

Массовый состав космических лучей с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ по данным наземных детекторов якутской установки ШАЛ

А. В. Глушков¹⁾, А. В. Сабуров

Институт космических исследований и аэронавтики им. Шафера СО РАН, 677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 7 октября 2014 г.

Исследовано пространственное распределение заряженных частиц, измеренное на якутской установке наземными сцинтилляционными детекторами в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ за период 1977–2013 гг. Экспериментальные значения сравниваются с расчетными, найденными по разным моделям развития ШАЛ из пакета программ CORSIKA. Наилучшее согласие эксперимента и теории наблюдается с моделями QGSJET-01-d и QGSJET-II-04. В области энергий $(1-20) \cdot 10^{17}$ эВ имеет место изменение массового состава космических лучей с $\langle \ln A \rangle$ к чисто протонному.

DOI: 10.7868/S0370274X14230027

1. Введение. Массовый состав космических лучей (КЛ) с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ до сих пор точно не известен, хотя он активно исследуется во всем мире на установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) более 40 лет [1]. Для этого используются различные параметры ШАЛ, чувствительные к массовому составу КЛ. На якутской установке это делается с помощью функций пространственного распределения (ФПР) электронной, мюонной и черенковской компонент ШАЛ (см., например, [2–6]). Ключом к решению проблемы выявления состава КЛ служит глубина максимума каскадной кривой ливня X_m , которая связана с атомным номером A первичных частиц простым соотношением:

$$\ln A = [(X_m^p - X_m^{\text{exp}})/(X_m^p - X_m^{\text{Fe}})] \ln 56, \quad (1)$$

где величины X_m получаются экспериментально (exp) и расчетным путем для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe). Здесь не обойтись без теоретических представлений о развитии ШАЛ. В [7] рассчитаны ФПР откликов наземных сцинтилляционных детекторов якутской установки от первичных частиц с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ по моделям QGSjet-01-d [8], QGSjet-II-04 [9], SIBYLL-2.1 [10] и EPOS-LHC [11] в рамках пакета программ CORSIKA [12]. В качестве модели низких энергий была использована FLUKA [13]. Ниже мы сравниваем эти ФПР с экспериментальными данными, полученными за период непрерывных наблюдений 1977–2013 гг.

2. Полученные результаты и обсуждение. В анализ вошли события с зенитными углами $\theta \leq 25.8^\circ$

($\langle \cos \theta \rangle = 0.95$). Для построения ФПР были использованы данные только 13 станций, расположенных в центре установки. Они образуют с центральной станцией по 6 мастерных треугольников со сторонами 500 м (малый “мастер” – ММ) и 1000 м (большой “мастер” – БМ). В этих станциях находятся по два сцинтилляционных детектора ($2 \times 2 \text{ м}^2$), включенных на совпадение. Энергия первичных частиц находилась согласно [7]:

$$E_0 = (3.4 \pm 0.18) \cdot 10^{17} [\rho_{s,600}(0^\circ)]^{1.0 \pm 0.017} [\text{эВ}], \quad (2)$$

$$\rho_{s,600}(0^\circ) = \rho_{s,600}(\theta) \exp[(\sec \theta - 1) \cdot 1020/\lambda_\rho] [\text{м}^{-2}], \quad (3)$$

$$\lambda_\rho = 415 \pm 5 [\text{г}/\text{см}^2], \quad (4)$$

где $\rho_{s,600}(\theta)$ – плотность всех частиц ШАЛ, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии $r = 600$ м от оси ливня. Соотношение (2) однозначно связывает $\rho_{s,600}(0^\circ)$ и E_0 при любом составе КЛ благодаря тому, что на расстоянии ≈ 600 м от оси ШАЛ ФПР всех заряженных частиц пересекаются между собой. Это видно из рис. 1, где в качестве примера приведены ФПР с $E_0 = 10^{18}$ эВ и $\cos \theta = 0.9$. Координаты оси и $\rho_{s,600}(\theta)$ находились по функции

$$f_s(r, \theta) = \rho_{s,600}(\theta) [(600 + r_1)/(r + r_1)]^a \times \\ \times [(600 + r_M)/(r + r_M)]^{b-a}, \quad (5)$$

