

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

А. В. Глушков¹⁾, А. В. Сабуров

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

Поступила в редакцию 19 сентября 2013 г.

После переработки 7 октября 2013 г.

Исследовано пространственное распределение мюонов с порогом $E_\mu \approx 1.0 \text{sec}\theta \text{ГэВ}$ (где θ – зенитный угол) в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с энергией $E_0 \approx 10^{17-19}$ эВ в разные периоды наблюдений с ноября 1987 г. по июнь 2013 г. Экспериментальные значения сравниваются с расчетными, выполненными по разным моделям развития ШАЛ из пакета программ CORSIKA. Наилучшее согласие эксперимента и теории наблюдается с моделью QGSJET II-04. До 1996 г. массовый состав космических лучей с $E_0 < 2 \cdot 10^{18}$ эВ был существенно легче, чем в более поздний период времени.

DOI: 10.7868/S0370274X13220025

1. Введение. Космические лучи (КЛ) сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{15}$ эВ) все еще остаются загадочными, хотя исследуются во всем мире на установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) уже более 50 лет. До сих пор точно не известен их массовый состав, без знания которого трудно понять характер ядерных взаимодействий в этой области энергий. Мюоны с энергиями $\sim 0.5-1.0$ ГэВ являются очень важной компонентой ШАЛ. Они слабо поглощаются в атмосфере, чувствительны к характеристикам ядерных взаимодействий в процессе развития ШАЛ, а также к массовому составу КЛ. Количество и пространственное распределение мюонов указанных энергий позволяют регистрировать их установками с большими расстояниями между детекторами. На якутской установке ШАЛ мюоны с пороговой энергией $E_\mu \approx 1.0 \text{sec}\theta \text{ГэВ}$ (где θ – зенитный угол) регистрируются непрерывно с 1978 г. За это время накоплен большой экспериментальный материал. Его анализ показал [1–6], что ШАЛ с $E_0 \geq (3-5) \cdot 10^{18}$ эВ развиваются существенно иначе, чем в области меньших энергий КЛ. В работе [7] дана оценка доли первичных гамма-квантов в общем потоке КЛ с $E_0 \geq 10^{18}$ эВ.

Недавно мы показали [8], что доли мюонов от полного числа заряженных частиц в ШАЛ с энергией $E_0 \approx (10^{17}-10^{18})$ эВ заметно отличаются в разные периоды времени. До 1996 г. их доля варьировалась возле одного устойчивого положения, а затем существенно увеличилась. Это сопровождалось одновременными изменениями энергетического спек-

тра и глобальной анизотропии КЛ в области энергий $(1-10) \cdot 10^{17}$ эВ [8, 9]. После 1996 г. интегральная интенсивность КЛ при $E_0 = 10^{17}$ эВ увеличилась за 7 лет на $45 \pm 5\%$, а затем начала падать. Фаза первой гармоники $\varphi_1 = 119^\circ \pm 18^\circ$ и ее амплитуда $A_1 = 0.030 \pm 0.014$ в выборках 1983–1994 гг. сменились в 1998–2010 гг. на величины $\varphi_1 = 284^\circ \pm 13^\circ$ и $A_1 = 0.033 \pm 0.010$. В последние несколько лет наметилась тенденция к изменению всех величин в обратную сторону. Это похоже на проявление какого-то гигантского взрыва, который привнес дополнительно к фону заметную долю тяжелых ядер. Пока трудно сказать, какие события в Галактике привели к такому результату. Здесь нужны дальнейшие исследования с учетом временного фактора получения экспериментальных данных. В настоящей работе приведены оценки среднего массового состава КЛ, полученные из анализа данных по мюонам с порогом $E_\mu \approx 1.0 \text{sec}\theta \text{ГэВ}$ за разные периоды работы с 1987 г. по июнь 2013 г. Геометрия размещения функционирующих мюонных детекторов показана на рис. 1. Методика их калибровки и контроля их работы описана в [8]. Данные детектора с порогом $E_\mu \approx 0.5 \text{sec}\theta \text{ГэВ}$ [10] находятся сейчас в стадии накопления статистики и будут проанализированы позже.

