

УДК 524.1

СОСТАВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 10^{17} ЭВ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ

© 2019 г. А. В. Глушков¹, М. И. Правдин¹, *, А. В. Сабуров¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований и астрономии имени Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: m.i.pravdin@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Исследовано пространственное распределение каскадных частиц в широких атмосферных ливнях на Якутской установке наземными сцинтилляционными детекторами от космических лучей с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ за период непрерывных наблюдений 1977–2017 гг. Экспериментальные значения сравниваются с расчетными, найденными в рамках разных моделей адронных взаимодействий. В области энергий $(1-20) \times 10^{17}$ эВ наблюдается изменение массового состава космических лучей от $\langle \ln A \rangle \sim 2.5$ к протонному.

DOI: 10.1134/S0367676519080155

ВВЕДЕНИЕ

Массовый состав космических лучей (КЛ) с энергией (E_0) выше 10^{17} эВ до сих пор точно неизвестен, хотя активно исследуется во всем мире на установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) более 40 лет [1]. Для его оценки используются различные параметры ШАЛ, чувствительные к нему. На Якутской установке (ЯУ) это делается с помощью функций пространственного распределения (ФПР) электронной, мюонной и черенковской компонент ШАЛ (см., например, [2–6]). Ключом к решению проблемы состава КЛ служит глубина максимума каскадной кривой ливня (x_m), которая связана с атомным номером (A) первичных частиц хорошо известным соотношением:

$$\langle \ln A \rangle \approx \left(\frac{x_m^p - x_m^{\text{exp}}}{x_m^p - x_m^{\text{Fe}}} \right) \ln 56, \quad (1)$$

где величины x_m получены в эксперименте (exp) и расчетным путем для первичных протонов p и ядер железа Fe. Здесь не обойтись без теоретических представлений о развитии ШАЛ. В [7–9] рассчитаны ФПР откликов наземных сцинтилляционных детекторов (НСД) ЯУ от первичных частиц с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ в рамках моделей адронных взаимодействий QGSjet-01 [10], QGSjet-II-04 [11], SIBYLL-2.1 [12] и EPOS-LHC [13]. Ниже мы сравниваем эти ФПР с экспериментальными данными, полученными за период непрерывных наблюдений 1977–2017 гг.

1. ОТБОР И ОБРАБОТКА ЛИВНЕЙ

В анализ вошли события с зенитными углами $\theta \leq 25.8^\circ$ ($\langle \cos \theta \rangle \approx 0.90$). Для построения ФПР были использованы данные только 13 станций, расположенных в центре установки. Они образуют с центральной станцией 6 мастерных треугольников со сторонами 500 м (малый “мастер” – ММ) и 1000 м (большой “мастер” – БМ). В этих станциях находятся по два сцинтилляционных детектора (2×2 м²), включенных на совпадение. Предварительная энергия первичных частиц в индивидуальных ливнях находилась из экспериментально найденных соотношений [14]:

$$E_0 = (4.8 \pm 1.6) \times 10^{17} s_{600}(0^\circ)^{1.0 \pm 0.02}, \quad \text{эВ}, \quad (2)$$

$$s_{600}(0^\circ) = s_{600}(\theta) \exp((\sec \theta - 1) \times 1020/\lambda), \quad \text{м}^{-2}, \quad (3)$$

где $s_{600}(\theta)$ – плотность всех частиц ШАЛ, измеряемая НСД на расстоянии $r = 600$ м от оси ливня; λ – пробег поглощения. Координаты оси и $s_{600}(\theta)$ находили по функции

$$f_s(r, \theta) = s_{600}(\theta) \left(\frac{600 + r_1}{r + r_1} \right)^a \times \left(\frac{600 + r_M}{r + r_M} \right)^{b-a}, \quad (4)$$

где $a = 1$, $r_1 = 0$, r_M – мольеровский радиус. Он зависит от температуры t (°C) и давления P (мб):

$$r_M \approx \left(7.5 \times 10^4 / P \right) \left((t + 273) / 273 \right) \text{ (м)}. \quad (5)$$

Значение r_M определялось в каждом ливне (средне-сезонные значения для ЯУ $\langle t \rangle \approx -18^\circ\text{C}$ и $\langle r_M \rangle \approx 70$ м). В формуле (4) b – параметр, определенный ранее [15]:

$$b = 1.38 + 2.16 \cos \theta + 0.15 \lg(s_{600}(\theta)). \quad (6)$$

В окончательный анализ вошли ливни, ошибки определения координат оси которых оказались для ММ не хуже 20–30 м, а для БМ – не хуже 50 м. Средние ФПР строились в бинах с шагом $h = \Delta \lg E_0 = 0.2$, которые последовательно сдвигались по энергии на $0.5h$. Это делалось для более детального исследования степени согласия эксперимента с той или иной моделью развития ШАЛ. При построении ФПР плотности частиц в отдельных ливнях умножались на нормировочный коэффициент $\langle E_0 \rangle / E_0$ ($\langle E_0 \rangle$ – средняя энергия в бине) и усреднялись между собой в бинах $\Delta \lg r = 0.04$. Средние плотности частиц находились по формуле

$$\langle \rho_s(r_i) \rangle = (1/N) \sum_{k=1}^N \rho_k(r_i), \quad (7)$$

где N – число показаний детекторов на расстояниях от оси в интервалах $(\lg r_i, \lg r_i + 0.04)$. Полученные ФПР аппроксимировались функцией

$$\rho_s(r, \theta) = f_s(r, \theta) \left((600 + r_2) / (r + r_2) \right)^{10}, \quad (8)$$

