

# Оценка массового состава космических лучей с $E_0 \leq 10^{18}$ эВ по данным нового мюонного детектора якутской установки ШАЛ

А. В. Глушков<sup>1)</sup>, А. В. Сабуров

Институт космофизических исследований и аэронауки, Якутский научный центр СО РАН,  
677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 15 февраля 2013 г.

После переработки 14 марта 2013 г.

Исследовано пространственное распределение мюонов с порогом  $E_\mu \approx 0.5 \text{sec}\theta$  ГэВ ( $\theta$  – зенитный угол) в широких атмосферных ливнях с энергией  $E_0 \geq 10^{17}$  эВ с помощью нового детектора, расположенного в 180 м от центра якутской установки, который начал функционировать с осени 2012 г. Детектор состоит из 27 сцинтилляционных счетчиков площадью  $2 \text{ м}^2$ , работающих автономно. Экспериментальные значения сравниваются с расчетами, выполненными по модели QGSJET-01 из пакета программ CORSIKA. Наблюдается согласие эксперимента и теории при смешанном составе космических лучей со средним атомным номером  $\langle \ln A \rangle \approx 2.84 \pm 0.08$ .

DOI: 10.7868/S0370274X1308002X

**1. Введение.** Мюоны с энергиями  $\sim 0.5\text{--}1.0$  ГэВ являются очень важной компонентой в широких атмосферных ливнях (ШАЛ), образующихся от космических лучей (КЛ) сверхвысоких энергий ( $E_0 \geq 10^{15}$  эВ). Они слабо поглощаются в атмосфере, чувствительны к характеристикам ядерных взаимодействий в процессе развития ШАЛ, а также к химическому составу КЛ. Количество и пространственное распределение мюонов указанных энергий позволяет регистрировать их установками с большими расстояниями между детекторами. На якутской установке ШАЛ непрерывно с 1978 г. регистрируются мюоны с пороговой энергией  $E_\mu \approx 1.0 \text{sec}\theta$  ГэВ на удалении от центра 350–1000 м. За это время накоплен большой экспериментальный материал, анализ которого показал [1–6], что ШАЛ с  $E_0 \geq (3\text{--}5) \cdot 10^{18}$  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 доля мюонов от полного числа заряженных частиц в ШАЛ с энергией  $E_0 \geq 10^{17}$  эВ заметно отличается в разные периоды времени. До 1996 г. она варьировалась возле одного устойчивого положения, а затем существенно увеличилась. Это сопровождалось одновременными изменениями энергетического спектра и глобальной анизотропии КЛ в области энергий  $(1\text{--}10) \cdot 10^{17}$  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  $A_1 = 0.033 \pm 0.010$ . Все это могло быть вызвано существенно возросшим потоком тяжелых ядер со стороны выхода Местного рукава Галактики после 1996 г. В данной работе представлены экспериментальные данные, связанные с уникальными результатами [8, 9].

**2. Эксперимент.** Осенью 2012 г. мы проверили техническое состояние действующих мюонных детекторов и включили в работу 27 новых сцинтилляционных счетчиков (толщина сцинтиллятора 5 см, площадь  $2 \text{ м}^2$ ) с порогом  $E_\mu \approx 0.5 \text{sec}\theta$  ГэВ, который обеспечивается соответствующей толщиной земляного грунта. Счетчики расположены на расстоянии 180 м от центра якутской установки ШАЛ. Они измеряют амплитуду на выходе фотоумножителя ФЭУ-125 в диапазоне 1–5000 частиц с помощью логарифмических РС-преобразователей с точностью 10% и работают автономно. Калибровка и контроль их работы осуществляются с помощью амплитудных спектров плотностей от фоновых космических частиц [10]. 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  $\approx 2\text{--}3 \text{ с}^{-1}$ ). Эти станции образуют сетку из равносторонних треугольников со сторонами 500 м. Они отбирают ШАЛ и слушают для определения основных параметров ливня.

<sup>1)</sup>e-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

Второй спектр без управления с частотой  $\sim 200 \text{ с}^{-1}$  используется для калибровки мюонных детекторов. Оба спектра имеют степенной вид:

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

где  $\eta = 1.7$  и  $3.1$  в первом и во втором случаях;  $U$  – отклик детектора;  $\rho = U/U_1$  – плотность частиц в единицах отклика  $U_1$  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. Для мюонных детекторов это делается дважды в сутки по 10 мин. Если параметры спектров плотностей выходят за определенные пределы стабильности, то детекторы считаются нерабочими и исключаются из дальнейшей обработки данных регистрации ШАЛ.

