Письма в ЖЭТФ, том 99, вып. 8, с. 501 – 504

Переоценка энергии ШАЛ на якутской установке с помощью кода CORSIKA

А. В. Глушков[1)], М. И. Правдин, А. В. Сабуров

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Шафера СО РАН, 677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 17 марта 2014 г.

Рассчитаны отклики наземных и подземных мюонных сцинтилляционных детекторов якутской установки ШАЛ (широких атомарных ливней) от первичных частиц с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ по моделям QGSjet-01-d, QGSjet–II-04, SIBILL и EPOS-LHC в рамках пакета программ CORSIKA. Дана новая оценка E_0, которая стала в ≈ 1.41 раза меньше по сравнению с ранее использованным методом каллориметрирования ШАЛ.

DOI: 10.7868/S0370274X14080025

1. Введение. Энергетический спектр космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{17}$ эВ) является одним из главных звеньев в цепи сложных проблем понимания природы первичных частиц с такой энергией. Энергетические спектры, полученные на разных установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) [1–6], отличаются друг от друга по абсолютной интенсивности почти в 2 раза, но близки по форме [7]. Данная ситуация во многом объясняется тем фактом, что большинство крупнейших мировых установок в силу разных способов регистрации ШАЛ использует разные методы определения энергии первичных частиц E_0. Здесь не обойтись без теоретических представлений о развитии ШАЛ.

Якутская установка выделяется среди других наиболее крупных установок своей комплексностью: одновременным измерением всех частиц ШАЛ наземными сцинтилляционными детекторами площадью 2 м^2, мюонов с порогом выше $1.0 \cdot \sec\theta$ ГэВ аналогичными подземными детекторами и черенковского излучения ШАЛ. Черенковская компонента содержит в себе информацию о $\approx 80\,\%$ первичной энергии, рассеянной ливнем в атмосфере, и дает возможность определить E_0 калориметрическим методом [8–11]. Впервые такой метод был применен в [12] при энергиях $\sim 10^{15}$ эВ. На якутской установке он осуществлен в области энергий $E_0 \approx (1.5-50) \cdot 10^{17}$ эВ и зенитных углов $\theta \leq 45°$ [8]:

$$E_0 = (4.1 \pm 1.4) \cdot 10^{17} [\rho_{s,600}(0°)]^{0.97 \pm 0.04} \ [\text{эВ}], \quad (1)$$

$$\rho_{s,600}(0°) = \rho_{s,600}(\theta) \exp[(\sec\theta - 1) \cdot 1020/\lambda_\rho] \ [\text{м}^{-2}], \quad (2)$$

$$\lambda_\rho = 400 \pm 45 \ [\text{г/см}^2], \quad (3)$$

где $\rho_{s,600}(\theta)$ – плотность частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии $R = 600$ м от оси ливня. Позже соотношения (1) и (3) несколько видоизменились [9–11]:

$$E_0 = (4.8 \pm 1.6) \cdot 10^{17} [\rho_{s,600}(0°)]^{1.0 \pm 0.02} \ [\text{эВ}], \quad (4)$$

$$\lambda_\rho = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \cdot \lg[\rho_{s,600}(0°)] \ [\text{г/см}^2]. \quad (5)$$

Оцениваемый по формуле (4) энергетический спектр КЛ оказался по интенсивности существенно выше всех мировых данных (см., например, [13]). Ниже мы рассматриваем энергетическую калибровку ливней на базе современных программ CORSIKA [14].

2. Полученные результаты. На якутской установке основные параметры ШАЛ (направление прихода, координаты оси, первичная энергия) определяются с помощью функции пространственного распределения (ФПР) всех частиц (электронов, мюонов и высокоэнергичных фотонов), регистрируемых наземными сцинтилляционными детекторами. Эти частицы проходят через многослойный экран из снега, железа, дерева и дюраля (общая толщина ≈ 2.5 г/см^2), а затем через сцинтиллятор толщиной 5 см (плотность 1.06 г/см^3), в котором они вызывают определенное энерговыделение $\Delta E_s(R)$. Последнее пропорционально числу прошедших через детектор частиц. На практике $\Delta E_s(R)$ измеряется в условных единицах:

$$\rho_s(R) = \Delta E_s(R)/E_1 \ [\text{м}^{-2}], \quad (6)$$

где $E_1 = 11.75$ МэВ – энергия, выделяемая в наземном детекторе при прохождении через него одного вертикального релятивистского мюона (единичный отклик).