где $a = 1$, $r_1 = 0$, r_M – мольеровский радиус. Последний зависит от температуры T и давления P как

$$r_M \approx (7.5 \cdot 10^4/P)(T/273) [\text{м}]. \quad (6)$$

¹⁾e-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

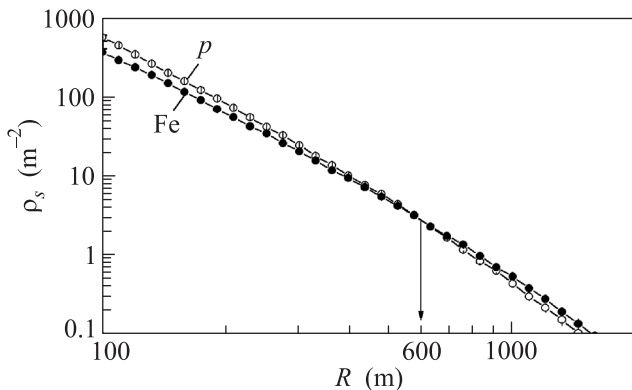


Рис. 1. ФПР заряженных частиц в ливнях с $E_0 = 10^{18}$ эВ и $\cos \theta = 0.9$ для первичных протонов (светлые кружки) и ядер железа (темные кружки), вычисленные по модели QGSJET-II-04. Линии – аппроксимации (9)

Значение r_M определялось в каждом ливне (для Якутска $\langle T \rangle \approx -18^\circ\text{C}$ и $\langle r \rangle_M \approx 70$ м). В формуле (5) b – параметр, определенный ранее [14]:

$$b = 1.38 + 2.16 \cos \theta + 0.15 \lg[\rho_{s,600}(\theta)]. \quad (7)$$

В окончательный анализ вошли ливни, ошибки 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 $\langle E_0 \rangle / E_0$ (где $\langle E_0 \rangle$ – средняя энергия в группе) и усреднялись между собой в бинах, $\Delta \lg(r) = 0.04$. Средние плотности частиц находились по формуле

$$\langle \rho_s(r_i) \rangle = \left[\sum_{k=1}^N \rho_k(r_i) \right] / N, \quad (8)$$

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

$$\rho_s(r, \theta) = f_s(r, \theta) [(600 + r_2)/(r + r_2)]^{12}, \quad (9)$$

где $a = 2$, $r_M = 10$, $r_1 = 8$ и $r_2 = 10^4$ м. Радиус r_M здесь стал формальной величиной. В совокупности с другими параметрами аппроксимации (9) он обеспечивает ее наилучшее согласие с плотностями (8) во всем диапазоне расстояний 20–2000 м от оси ливня. Наиболее подходящие значения $\rho_{s,600}(\theta)$ и b в индивидуальных группах находились методом наименьших квадратов с помощью χ^2 -теста.

Параметр b характеризует крутизну ФПР, которая чувствительна к массовому составу КЛ. На рис. 2 показан локальный наклон ФПР

$$n_s(100-400) = [\lg \rho_s(100) - \lg \rho_s(400)] / \lg(400/100) \quad (10)$$

в диапазоне расстояний 100–400 м, близкий по величине к b , но реально измеряемый при всех энергиях. Плотности частиц на других расстояниях от оси ШАЛ при вычислении (9) не рассматривались.

