

УДК 524.1

ПОИСК ДИФFUЗНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ TUNKA-GRANDE

© 2019 г. Р. Д. Монхоев^{1, *}, Н. М. Буднев¹, Д. М. Воронин¹, А. Р. Гафаров¹, О. А. Гресс¹,
Т. И. Гресс¹, А. Н. Дячок¹, А. В. Загородников¹, В. Л. Зурбанов¹, Н. Н. Калмыков²,
Ю. А. Казарина¹, С. Н. Кирюхин¹, Е. Е. Коростелева², В. А. Кожин², Л. А. Кузьмичев^{1, 2},
Б. К. Лубсандоржиев³, Н. Б. Лубсандоржиев², Р. Р. Миргазов¹, Э. А. Осипова², А. Л. Пахоруков¹,
М. И. Панасюк², Л. В. Паньков¹, В. А. Полещук¹, Е. Г. Попова², В. В. Просин², В. С. Птускин⁴,
А. А. Пушкин¹, Ю. А. Семеней¹, Л. Г. Свешникова², А. А. Силаев², А. А. Силаев (мл.)²,
А. В. Скурихин², В. П. Сулаков², В. А. Таболенко¹, А. Чиавасса⁵, К. Шпиринг⁶

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Иркутский государственный университет”, Научно-исследовательский институт прикладной физики,
Иркутск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований
Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук”, Москва, Россия

⁵Туринский университет, Турин, Италия

⁶Немецкий электронный синхротрон (DESY), Гамбург, Германия

*E-mail: makaay08@rambler.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Установка Tunka-Grande входит в состав единого экспериментального комплекса, расположенного в Тункинской долине (Республика Бурятия, Россия) в 50 км от озера Байкал. Данный комплекс также включает в себя установку Tunka-133 и установку Tunka-Rex. Задачей совместной работы установок является изучение энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в диапазоне энергий 10^{16} – 10^{18} эВ, а также поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий $5 \cdot 10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$ эВ. Приведено описание сцинтилляционной установки, метода реконструкции параметров ШАЛ и предварительный результат по поиску диффузного гамма-излучения с энергией свыше $5 \cdot 10^{16}$ эВ.

DOI: 10.1134/S0367676519080301

ВВЕДЕНИЕ

Изучение космических лучей (КЛ) высоких и сверхвысоких энергий представляет большой интерес с точки зрения понимания механизмов и природы их происхождения, что является важнейшей задачей современной астрофизики. Регистрация такого высокоэнергетического излучения осуществляется при помощи единственно возможного на данный момент метода, основанного на свойстве первичных частиц порождать каскад вторичных частиц в земной атмосфере, так называемый широкий атмосферный ливень

(ШАЛ). Подавляющую часть КЛ составляют первичные ядра, однако значительное внимание уделяется также и поиску первичных гамма-квантов. Но несмотря на более чем полувековую историю работы в этом направлении, не было обнаружено астрофизических фотонов с энергией свыше 10^{14} эВ, и в настоящее время установлены лишь ограничения на их поток по многочисленным экспериментальным данным. В диапазоне энергий порядка $3 \cdot 10^{14}$ – $5 \cdot 10^{16}$ эВ существенный вклад в исследования внесли установки EAS-TOP [1], CASA-MIA [2] и KASCADE [3]; в диапазоне

около $10^{16}-3 \cdot 10^{17}$ эВ – установки EAS-MSU [4] и KASCADE-Grande [3], а при энергиях более 10^{18} эВ – установки Haverah Park [5], AGASA [6], Yakutsk [7], Pierre Auger [8] и Telescope Array [9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В конце 2015 г. была введена в эксплуатацию сцинтилляционная установка Tunka-Grande [10], входящая в состав гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy) [11]. Задачей является изучение энергетического спектра и массового состава космических лучей в области энергий $10^{16}-10^{18}$ эВ совместно с установками Тунка-133 [12] и Tunka-Rex [13], а также поиск диффузного гамма-излучения в области энергий $5 \cdot 10^{16}-5 \cdot 10^{17}$ эВ.

Tunka-Grande представляет собой массив сцинтилляционных счетчиков, объединенных в 19 станций на площади 1 км^2 , каждую из которых условно можно представить в виде 2 частей: наземной и подземной. Первая, состоящая из 12 счетчиков общей площадью около 8 м^2 , регистрирует все заряженные частицы ШАЛ на уровне установки, вторая, состоящая из 8 счетчиков общей площадью порядка 5 м^2 , расположена под слоем грунта 1.5 м и предназначена для выделения мюонной компоненты ШАЛ. Обе части находятся в непосредственной близости друг к другу.

Счетчик состоит из дюралюминиевого кожуха в виде усеченной пирамиды, внутренняя поверхность которого покрыта тонким диффузно-отражающим слоем белой эмали. В кожухе размещаются пластиковый сцинтиллятор NE102A, имеющий форму плоской пластины размером $800 \times 800 \times 40 \text{ мм}$, и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) Philips XP-3462. Ранее данные счетчики также успешно использовались в экспериментах KASCADE-Grande и EAS-TOP.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СОБЫТИЙ

Под восстановлением зарегистрированных событий понимается определение таких параметров как: координаты положения оси ШАЛ в плоскости установки x и y : зенитный и азимутальный углы прихода ШАЛ θ и ϕ ; полное число заряженных частиц N_e и N_μ ; параметра возраста ШАЛ s ; плотность частиц на характерном расстоянии 200 м от оси ШАЛ ρ_{200} и энергия первичной частицы – E_0 .