[1)]e-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

Сцинтилляционные детекторы калибруются и контролируются с помощью амплитудных спектров плотностей от фоновых космических частиц [15]. При этом используются интегральные спектры двух видов. Первый из них – спектр от одного из детекторов, который управляется соседним детектором, находящимся в той же станции (спектр "двойных совпадений" с частотой $\approx (2{-}3)\,\text{с}^{-1}$). Второй – спектр без управления с частотой $\sim 200\,\text{с}^{-1}$. Он используется для калибровки мюонных детекторов. Оба спектра имеют степенной вид:

$$F(>\rho) \sim \rho^{-\eta} \sim U^{-\eta}, \tag{7}$$

где $\eta = 1.7$ и 3.1 в первом и во втором случаях соответственно; $\rho = U/U_1$ – плотность частиц в единицах амплитуды сигнала U_1 эталонного детектора от вертикальных релятивистских космических мюонов. Процедура калибровки и контроля заключается в постоянном наблюдении за величиной U_1 всех детекторов путем периодических измерений их спектров плотностей. Делается это один раз за двое суток. При этом спектры двойных совпадений снимаются 2 ч, а спектры без управления – 30 мин.

Мы вычислили ФПР откликов по моделям QGSjet-01-d [16] и QGSjet-II-04 [17], SIBYLL-2.1 [18], EPOS-LHC [19] для первичных протонов и ядер железа в диапазоне энергий $10^{17.0}$–$10^{19.5}$ эВ с разными зенитными углами. В качестве модели низких энергий была использована FLUKA [20]. Сначала рассчитывались отклики $u_k(E,\theta)$ от одиночных частиц k-типа (где k – электрон, мюон или гамма-квант) с энергией E. При этом учитывались все процессы выделения и поглощения энергии в экране и сцинтилляторе и сечения их взаимодействий. Затем развитие ШАЛ в реальной атмосфере оценивалось с помощью кода CORSIKA. Для каждого набора первичных параметров (масса первичной частицы, энергия, зенитный угол) было разыграно по 500 ливней. С целью ускорения расчетов был задействован механизм статистического прореживания (*hinning*) со следующими параметрами: $E_i/E_0 = 10^{-5}$, $w_{\max} = 10^4$. При пересчете в плотность учитывалось число частиц, приходящих на детектор заданной площади. Ливни усреднялись между собой. Вычислялись энергетические спектры $d_k(E,R,\theta)$ всех типов частиц в интервалах расстояний $(\log R_j, \log R_j + 0.04)$. Сигнал (6) определяется суммой откликов:

$$\rho_s(R) = \sum_{k=1}^{3}\sum_{i=1}^{I_k} U_k(E_i,\theta_i)\,d_k(E_i,R,\theta_i), \tag{8}$$

где I_k – число частиц типа k, которые попали в детектор.

На рис. 1 показаны зависимости величины $\log[\rho_{s,600}(0^\circ)/E_0]$ от E_0 для первичных протонов

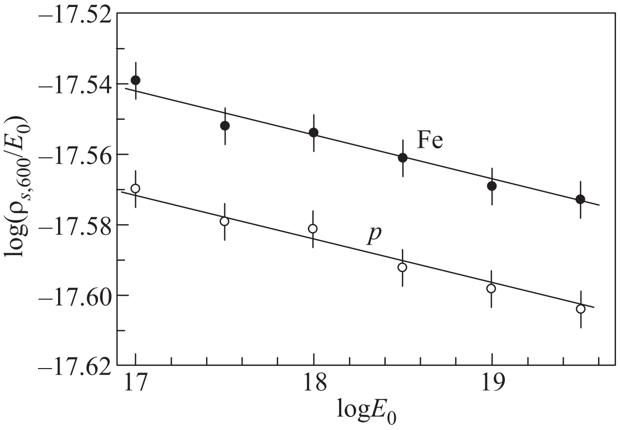

Рис. 1. Зависимости величины $\log[\rho_{s,600}(0^\circ)/E_0]$ от энергии E_0 для первичных протонов (светлые кружки) и ядер железа (темные кружки) в вертикальных ливнях, рассчитанные по модели QGSjet-01-d

(светлые кружки) и ядер железа (темные кружки), рассчитанные по модели QGSjet-01-d. Они удовлетворяют соотношению

$$E_0 = (3.24 \pm 0.1)\cdot 10^{17}[\rho_{s,600}(0^\circ)]^{1.015}\ [\text{эВ}]. \tag{9}$$

Модели же QGSJet-II-04, SIBYLL и EPOS-LHC дают, соответственно,

$$E_0 = (3.52 \pm 0.1)\cdot 10^{17}[\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02}\ [\text{эВ}], \tag{10}$$

$$E_0 = (3.09 \pm 0.1)\cdot 10^{17}[\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.015}\ [\text{эВ}], \tag{11}$$

$$E_0 = (3.74 \pm 0.1)\cdot 10^{17}[\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.02}\ [\text{эВ}]. \tag{12}$$