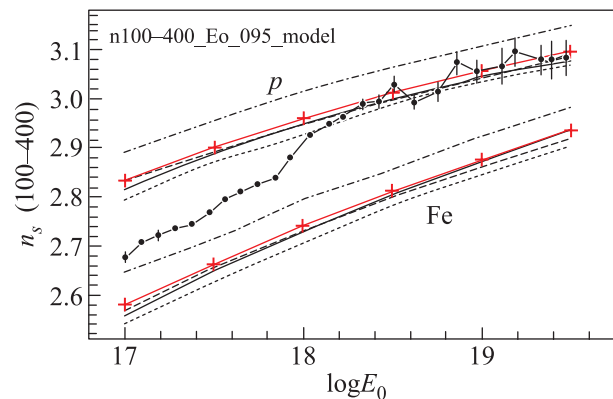


Рис. 2. Локальный наклон ФПР откликов наземных сцинтилляционных детекторов в диапазоне расстояний 100–400 м от оси в ливнях с $\langle \cos \theta \rangle = 0.95$ и разными первичными энергиями. Сплошные, штриховые, пунктирные и штрихпунктирные линии – расчеты по моделям QGSJET-01-d, QGSJET-II-04, EPOS-LHC и SIBYLL-2.1 для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe) соответственно. Крестики – усредненная по всем моделям зависимость. Кружки – экспериментальные величины

Линиями показаны ожидаемые величины, вычисленные по 4 моделям кода CORSIKA [12]. 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 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.

Крестиками на рис. 2 показана усредненная по всем моделям зависимость. Она оказалась ближе всего к моделям QGSJET-01-d и QGSJET-II-04. Эта зависимость позволяет оценить массовый состав первичных частиц с помощью соотношения

$$\langle \ln A \rangle = W_p \ln(1) + W_{\text{Fe}} \ln(56). \quad (11)$$

Здесь $W_p = 1 - W_{\text{Fe}}$, $W_{\text{Fe}} = \langle \ln A \rangle / \ln(56)$. В рамках этого подхода имеем

$$W_{\text{Fe}} = (d_{\text{exp}} - d_p) / (d_{\text{Fe}} - d_p), \quad (12)$$

где $d = n_s(100-400)$ – величины, полученные на эксперименте (exp) и расчетным путем.

На рис. 3 приведены зависимости массового состава КЛ от первичной энергии, полученные на раз-

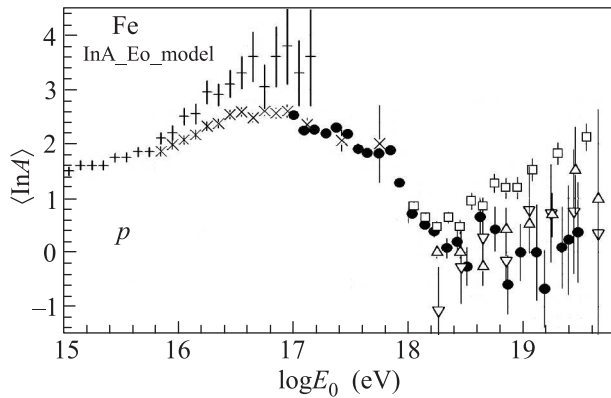


Рис. 3. Зависимости массового состава КЛ от первичной энергии, полученные на разных установках ШАЛ. Темные кружки – наши оценки. Крестики – KASCADE [15]. Косые крестики – Тунка-133 [16]. Квадраты – РАО [17]. Треугольники – HiRes [18]. Перевернутые треугольники – ТА [19]

ных установках ШАЛ. Темные кружки – наши оценки из соотношений (11) и (12) для усредненной модельной зависимости с рис. 2. Крестики – результаты KASCADE за период наблюдений с мая 1998 г. по декабрь 1999 г. [15]. Косыми крестиками показаны данные установки Тунка-133, полученные из ФПР черенковского излучения ШАЛ [16]. Светлые квадраты – данные РАО [17]. Прямые и перевернутые треугольники – измерения HiRes [18] и ТА [19]. Три последних результата получены нами из приведенных в [17–19] значений X_m по усредненным зависимостям $\langle X_m(E_0) \rangle$ для рассмотренных выше четырех моделей развития ШАЛ. Все результаты грубо согласуются между собой, за исключением оценок $\langle \ln A \rangle$ при $E_0 \geq 2 \cdot 10^{18}$ эВ, вытекающих из данных РАО [17].