2. Полученные результаты. Ниже рассмотрены ШАЛ с зенитными углами $\theta \leq 45^\circ$, оси которых попали в центральный круг установки с радиусом 1 км и были найдены с точностью не хуже 20 м. Энергия первичных частиц находилась из соотношений

$$E_0 = (4.8 \pm 1.6) \cdot 10^{17} [\rho_{s,600}(0^\circ)]^{1.0 \pm 0.02} \text{эВ}, \quad (1)$$

¹⁾e-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

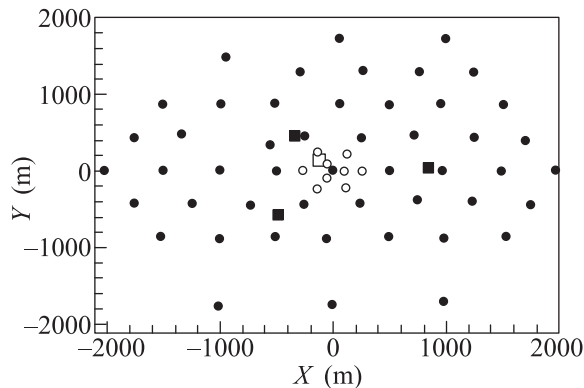


Рис. 1. Схема расположения детекторов на установке ШАЛ с 1992 г.: темные кружки – основные наземные сцинтилляционные детекторы ($2 \times 2 \text{ м}^2$); светлые кружки – дополнительные наземные сцинтилляционные детекторы (2 м^2); темные квадраты – мюонные подземные детекторы площадью $10 \times 2 \text{ м}^2$ с порогом $1.0 \text{ sec} \theta$ ГэВ; светлый квадрат – мюонный подземный детектор площадью $27 \times 2 \text{ м}^2$ с порогом $0.5 \text{ sec} \theta$ ГэВ. Три нижние станции с мая 2010 г. демонтированы

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

$$\lambda_\rho = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \lg[\rho_{s,600}(0^\circ)] \text{ г/см}^2, \quad (3)$$

где $\rho_{s,600}(\theta)$ – плотность заряженных частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии $R = 600 \text{ м}$ от оси ливня. Точность определения $\rho_{s,600}(\theta)$ в индивидуальных ШАЛ была не хуже 10%. Соотношение (1) однозначно связывает $\rho_{s,600}(0^\circ)$ и E_0 при любом составе КЛ благодаря тому, что на расстоянии $\approx 600 \text{ м}$ от оси ШАЛ функции пространственного распределения (ФПР) всех заряженных частиц пересекаются между собой. Это видно из рис. 2. На нем в качестве примера приведены ФПР заряженных частиц в ливнях с $E_0 = 10^{18} \text{ эВ}$ и $\cos\theta = 0.9$ для первичных протонов (светлые кружки) и ядер железа (темные кружки), вычисленные по модели QGSJET-II-04. Координаты оси и $\rho_{s,600}(\theta)$ находились по преобразованной функции Линсли [11]:

$$f_s(R, \theta) = \rho_{s,600}(\theta) (600/R) [(R_M + 600)/(R_M + R)]^{b_s - 1}, \quad (4)$$

где R_M – мольеровский радиус. Последний зависит от температуры T и давления P :

$$R_M \approx (7.5 \cdot 10^4 / P) (T/273) \text{ м}. \quad (5)$$

Значение R_M определялось в каждом ливне (для Якутска $\langle T \rangle \approx -18^\circ \text{ C}$ и $\langle R_M \rangle \approx 70 \text{ м}$). Входящий в формулу (4) параметр b_s был определен нами ранее [12]:

$$B_s = 1.38 + 2.16 \cos\theta + 0.15 \lg[\rho_{s,600}(\theta)]. \quad (6)$$

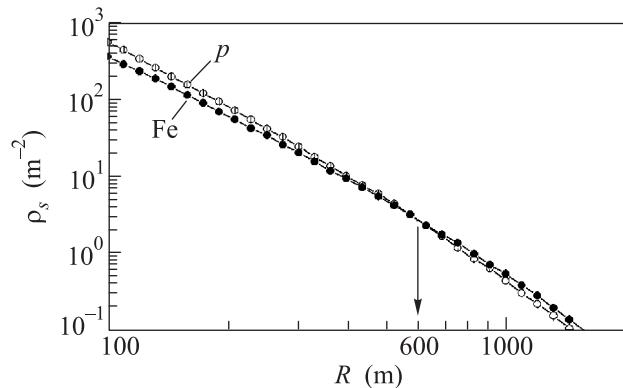


Рис. 2. Функции пространственного распределения заряженных частиц в ливнях с $E_0 = 10^{18} \text{ эВ}$ и $\cos\theta = 0.9$ для первичных протонов (светлые кружки) и ядер железа (темные кружки), вычисленные по модели QGSJET-II-04