Усредненная по всем моделям зависимость

$$E_0 = (3.40 \pm 0.18)\cdot 10^{17}[\rho_{s,600}(0^\circ))^{1.017}\ [\text{эВ}] \tag{13}$$

приводит к уменьшению оценки E_0 по сравнению с (1) и (4) в 1.2 и 1.41 раза соответственно. На рис. 2 изображены зенитно-угловые зависимости величины $\log[\rho_{s,600}(\theta)/E_0]$, рассчитанные по модели QGSJet-01-d. Для углов $\theta \le 35^\circ$ они удовлетворяют (2) с $\lambda_\rho = 415 \pm 5\,\text{г/см}^2$ при любых составе и энергии первичных частиц. В остальных случаях пробег поглощения λ_ρ имеет более сложную зависимость.

На рис. 3 приведены энергетические спектры КЛ с $E_0 \ge 10^{17}$ эВ, измеренные на разных установках. Темные кружки и квадраты отвечают данным якутской установки [21], полученным при отборе ШАЛ мастерными треугольниками со сторонами 500 и

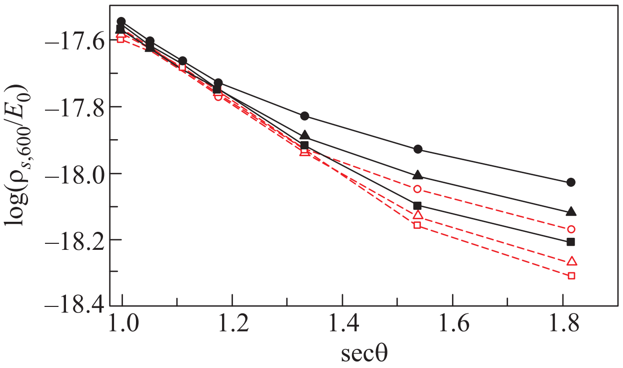

Рис. 2. Зенитно-угловые зависимости величины $\log[\rho_{s,600}(\theta)/E_0]$, рассчитанные по модели QGSJet-01-d для первичных протонов (открытые значки) и ядер железа (закрытые значки) с энергией $E_0 = 10^{17}$ эВ (кружки), 10^{18} эВ (треугольники) и 10^{19} эВ (квадраты)

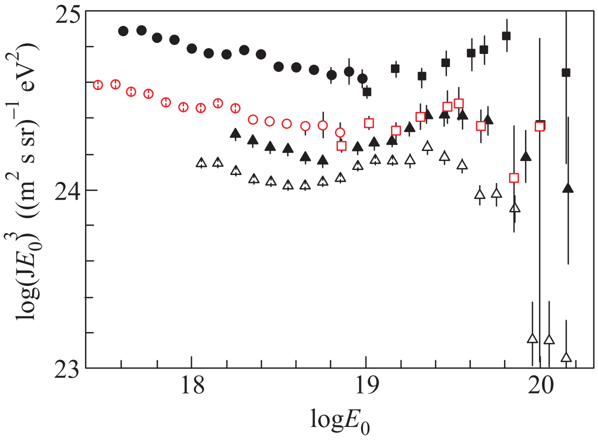

Рис. 3. Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным разных мировых установок. Кружки и квадраты – данные якутской установки [21] (мастерные треугольники со сторонами 500 и 1000 м) с оценкой энергии по формулам (4) и (13) соответственно. Темные и светлые треугольники – данные TA SD [22] и Auger [23] соответственно

1000 м соответственно. Энергия E_0 была найдена с использованием соотношения (4). Светлыми кружками и квадратами представлены те же данные для случая, когда первичная энергия определялась по формуле (13). Темные и светлые треугольники – данные TA SD [22] и Auger [23].

3. Заключение. Расчеты сигнала $\rho_{s,600}$ с использованием кода CORSIKA применительно к якутской установке позволили критически рассмотреть ее энергетическую калибровку, которая длительное время служила предметом дискуссий и разногласий на фоне других мировых установок ШАЛ. Если использовать соотношение (13), то интенсивности спектра первичных частиц, определенные на якутской установке [21] и TA SD [22], согласуются. Указанные выше различия (1) и (4) с (13) возникли из-за завышенной в калориметрическом методе [8–11] доли рассеянной в атмосфере из потока черенковского света ШАЛ первичной энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН по программе “Фундаментальные свойства материи и астрофизики” и гранта РФФИ # 13-02-12036 офим-м-2013.