3. Заключение. Многолетние измерения откликов наземных сцинтилляционных детекторов от частиц ШАЛ на якутской установке и их сравнение (рис. 2) с расчетными ФПР [7] дали возможность оценить массовый состав КЛ в области энергий $E_0 \approx (10^{17} - 10^{18})$ эВ, где экспериментальных данных пока мало. На рис. 3 прослеживается быстрое изменение состава КЛ с ростом первичной энергии в области $(1-20) \cdot 10^{17}$ эВ в сторону легких ядер. Веро-

ятно, это связано с переходом от галактических КЛ к внегалактическим. Можно предположить, что при $E_0 \geq 2 \cdot 10^{18}$ эВ первичными частицами являются лишь одни протоны. Однако строго такой вывод сделать пока нельзя. Здесь нужны дальнейшие исследования, которые мы и планируем проводить.

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН по программе “Фундаментальные свойства материи и астрофизики”, гранта РФФИ #13-02-12036 офим-м-2013, а также гранта Президента Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов. Часть расчетов была проведена на суперкомпьютере “Ариан Кузьмин” Северо-Восточного федерального университета (г. Якутск).

1. P. K. F. Grider, *Extensive Air Showers*, Springer (2010), v. 1.
2. А. В. Глушков, *Пространственное распределение и полный поток черенковского излучения ШАЛ с первичной энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ*, диссертация, НИИЯФ МГУ (1982).
3. А. В. Глушков, Л. Г. Деденко, Н. Н. Ефимов, Н. Н. Ефремов, И. Т. Макаров, П. Д. Петров, М. И. Правдин, *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **55**, 2166 (1986).
4. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов, В. Р. Слещова, Н. Н. Калмыков, *ЯФ* **60**, 1557 (2000).
5. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, *Письма в ЖЭТФ* **98**, 655 (2013).
6. E. G. Berezhko, S. P. Knurenko, and L. T. Ksenofontov, *Astrop. Phys.* **36**, 31 (2013).
7. А. В. Глушков, М. И. Правдин, А. В. Сабуров, *Письма в ЖЭТФ* **99**, 501 (2014).
8. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, *Nucl. Phys. B: Proc. Supp.* **52**, 17 (1997).
9. S. Ostapchenko, *Phys. Rev. D* **83**, 014018 (2011).
10. E.-J. Ahn, R. Engel, T. K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, *Phys. Rev. D* **80**, 094003 (2009).
11. T. Pierog, Iu. Karpenko, J. M. Katzy, E. Yatsenko, and K. Werner, arXiv:1306.0121 [hep-ph].
12. A. V. Glushkov, V. M. Grigoriev, N. N. Efimov, M. I. Pravdin, O. S. Diminstein, and V. F. Sakurov, *Proc. 16th ICRC* **8**, 158 (1979).
13. 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).
14. А. В. Глушков, О. С. Диминштейн, Н. Н. Ефимов, Л. И. Каганов, М. И. Правдин, *Сб. науч. Трудов, ЯФ СО АН СССР, Якутск* (1976), с. 45.

15. H. Ulrich (the KASCADE collaboration), Proc. 27th ICRC **2**, 97 (2001).
16. N. Budnew, D. Chernov, O. Gress, E. Korosteleva, L. Kuzmichev, B. Lubsandorzhev, G. Navarra, L. Pankov, V. Prosin, Yu. Semeny, C. Spiering, R. Wischnewski, and I. Yashin, <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.09.006>.
17. S. Andringa (for the Pierre Auger Collaboration), 1005.3795v1 (2010).
18. R. Abbasi (for the HiRes Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104**, 161101 (2010).
19. Y. Tsunesada (for the Telescop Array Collaboration), 1111.2507v1 (2011).