где $a = 2$, $r_M = 10$, $r_1 = 8$ и $r_2 = 10^4$ м. Радиус r_M в этой функции стал формальной величиной. В совокупности с другими параметрами аппроксимации (8) он обеспечивает ее наилучшее согласие с плотностями (7) во всем диапазоне расстояний 30–2000 м от оси ливня. Наиболее подходящие значения $s_{600}(\theta)$ и b в индивидуальных группах находились с помощью χ^2 -теста. В построенных таким образом средних ФПР находились окончательные значения энергий по уточненной в [9] методом калориметрирования ШАЛ формуле

$$E_0 = (3.76 \pm 0.3) \times 10^{17} s_{600}(0^\circ)^{1.02 \pm 0.02} \text{ (ЭВ)}. \quad (9)$$

2. МАССОВЫЙ СОСТАВ ПЕРВИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Параметр b характеризует крутизну ФПР, которая чувствительна к массовому составу КЛ. Он показан на рис. 1 темными кружками из соотношения (8). Линиями изображены ожидаемые величины, вычисленные по 4 моделям кода CORSIKA [16]. В расчетах для каждого набора первичных параметров (масса первичной частицы, энергия, зенитный угол) было разыграно по 200 ливней. С целью ускорения расчетов был задействован механизм статистического прореживания. При пересчете в плотность учитывалось число частиц, приходящих на детектор заданной площади.

Все модели, за исключением SIBYLL-2.1, дают близкие между собой результаты и не противоре-

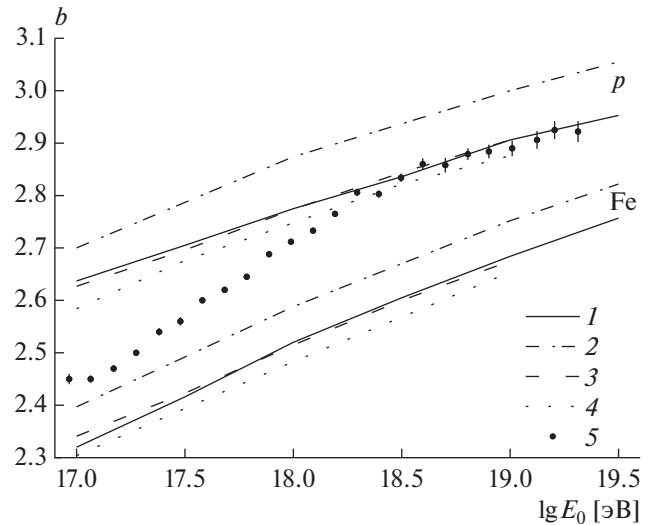


Рис. 1. Параметр наклона ФПР откликов наземных сцинтилляционных детекторов в диапазоне расстояний 30–2000 м от оси в ливнях с $\langle \cos \theta \rangle = 0.90$ и разными первичными энергиями. Линиями обозначены модельные предсказания для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe): 1 – QGSJet-01, 2 – SIBYLL-2.1, 3 – QGSJet-II-04, 4 – EPOS-LHC. Символами (5) обозначены экспериментальные величины.

чат эксперименту. Особенно близки между собой предсказания моделей QGSJet-01 и QGSJet-II-04. Например, при $\langle E_0 \rangle \approx 10^{17}$ ЭВ, соответственно: $b = 2.633 \pm 0.006$ и 2.628 ± 0.008 (для p); $b = 2.319 \pm 0.003$ и 2.353 ± 0.007 (для Fe). Модель EPOS в этом случае дает для p и Fe $b = 2.591 \pm 0.008$ и 2.304 ± 0.007 . Это позволяет оценить массовый состав КЛ, воспользовавшись принципом суперпозиции (1), записав его в виде

$$\langle \ln A \rangle \approx ((b_{\text{exp}} - b_p) / (b_{\text{Fe}} - b_p)) \cdot \ln 56. \quad (10)$$

На рис. 2 приведена оценка массового состава КЛ согласно модели QGSJet-01 в зависимости от E_0 . Эта оценка полностью согласуется с нашим предыдущим результатом [17]. В области $\sim 10^{17}$ ЭВ наш результат согласуется с данными установки Гунка-133 [18]. Там же приведены оценки $\langle \ln A \rangle$, вытекающих из данных Обсерватории им. Пьера Ожэ (РАО) [19] и измерения установки Telescope Array (ТА) [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетние измерения откликов НСД от частиц ШАЛ на ЯУ и их сравнение с расчетными ФПР дали возможность оценить массовый состав КЛ в области энергий $E_0 \approx 10^{17} - 10^{18}$ ЭВ, где статистика не особенно богата экспериментальными данными. На рис. 2 видно быстрое изменение состава КЛ с ростом E_0 в области $(1-30) \times 10^{17}$ ЭВ в сторону легких ядер. Вероятно, это связано с пе-

