutrino flux for known point-like sources is determined.

PACS: 29.40.Mc; 95.55.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Нейтрино благодаря своей проникающей способности несут уникальную информацию об астрофизических объектах, в которых они генерируются. При пересечении космического пространства траектория нейтрино не отклоняется от прямой, и координаты, полученные в нейтринном эксперименте, будут соответствовать истинному положению астрофизических объектов. В рамках существующих моделей генерации космических лучей предполагается, что большие потоки нейтрино высоких энергий могут генери-

*E-mail: boliev@inr.ru

роваться астрофизическими объектами. В качестве потенциальных источников нейтрино рассматриваются известные астрофизические объекты: активные ядра галактик, остатки сверхновых, источники гамма-всплесков, а также так называемые «скрытые источники» нейтрино [1–4]. Существующие модели генерации космических лучей содержат множество неопределенных параметров, поэтому результаты экспериментальных исследований по потокам нейтрино высоких энергий представляют большой интерес для астрофизики. Поиск астрофизических источников нейтрино ведется на всех действующих нейтринных телескопах: Super-Kamiokande, «Байкал», MINOS в Северном полушарии, IceCube в Южном полушарии [5–8]. Обнаружение локальных источников нейтрино и измерение величины их нейтринной светимости позволят продвинуться в понимании проблемы происхождения и механизмов ускорения космических лучей.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты по регистрации проникающих частиц на Баксанском подземном скинтилляционном телескопе (БПСТ) были начаты в 1978 г. БПСТ расположен под горой Андырчи на эффективной глубине $8,5 \cdot 10^4$ г/см² (850 м в. э.) [9]. Установка представляет собой прямоугольный параллелепипед размером $17 \times 17 \times 11$ м и состоит из четырех горизонтальных и четырех вертикальных плоскостей, которые полностью заставлены стандартными скинтилляционными счетчиками. Верхняя горизонтальная плоскость состоит из 576 (24×24) счетчиков, три нижние плоскости содержат по 400 (20×20) счетчиков каждая. Расстояние между горизонтальными плоскостями 3,6 м. Две противоположные вертикальные плоскости идентичны и состоят из 15 рядов по 24 счетчика. Две другие вертикальные плоскости содержат 15 рядов по 22 счетчика. Общая толщина одного слоя телескопа (слой скинтиллятора плюс несущее перекрытие) 165 г/см². Стандартный счетчик представляет собой алюминиевый контейнер размером $0,7 \times 0,7 \times 0,3$ м, заполненный жидким органическим скинтиллятором, специально разработанным для этого эксперимента [10], на основе уайт-спирита (C_nH_{2n+2} , $n \approx 9$) с добавкой РРО (1 г/л). Для того чтобы перевести излучение из ультрафиолетовой области в видимую часть спектра, в скинтиляторе растворен РОРО (0,03 г/л). Объем скинтиллятора просматривается одним фотоэлектронным умножителем ФЭУ-49 с диаметром фотокатода 15 см через иллюминатор из оргстекла толщиной 10 см (толстый иллюминатор служит для уменьшения неоднородности светосбора). Наиболее вероятное энерговыделение в счетчике от мюонов равно 50 МэВ.

Информация с каждого счетчика снимается по нескольким параллельным каналам. Анодный сигнал используется для измерения времени срабатыва-

вания плоскости и измерения энергвыделения до 2,5 ГэВ. Этот сигнал до 2000 г. использовался также как управляющий сигнал для системы регистрации БПСТ. Для контроля и настройки коэффициентов усиления ФЭУ используется анодный сигнал, пропущенный через интегрирующую цепочку (токовый выход). Сигнал с 12-го динода фотоумножителя поступает на интегральный дискриминатор-формирователь (так называемый импульсный канал), который вырабатывает стандартный сигнал для фиксирования номеров сработавших счетчиков. Порог срабатывания дискриминатора-формирователя — 8 МэВ для горизонтальных плоскостей и 10 МэВ для вертикальных плоскостей (до 1986 г. — 12,5 МэВ для всех счетчиков). С 2000 г. триггером для запуска системы регистрации БПСТ является срабатывание импульсного канала любого счетчика. Темп счета данного триггера 17 с^{-1} . Сигнал с пятого динода ФЭУ поступает на вход логарифмического преобразователя для измерения ионизационных потерь в индивидуальном счетчике в диапазоне 0,5–600 ГэВ.

БПСТ является многоцелевым детектором, предназначенным для широкого диапазона исследований в области физики космических лучей и элементарных частиц. Угловое разрешение телескопа зависит от траектории проникающей частицы. Усредненное значение углового разрешения установки 2° . Временное разрешение телескопа 5 нс. Более подробно об угловом и временном разрешении БПСТ см. в работах [11, 12].

Для синхронизации времени используется сигнал GPS. Точность синхронизации диктуется минимальным шагом внутренних часов системы регистрации и равна 0,2 мс. БПСТ имеет высокую степень стабильности работы, живое время регистрации за весь период работы составляет 90 % календарного времени.