В качестве функции пространственного распределения (ФПР) электронов используется функция с параметром s , зависящим от расстояния:

$$\rho_e(r) = N_e C_{norm} \left(\frac{r}{R_m} \right)^{s(r)-2} \left(1 + \frac{r}{R_m} \right)^{s(r)-4.5}, \quad (1)$$

где C_{norm} – нормировочный коэффициент, $R_m = 80 \text{ м}$, $s(r) = s_0 + \alpha(r)$ [14].

В качестве ФПР мюонов используется функция Грейзена, параметры которой определяются по данным расчетов:

$$\rho_\mu(r) = N_\mu C_{norm} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-a} \left(1 + \frac{r}{R_0} \right)^{-b}, \quad (2)$$

где $R_0 = 180 \text{ м}$, $a = 0.61$, b варьируется со средним значением 2.6 и $\sigma(b) = 0.3$.

Более детальное описание моделирования и процесса обработки событий изложено в работе [15].

Энергия первичной частицы определяется через параметр ρ_{200} следующим выражением:

$$\lg(E_0, \text{эВ}) = \lg(\rho_{200}) \cdot 0.81 + 16.34, \quad (3)$$

Данное соотношение получено из сравнения восстановленных параметров совместных событий экспериментальных данных установок Tunka-Grande и Тунка-133 за время работы порядка 176 ч .

ОГРАНИЧЕНИЕ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОТОК ГАММА-КВАНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОТОКА КЛ

Одним из наиболее перспективных подходов к выделению событий от первичных гамма-квантов из фона КЛ является изучение мюонной компоненты ШАЛ, так как число мюонов в ливне, порожденном гамма-квантом, на порядок меньше, чем в адронном ливне. Поэтому основная идея настоящей работы заключается в поиске безмюонных событий, либо событий, обедненных мюонами, что в свою очередь требует проведения Монте-Карло моделирования ШАЛ и отбора экспериментальных данных с последующим их сравнением. С этой целью для наземных и подземных частей сцинтилляционных станций были сгенерированы ливни от следующих первичных частиц: гамма-квант, протон и ядро железа. Розыгрыш проводился для 4 значений энергии: $\lg(E_0, \text{эВ}) = 16.75, 17, 17.25, 17.5$ и для 3 значений зенитного угла: $\theta = 0^\circ, 30^\circ$ и 45° . В каждом отдельном случае всего было смоделировано 1000 ливней. В качестве программного обеспечения был выбран пакет CORSIKA (Version 7.6300). Расчет адронных взаимодействий при низких энергиях проводился в рамках модели GHEISHA, высокоэнергетические взаимодействия были обработаны при помощи модели QGSJET-II-04.

Отбор событий экспериментальных данных включает в себя такие критерии: все станции во время наблюдений должны находиться в исправном состоянии, восстановленный зенитный угол $\leq 45^\circ$, расстояние между восстановленным положением оси ШАЛ и центром установки $< 400 \text{ м}$,

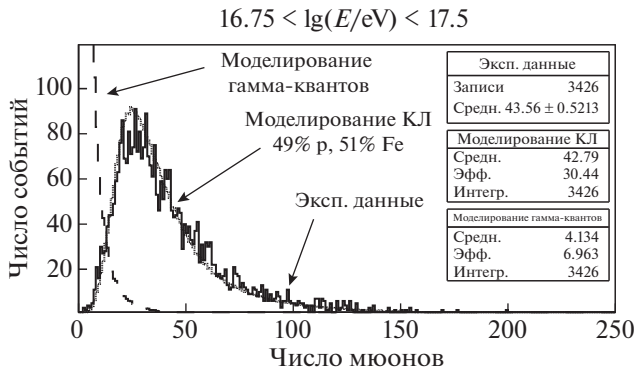


Рис. 1. Сравнение моделированных и экспериментальных данных.

восстановленная энергия первичной частицы $lg(E_0, \text{эВ}) \geq 16.75$. При этом общее время работы установки составило 4421 ч и было отобрано 3552 события.

На рис. 1 представлено сравнение числа зарегистрированных установкой мюонов для моделированных и экспериментальных данных. Первичный состав моделированных КЛ (49% протонов и 51% ядер железа) выбран по результатам работы установки Тунка-133 [16].

При анализе экспериментальных данных максимально возможное количество зарегистрированных мюонов для кандидатов в фотонные ШАЛ при $lg(E_0, \text{эВ}) \geq 16.75$ было установлено на уровне 1 частицы, при $lg(E_0, \text{эВ}) \geq 17$ на уровне 3 и при $lg(E_0, \text{эВ}) \geq 17.25$ на уровне 6. Однако в этих условиях не обнаружено ни одного события.