---

1. D. M. Edge, A. C. Evans, H. J. Garmston, R. J. O. Reid, A. A. Watson, J. G. Wilson, and A. M. Wray, J. Phys. A **6**, 1612 (1973).
2. C. J. Bell et al., Phys. A **7**, 990 (1974).
3. A. V. Glushkov, V. M. Grigoriev, M. N. Dyakonov, T. A. Egorov, V. P. Egorova, A. N. Efimov, N. N. Efimov, N. N. Efremov, A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, A. D. Kresilnikov, I. T. Makarov, V. N. Pavlov, P. D. Petrov, M. I. Pravdin, I. Ye. Sleptsov, and N. I. Sleptsov, in *Proceedings of the 20th ICRC*, M. (1987), v. 5, p. 494.
4. N. Sakaki (for the AGASA Collaboration), in *Proceedings of the 27th ICRC*, Gamburg (2001), v. 1, p. 333.
5. R. U. Abbasi (for the HiRes Experiment), astro-ph/0208301v3 (2002).
6. J. Abraham (for the Pierre Auger Collaboration), arXiv: 1002.1975v1 (2010).
7. А. В. Глушков, М. И. Правдин, Письма в ЖЭТФ **87**, 406 (2008).
8. А. В. Глушков, *Пространственное распределение и полный поток черенковского излучения ШАЛ с первичной энергией* $E_0 \geq 10^{17}$ эВ, дис., НИИЯФ МГУ (1980).
9. А. В. Глушков, М. Н. Дьяконов, Т. А. Егоров, Н. Н. Ефимов, Н. Н. Ефремов, С. П. Кнуренко, В. А. Колосов, И. Т. Макаров, В. Н. Павлов, П. Д. Петров, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов, Изв. АН СССР: Сер. физ. **55**, 713 (1991).
10. T. A. Egorov (for the Yakutsk Collaboration), in *Proceeding of the Tokyo Workshop on Techniques for the Study of Extremely High Energy Cosmic Rays*, Tokyo (1993).
11. A. V. Glushkov, V. P. Egorova, A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, A. D. Krasilnikov, I. T. Makarov, A. A. Mikhailov, V. V. Olzoyev, V. V. Pisarev, M. I. Pravdin, A. V. Sabourov, I. E. Sleptsov, and G. G. Struchkov, in *Proceedings of the 28th ICRC*, Tsukuba (2003), v. 1, p. 393.
12. S. I. Nikolsky, in *Proceedings of the 5th Intern. Seminar on Cosmic Rays*, La Pas (1962), v. 2, p. 48.
13. N. Budnew, D. Chernov, O. Gress, E. Korosteleva, L. Kuzmichev, B. Lubsandorzhiev, G. Navarra, L. Pankov, V. Prosin, Yu. Semeney, C.

Spiering, R. Wischnewski, and I. Yashin, http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.09.006

14. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. FZKA 6019, (Forschungszentrum Karlsruhe, 1988).
15. А. В. Глушков, О. С. Диминштейн, Т. А. Егоров, Н. Н. Ефимов, Л. И. Каганов, Д. Д. Красильников, С. В. Максимов, В. А. Орлов, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов, *Сб. науч. Трудов*, ЯФ СО АН СССР, Якутск (1974), с. 43.
16. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, Nucl. Phys. B-Proc. Suppl. **52**, 17 (1997).
17. S. Ostapchenko, Phys. Rev. D **83**, 014018 (2011).
18. E.-J. Ahn, R. Engel, T. K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Phys. Rev. D **80**, 094003 (2009).
19. T. Pierog, Iu. Karpenko, J.M. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, arXiv:1306.0121 [hep-ph].
20. G. Battistoni, S. Muraro, P. R. Sala, F. Cerutti, A. Ferrari, S. Roesler, and A. Fasso, *J. Ranft. Proc. of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006*, Fermilab 6–8 September 2006, ed. by M. Albrow and R. Raja, AIP Conference Proceeding (2007), v. 896, p. 31.
21. V. P. Egorova, A. V. Glushkov, A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, A. D. Krasilnikov, I. T. Makarov, A. A. Mikhailov, V. V. Olzoev, M. I. Pravdin, A. V. Sabourov, I. Ye. Sleptsov, and G. G. Struchkov, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **136C**, 3 (2004).
22. Y. Tsunesada (for the Telescope Array Collaboration), arXiv: 1111.2507v1 (2011).
23. F. Salamido (for the Pierre Auger Collaboration), 1107.4809 (2011).