На рис. 3 показаны плотности мюонов $\lg[\langle \rho_\mu(300) \rangle / \langle E_0 \rangle]$ на расстоянии 300 м от оси ливней в группах со средними значениями $\langle E_0 \rangle$ и

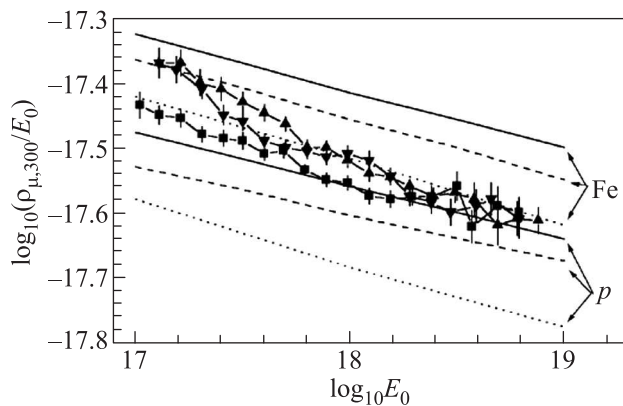


Рис. 3. Плотности мюонов с порогом $1.0 \text{ sec} \theta$ ГэВ на расстоянии от оси 300 м, нормированные на E_0 , в ливнях с зенитным углом $\langle \cos \theta \rangle = 0.9$ и разными первичными энергиями. Сплошные, штриховые и пунктирные линии – расчеты по моделям QGSJET-II-04, QGSJET-01 и соответственно SIBILL для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe). Значки – экспериментальные величины, относящиеся к периодам наблюдений 1987–1996 гг. (квадраты), 1996–2000 гг. (треугольники) и 2011–2013 гг. (перевернутые треугольники)

$\langle \cos \theta \rangle = 0.9$. Нормировка на первичную энергию дает более наглядное и удобное для дальнейшего анализа представление мюонных данных. 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. Величины $\langle \rho_\mu(300) \rangle$ были получены из аппроксимаций средних ФПР. При построении ФПР плотности мюонов в отдельных ливнях умножались на нормировочный коэффициент $\langle E_0 \rangle / E_0$ и усреднялись между собой в бинах $\lg R = 0.04$. Средние плотности мюонов находились по формуле

$$\langle \rho_\mu(R_i) \rangle = \left[\sum_{n=1}^{N_1} \rho_n(R_i) \right] / (N_1 + N_0), \quad (7)$$

где N_1 и N_0 – числа ненулевых и нулевых показаний мюонных детекторов на расстояниях от оси в интервалах $(\lg(R_i), \lg(R_i) + 0.04)$. Нулевые показания N_0 относятся к случаям, когда детекторы не зарегистрировали ни одного мюона, но находились в режиме ожидания. Средние ФПР мюонов аппроксимировались функциями [4]

$$\rho_\mu(R, \theta) = F_\mu(R, \theta)(1 + R/2000)^{-6.5} \quad (8)$$

с известным соотношением Грейзена [13]:

$$F_\mu(R, \theta) = C_\mu N_\mu r^{-0.75} (1 + r)^{0.75 - b_\mu}, \quad (9)$$

где C_μ – нормировочная константа, N_μ – полное число мюонов на уровне наблюдения (для Якутска 1020 г/см^2), $r = R/280$, b_μ – параметр. Наиболее подходящие значения b_s , $\rho_{s,600}(\theta)$ в (4) и b_μ , $\rho_{\mu,600}(\theta)$ в (8) находились методом наименьших квадратов с помощью χ^2 -тестов. Ошибки на рис.3 включают в себя всю совокупность, связанную со статистикой событий и усреднением данных. Линиями показаны ожидаемые величины, вычисленные по моделям QGSJET-II-04, QGSJET-01 (сплошные и штриховые линии соответственно) [14] и SIBILL (пунктир) [15] из пакета программ CORSIKA (версии 6.990 [16]) для первичных протонов и ядер железа. 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 (*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.