Ограничение на поток гамма-квантов относительно потока КЛ определяется выражением [2]:

$$\frac{I_\gamma}{I_{CR}} < \frac{N_{90}}{N_{tot} \epsilon_\gamma} \left(\frac{E_{CR}}{E_\gamma} \right)^{-\beta+1}, \quad (4)$$

где N_{tot} – общее количество событий, N_{90} – верхний предел на число зарегистрированных событий при уровне достоверности 90%, определяемый по методу Фельдмана–Казинса [17], E_{CR} и E_γ – средняя энергия КЛ и гамма-квантов, ϵ_γ – эффективность регистрации событий от гамма-квантов, β – спектральный индекс интегрального потока КЛ.

Полученные ограничения в сравнении с результатами экспериментов KASCADE-Grande, KASCADE и CASA-MIA показаны на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты ограничения на поток диффузного гамма-излучения по данным

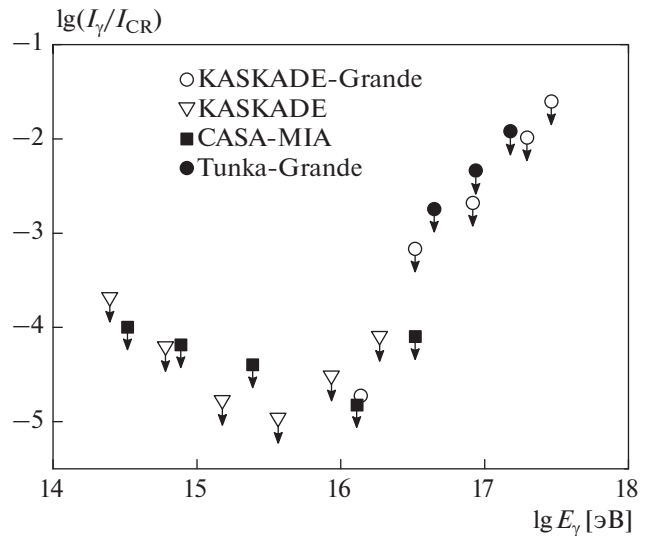


Рис. 2. Доля потока гамма-квантов относительно потока КЛ.

установки Tunka-Grande заведомо хуже ограничений, полученных по данным экспериментов EAS-MSU и KASCADE-Grande вследствие относительно малого времени работы, однако установка обладает большим потенциалом и в ближайшие годы верхние пределы на поток в диапазоне энергий $5 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{17}$ эВ будут значительно улучшены.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (гос. задания 3.9678.2017/БЧ, 3.904.2017/ПЧ, 3.6787.2017/ИТР, 1.6790.2017/ИТР) и РФФИ (проекты №№ 16-02-00738, 17-02-00905, 18-32-00460). Работа выполнена с использованием оборудования ТАЦКП в рамках выполнения соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор RFMEFI59317X0005). Расчеты выполнены на оборудовании центра коллективного пользования “Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН” [18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aglietta M., Alessandro B., Antonioli P. et al. // *Astropart. Phys.* 1996. V. 6. P. 71.
2. Chantell M.C., Covault C.E., Cronin J.W. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 79. P. 1805.
3. Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C., Bekk K. et al. // *Astrophys. J.* 2017. V. 848. P. 1.
4. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Karpikov I.S. et al. // *Phys. Rev. D.* 2017. V. 95. Art. № 123011.
5. Ave M., Hinton J.A., Vazquezet R.A. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. P. 2244.
6. Shinozaki K., Chikawa M., Fukushima M. et al. // *Astrophys. J.* 2002. V. 57. P. L117.

7. *Glushkov A.V., Gorbunov D.S., Makarov I.T. et al.* // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. Art. № 041101.
8. *Bleve C.* // Proc. 34th ICRC. (Hague, 2015). P. 1103.
9. *Rubtsov G.I., Fukushima M., Ivanov D. et al.* // Proc. 34th ICRC. (Hague, 2015). P. 331.
10. *Monkhoev R.D., Budnev N.M., Chiavassa A. et al.* // JINST. 2017. V. 12. P. 06019.
11. *Kuzmichev L.A., Astapov I.I., Bezyazeev P.A. et al.* // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. P. 497.
12. *Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al.* // EPJ Web Conf. 2016. V. 121. Art. № 03004.
13. *Schröder F.G., Bezyazeev P.A., Budnev N.M. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 824. P. 652.
14. *Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Сулаков В.П., Фомин Ю.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 695; *Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Sulakov V.P., Fomin Yu.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. P. 626.
15. *Буднев Н.М., Иванова А.Л., Калмыков Н.Н. и др.* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2014. № 4. С. 80; *Budnev N.M., Ivanova A.L., Kalmykov N.N. et al.* // Moscow Univ. Phys. Bull. 2014. № 4. P. 357.
16. *Berezhnev S.F., Besson D., Budnev N.M. et al.* // Proc. 32nd ICRC. (Beijing, 2011). V. 1. P. 209.
17. *Feldman G.J., Cousins R.D.* // Phys. Rev. D. 1998. V. 57. P. 3873.
18. <http://hpc.icc.ru>.