2. ПОИСК ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРИНО

Мюоны, пересекающие телескоп в направлении снизу вверх, выделяются из общего потока времяпролетным методом [13]. В 1978–1999 гг. для регистрации нейтринных событий из-за ограничений, связанных с носителями информации, использовались два электронных триггера. Один триггер выделял мюоны, пересекающие телескоп в диапазоне зенитных углов $95\text{--}180^\circ$. Второй триггер отбирал горизонтальные мюоны в диапазоне $80\text{--}100^\circ$. Эффективность этих триггеров, полученная с использованием потока атмосферных мюонов, составляла 99 %. С 2000 г. для отбора нейтринных событий электронные триггеры не используются, вся информация, поступающая с БПСТ, записывается и сохраняется. При отборе нейтринных событий используется отношение скорости света к скорости мюона, пересекающего установку (параметр $1/\beta$). Значение $1/\beta$ в пределах $+1$ соответствует мюонам, идущим сверху, а $1/\beta$ около -1 — идущим снизу частицам. Кандидатами на ней-

тринные события считаются только такие события, когда можно восстановить одну траекторию и параметр $1/\beta$ находится в диапазоне $-1,3 \div -0,7$, хотя любые события с отрицательным значением параметра $1/\beta$ подвергаются визуальному анализу.

Основным фоном для задачи по поиску локальных источников являются атмосферные нейтрино. Поток мюонов с энергией больше 1 ГэВ, полученный на БПСТ [14], равен $(2,72 \pm 0,16) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, что согласуется с ожидаемым значением $(2,62 - 2,94) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Для поиска локальных источников необходимо знать ожидаемый поток атмосферных нейтрино по разным угловым ячейкам. Так как телескоп имеет форму прямоугольного параллелепипеда, основание которого больше высоты, эффективная площадь зависит от зенитного угла прихода частиц. На рис. 1 изображено распределение зарегистрированных мюонов, идущих снизу, а также показана зависимость эффективной площади телескопа от зенитного угла. Видно, что наименьшая эффективная площадь — в вертикальном направлении. В это распределение включены все нейтринные события, зарегистрированные на БПСТ. В программу по поиску локальных источников нейтрино из анализа не входят события с зенитными углами в диапазоне $90-110^\circ$. Это связано с тем, что горизонтальные атмосферные мюоны могут в результате рассеяния имитировать события снизу.

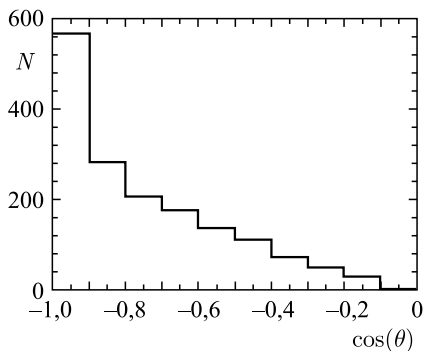


Рис. 1. Распределение нейтринных событий по зенитному углу (θ)

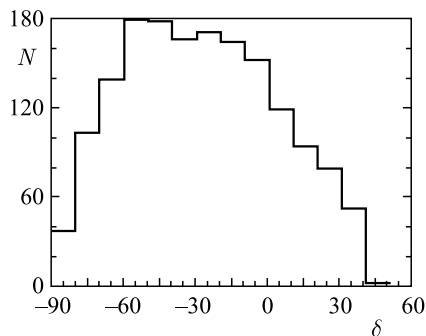


Рис. 2. Распределение 1635 зарегистрированных событий по склонению (δ)

Как было указано ранее, усредненное по разной длине траекторий мюонов угловое разрешение телескопа равно 2° . Для каждого нейтринного события, зарегистрированного на БПСТ, определяются звездные и галактические координаты. Распределение зарегистрированных событий по склонению (δ) показано на рис. 2. Значительное расхождение количества зарегистрированных событий под разными углами склонения объясняется двумя причинами:

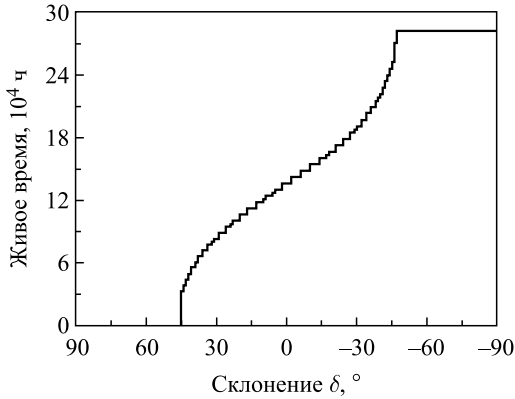


Рис. 3. Зависимость живого времени регистрации от склонения (δ). Период работы БПСТ: декабрь 1978 г. – декабрь 2016 г.

зависимостью эффективной площади от зенитного угла и зависимостью времени наблюдения от звездных координат. Некоторые области звездного неба ($\delta \geq +47^\circ$) не доступны для наблюдения в нейтринном эксперименте, другие области находятся все время под горизонтом ($\delta \leq -47^\circ$) и, соответственно, доступны для наблюдения (рис. 3).