Видно, что эксперимент не согласуется с моделью SIBILL [15] ни при каком составе первичных частиц КЛ. Эта модель дает значительно меньшее число мюонов по абсолютной величине. Две другие модели гораздо лучше согласуются с нашим экспериментом. Они позволяют оценить массовый состав первичных частиц. Рассмотрим для простоты двух-

компонентный состав из протонов и ядер железа. В этом случае соотношение

$$\langle \ln A \rangle = W_p \ln 1 + W_{\text{Fe}} \ln 56 \quad (10)$$

дает весовые функции $W_p = 1 - W_{\text{Fe}}$ и $W_{\text{Fe}} = \langle \ln A \rangle / \ln 56$. В рамках данной гипотезы имеем

$$W_{\text{Fe}} = (d_{\text{exp}} - d_p) / (d_{\text{Fe}} - d_p), \quad (11)$$

где $d = \lg[\rho_\mu(300)/E_0]$ – величины, полученные в эксперименте (exp) и расчетным путем.

Темными значками на рис.4 показаны зависимости среднего массового состава КЛ от первичной

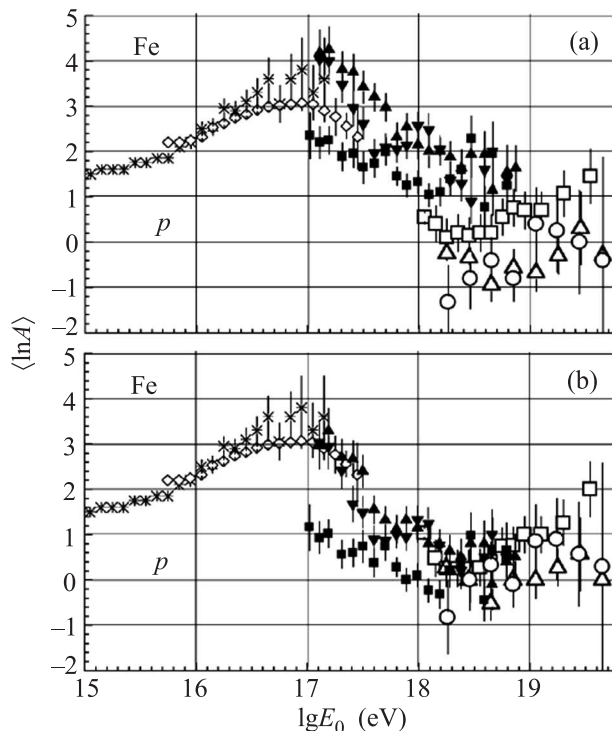


Рис.4. Средний атомный номер КЛ в зависимости от энергии первичных частиц по данным разных наблюдений: звездочки – KASCADE [16], ромбы – Тунка-133 [17], светлые треугольники – HiRes [19], светлые квадраты – PAO [20], светлые кружки – TA [21], для моделей QGSJET-01 (a) и QGSJET-II-04 (b). Темные значки – наши данные для $\langle \rho_\mu(300) \rangle$ с порогом $1.0 \text{ sec} \theta$ ГэВ, относящиеся к периодам наблюдений 1987–1996 гг. (квадраты), 1996–2000 гг. (треугольники) и 2011–2013 гг. (перевернутые треугольники)

энергии в разные периоды наблюдений на якутской установке ШАЛ, вытекающие из моделей QGSJET-01 [14] (a) и QGSJET-II-04 (b). Квадраты относятся к 1987–1996 гг., непосредственно предшествующим явлению [8, 9], о котором говорилось выше. Треугольники, развернутые вверх, характеризуют дальней-

шие изменения в период 1996–2000 гг., а треугольники развернутые вниз, – текущее состояние на момент 2011–2013 гг. Видно, что после 1996 г. массовый состав КЛ с $E_0 < 2 \cdot 10^{18}$ эВ стал существенно тяжелее, чем в предыдущие годы. За прошедшее время наметилась тенденция к некоторому его изменению в обратную сторону. Что касается области энергий $E_0 \geq 2 \cdot 10^{18}$ эВ, то здесь в пределах ошибок измерений каких-либо временных различий состава КЛ не наблюдается.

Звездочками на рис. 4 изображены результаты KASCADE, полученные с мая 1998 г. по декабрь 1999 г. [16]. Светлыми ромбами показаны данные установки Тунка-133, полученные из ФПР черенковского излучения ШАЛ за два зимних сезона (2009–2011 гг.) [17]. Остальные величины найдены из значений $X_m(E_0)$, измеренных экспериментально и рассчитанных по моделям QGSJET-01 и QGSJET-II-04 [18] с помощью соотношения (11), в котором параметр $d = X_m$ есть глубина максимума развития ШАЛ. Светлыми треугольниками показаны данные HiRes [19], относящиеся к периоду наблюдений между ноябрем 1999 г. и сентябрем 2001 г. Квадраты – данные PAO [20] с декабря 2004 г. по сентябрь 2010 г. Кружки – данные TA [21].