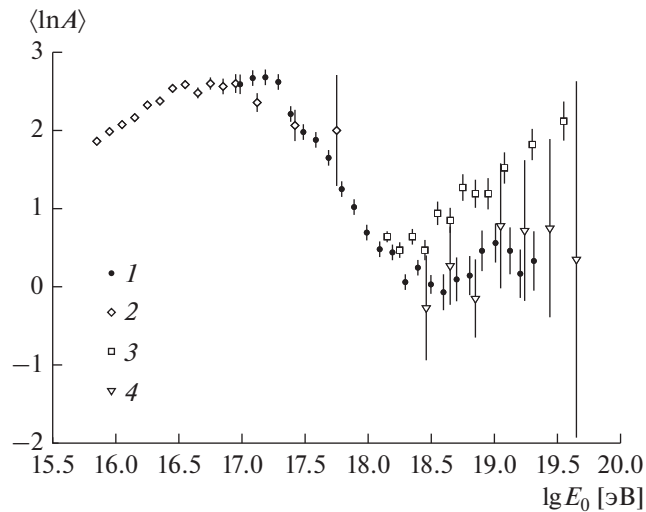


Рис. 2. Зависимости массового состава КЛ от первичной энергии: 1 – полученные на Якутской установке из показателя крутизны ФПР наземных сцинтилляционных детекторов; 2 – оценка установки Тунка-133, полученная в рамках модели QGSJet-II-04 [18]; 3 – РАО; 4 – ТА. Последние две оценки были получены из данных по x_m , опубликованных в [19, 20] соответственно.

реходом от галактических КЛ к внегалактическим. Из наших данных и данных ТА [20] можно предположить, что при $E_0 \geq 3 \times 10^{18}$ эВ первичными частицами являются, в основном, протоны. Однако строго такой вывод сделать пока нельзя. При $E_0 \geq 3 \times 10^{18}$ эВ данные РАО указывают на утяжеление первичных ядер, а в области $E_0 < 8 \times 10^{18}$ эВ они существенно противоречат нашим оценкам и данным установки Тунка-133. Здесь нужны дальнейшие исследования всех заинтересованных участников. Мы планируем продолжить эту работу с привлечением к анализу имеющихся на Якутской установке других экспериментальных данных.

Работа поддержана программой Президиума РАН “Физика высоких энергий и нейтринная астрономия” и грантом РФФИ № 16-29-13019-офи_м. Авторы благодарны всему коллективу Якутской установки ШАЛ, обеспечивающему ее работоспособность уже более 40 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grider P.K.F.* Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects. V. 1. Berlin: Springer, 2010.
2. *Глушков А.В.* Дисс. ... канд. наук. Москва: НИИЯФ МГУ, 1982.
3. *Глушков А.В., Деденко Л.Г., Ефимов Н.Н. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 55. С. 2166.
4. *Глушков А.В., Правдин М.И., Слепцов И.Е. и др.* // ЯФ. 2000. Т. 60. С. 1557.
5. *Глушков А.В., Сабуров А.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. № 9–10. С. 661.
6. *Berezhko E.G., Knurenko S.P., Ksenofontov L.T.* // Astropart. Phys. V. 36. P. 31.
7. *Глушков А.В., Правдин М.И., Сабуров А.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. № 7–8. С. 501.
8. *Glushkov A.V., Pravdin M.I., Sabourov A.* // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. Art. № 012005.
9. *Sabourov A., Glushkov A., Pravdin M. et al.* // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 552.
10. *Kalmykov N.N., Ostapchenko S.S., Pavlov A.I.* // Nucl. Phys. B. 1997. V. 52. P. 17.
11. *Ostapchenko S.* // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. Art. № 014018.
12. *Ahn E.-J., Engel R., Gaisser T.K. et al.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 80. Art. № 094003.
13. *Pierog T., Karpenko Iu., Katzy J.M. et al.* // Phys. Rev. C. 2015. V. 92. Art. № 034906.
14. *Afanasyev B.N., Dyakonov M.N., Egorov T.A. et al.* // Proc. Tokyo Workshop on Techniques for the Study of Extremely High Energy Cosmic Rays. (Tokyo, 1993). P. 35.
15. *Глушков А.В., Диминштейн О.С., Ефимов Н.Н. и др.* Характеристики широких атмосферных ливней космических лучей сверхвысоких энергий. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976. С. 45.
16. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al.* // FZKA-6019. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998. 90 p.
17. *Глушков А.В., Сабуров А.В.* // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С. 793.
18. *Prosin V.V., Berezhnev S.F., Budnev N.M. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 756. P. 94.
19. *Bellido J. (for the Pierre Auger Collaboration)* // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 506.
20. *Tsunetsada Y. (for the Telescop Array Collaboration)* // arXiv: 1111.2507. 2011.