Поиск локальных источников осуществлялся по угловым ячейкам с радиусом 5° , в центре которых расположены исследуемые астрофизические объекты. Оптимальный размер ячейки был получен розыгрышем событий по методу Монте-Карло с учетом энергетического спектра нейтрино, многократного кулоновского рассеяния мюонов от нейтрино в горной породе и углового разрешения БПСТ.

Ограничения на поток мюонных нейтрино по данным БПСТ

Объект	$\alpha, ^\circ$	$\delta, ^\circ$	Фон	Эксперимент	$F_\mu, 10^{-14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (90%-й уровень достоверности)
G.C.	265,6	-28,9	6,5	5	0,32
NGC 1952	83,6	+ 22,0	1,9	0	0,87
Vela X-1	135,5	-40,3	6,5	4	0,15
SS433	288,0	+5,0	2,8	1	0,63
3c273	187,3	+ 2,0	2,9	4	0,52
NGC 5128	201,4	-43,0	6,8	5	0,15
Cen. X-3	170,3	-60,6	6,3	3	0,11
Cyg. X-3	307,7	+ 40,8	0,1	0	0,99
Scorp. X-1	245,0	-15,6	4,2	3	0,37

Анализ данных БПСТ (1635 нейтринных событий) не выявил значимых превышений над фоном ни в одной из угловых ячеек с радиусом 5° . Для оценки ожидаемого фона был использован поток атмосферных нейтрино из работы [15]. Для известных астрофизических объектов были установлены ограничения на поток мюонов, индуцированных нейтрино. В таблице приведены ожидаемое количество мюонов, идущих снизу из ячейки с радиусом 5° , в центре которой находится астрофизический объект, количество зарегистрированных мюонов и ограничение на поток мюонов от нейтрино.

Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный скинтилляционный телескоп при поддержке программы фундаментальных научных исследований Президиума РАН «Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gonzalez-Garcia M. C., Halzen F., Niro V. // *Astropart. Phys.* 2014. V. 57–58. P. 39–48.
2. Kalashev O. E., Kusenko A., Essey W. // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 041103.
3. Lacki B. C., Thompson T. A., Quataert E., Loeb A., Waxman E. // *Astrophys. J.* 2011. V. 734, No. 2. P. 107–120.
4. Waxman E., Bahcall J. // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 78, No. 12. P. 2292–2295.
5. Aynutdinov V. et al. (*Baikal Collab.*) // *Astropart. Phys.* 2006. V. 25. P. 140–150.
6. Thrane E. et al. (*Super-Kamiokande Collab.*) // *Astrophys. J.* 2009. V. 704. P. 503–512.
7. Aartsen M. G. et al. (*IceCube Collab.*) // *Astrophys. J.* 2014. V. 796, No. 2. P. 109–122.
8. Adamson P. et al. (*The MINOS Collab.*) // *Phys. Rev. D.* 2012. V. 86. P. 052007.
9. Alexeyev E. N., Alexeyenko V. V., Andreyev Yu. M., Bakatanov V. N., Butkevich A. V., Chudakov A. E., Galperin M. D., Gitelson A. A., Gurentsov V. I., Danshin A. E., Dogujayev V. A., Dadikin V. L., Elensky Ya. S., Kozyarivsky V. A., Kogai I. M., Klimentko N. F., Kiryushin A. A., Kononov Yu. N., Makoev B. A., Markov V. Ya., Markov Yu. Ya., Malovichko Yu. V., Metlinsky N. A., Mihelev A. R., Mikheyev S. P., Novoselov Yu. F., Sborshikov V. G., Sklyarov V. V., Stepanov V. I., Stenkin Yu. V., Sulla-Petrovsky Yu. R., Tulupova T. I., Voevodsky A. V., Volchenko V. I., Zakideshev V. N. // *Proc. of the 16th ICRC.* 1979. V. 10. P. 276–281.
10. Бакатанов В. Н., Дадыкин В. Л. // *Материалы 5-й Всесоюз. конф. по синтезу, производству и использованию скинтилляторов.* Ч. 2. Харьков, 1970. С. 43.
11. Andreyev Yu. M., Chudakov A. E., Malovichko Yu. V., Markov V. Y., Mikheyev S. P., Stepanov V. I., Zakidyshev V. N. // *Proc. of the 16th ICRC.* 1979. V. 10. P. 184–187.
12. Андреев Ю. М., Гуренцов В. И., Когай И. М., Никушина О. Ю. Препринт ИЯИ АН СССР. М., 1989.
13. Boliev M. M., Butkevich A. V., Chudakov A. E., Mikheyev S. P., Skarzhinskaya N. V., Zakideshev V. N. // *Proc. of the 3rd Intern. Workshop on Neutrino Telescopes.* 1991. P. 235–245.
14. Boliev M. M., Butkevich A. V., Chudakov A. E., Mikheyev S. P., Suvorova O. V., Zakidyshev V. N. // *Proc. of the 24th ICRC.* Roma, 1995. V. 1. P. 686–689.
15. Волкова Л. В. // *ЯФ.* 1980. Т. 31. С. 784–794.