Видно, что все оценки среднего массового состава КЛ, сделанные по модели QGSJET-II-04, лучше согласуются между собой, чем оценки по QGSJET-01. Результаты на рис. 4b говорят о том, что в области энергий $E_0 \approx (1–20) \cdot 10^{17}$ эВ состав КЛ после 1996 г. быстро менялся в сторону легких ядер с ростом первичной энергии. В 2009–2013 гг. он уменьшился с $\langle \ln A \rangle = 3.0 \pm 0.4$ при $E_0 \approx 10^{17}$ эВ до $\langle \ln A \rangle = 0.4 \pm 0.4$ при $E_0 \approx 2 \cdot 10^{18}$ эВ. Ранее, судя по результатам наших наблюдений в 1987–1996 гг., состав был гораздо легче (при $E_0 \approx 10^{17}$ эВ $\langle \ln A \rangle = 1.0 \pm 0.4$). Это согласуется с результатами [8, 9] и предположением о том, что где-то произошел гигантский взрыв, который привнес дополнительно к фону заметную долю тяжелых ядер.

3. Заключение. Сравнение мюонных данных якутской установки с современными моделями ШАЛ еще раз показало важность этой компоненты для изучения развития ливней и состава КЛ. Результаты, приведенные на рис. 3, демонстрируют определенное согласие эксперимента с моделями QGSJET 01 и QGSJET-II-04 в диапазоне энергий $E_0 \approx (10^{17}–10^{19})$ эВ. Модель QGSJET-II-04 на рис. 4 согласуется со всеми данными гораздо лучше, чем QGSJET 01. Сделанные в рамках этой модели оценки среднего массового состава КЛ говорят о его быстром изменении в области энергий $E_0 \approx (1–20) \times$

$\times 10^{17}$ эВ в сторону легких ядер. Вероятно, это обусловлено переходом от галактических КЛ к внегалактическим. При $E_0 \geq 2 \cdot 10^{18}$ эВ наши данные и данные [16–21] (см. рис. 4b) в пределах ошибок измерений согласованно указывают на небольшое утяжеление состава с ростом энергии КЛ.

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

1. A. V. Glushkov, I. T. Makarov, E. S. Nikiforova et al., *Astroparticle Physics* **4**, 1274 (1995).
2. А. В. Глушков, В. Б. Косарев, И. Т. Макаров и др., *Письма в ЖЭТФ* **67**, 361 (1998).
3. А. В. Глушков, И. Т. Макаров, М. И. Правдин и др., *Письма в ЖЭТФ* **71**, 145 (2000).
4. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов и др., *ЯФ* **63**, 1557 (2000).
5. А. В. Глушков, Л. Г. Деденко, И. Е. Слепцов, *ЯФ* **68**, 74 (2005).
6. А. В. Глушков, М. И. Правдин, *ЖЭТФ* **130**, 963 (2006).
7. A. V. Glushkov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin et al., arXiv: 0907.0374v1 (2009).
8. А. В. Глушков, М. И. Правдин, *Письма в ЖЭТФ* **95**, 499 (2012).
9. А. В. Глушков, М. И. Правдин, *Письма в Астрон. журн.* **39**, 83 (2013).
10. А. В. Глушков, А. В. Сабуров, *Письма в ЖЭТФ* **97**, 514 (2013).
11. J. Linsley et al., *J. Phys. Soc. Japan.* **17**(A-III), 91 (1962).
12. А. В. Глушков и др., *Сб. науч. Трудов*, Якутск: ЯФ СО АН СССР, с. 45 (1976).
13. K. Greisen, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **10**, 63 (1960).
14. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* **52**, 17 (1997).
15. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle et al., *FZKA 6019*, Forschungszentrum Karlsruhe (1988).
16. H. Ulrich, T. Antoni, W. D. Apel et al., *Proc. 27th ICRC* **2**, 97 (2001).
17. S. F. Berezhnev et al., E-print archives astro-ph/1201.2122 v1.
18. E. Barcikowski et al., E-print archives astro-ph/1306.4430 v1.
19. R. Abbasi et al. (HiRes Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **104**, 161101 (2010).
20. J. Abraham et al. (Pierre Auger Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **104**, 091101 (2010).
21. C. Jui et al. (TA Coll.), *Proc. APS DPF Meeting* arXiv:1110.0133.