### 3. Полученные результаты и обсуждение.

Ниже рассмотрены ШАЛ с энергией  $(1.6-10) \cdot 10^{17}$  эВ и зенитными углами  $\theta \leq 45^\circ$ , зарегистрированные с 7 декабря 2012 г. по 2 февраля 2013 г., оси которых попали в центральный круг установки с радиусом 1 км и были найдены с точностью не хуже 20 м. Таких событий оказалось 186. Энергия первичных частиц находилась из соотношений

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

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

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

где  $\rho_{s,600}(\theta)$  – плотность заряженных частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии  $R = 600$  м от оси ливня. Точность определения  $\rho_{s,600}(\theta)$  в индивидуальных ШАЛ была не хуже 10%. Координаты оси и  $\rho_{s,600}(\theta)$  находились по функции Линсли [11]:

$$f_s = N_s C_s r^{-1} (1 + r)^{1-b_s}, \quad (4)$$

где  $r = R/R_M$ ,  $R_M$  – мольеровский радиус. Последний зависит от температуры  $T$  и давления  $P$ :

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

Значение  $R_M$  определялось в каждом ливне (для Якутска  $\langle T \rangle \approx -18^\circ \text{C}$  и  $\langle R_M \rangle \approx 70$  м). В формуле (4)  $C_s$  – нормировочная константа;  $N_s$  – полное число заряженных частиц на уровне наблюдения;  $b_s$  – параметр, определенный ранее [12]:

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

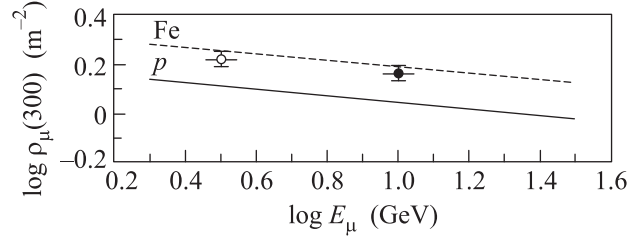


Рис. 1. Плотности мюонов на расстоянии  $R = 300$  м от оси ШАЛ с разными порогами регистрации  $E_\mu$  и первичной энергией  $E_0$  в ливнях с зенитным углом  $\cos\theta = 0.9$ . Сплошная и штриховая линии – расчеты по модели QGSJET-01 [13] для первичных протонов и ядер железа соответственно. Светлый и темный кружки – экспериментальные величины

На рис. 1 светлым кружком показана плотность мюонов  $\langle \rho_\mu(300) \rangle$  в ливнях упомянутой выше выборки с  $\langle E_0 \rangle = 4 \cdot 10^{17}$  эВ и  $\langle \cos\theta \rangle = 0.9$ . Она определялась на расстоянии  $R = 300$  м от оси ШАЛ, где достаточно статистики и минимально влияние флуктуаций на изменяемые плотности частиц. Значение  $\langle \rho_\mu(300) \rangle$  было получено из средней функции пространственного распределения (ФПР) мюонов, изображенной светлыми кружками на рис. 2. Вертикальные ошибки включают всю их совокуп-

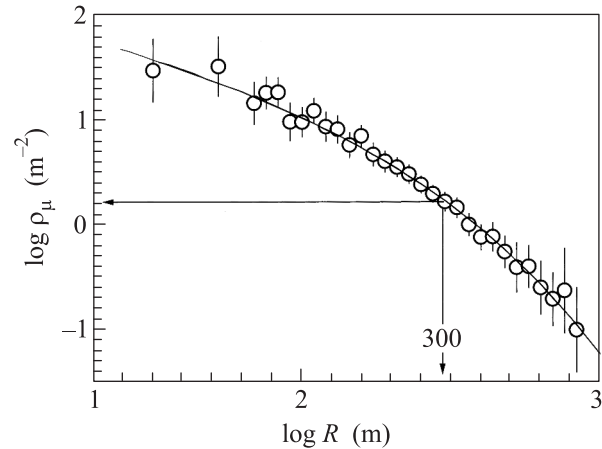


Рис. 2. Пространственное распределение мюонов с порогом  $0.5 \text{ sec}\theta \text{ ГэВ}$  в ливнях с энергией  $\langle E_0 \rangle = 4 \cdot 10^{17}$  эВ и зенитным углом  $\langle \cos\theta \rangle = 0.9$ . Кривая – расчет по модели QGSJET-01 [13] для ядер с  $\langle \ln A \rangle \approx 2.84$

ность, связанную с построением средней ФПР мюонов. Горизонтальные ошибки отражают тот факт, что земляные экраны мюонных детекторов не являются строго плоскими, а имеют некоторую куполообразность. Поэтому пороги 0.5 и 1.0 ГэВ – это некоторые средние величины по всем направлениям прихода ШАЛ. Линиями на рис. 1 показаны из-

менения плотности  $\rho_\mu(300)$  в зависимости от порога мюонов  $E_\mu$  в ливнях с разной энергией  $E_0$ , вычисленные по модели QGSJET-01 [13] из пакета программ CORSIKA (версии 6.990 [14]) для первичных протонов и ядер железа. Для получения расчетных величин 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 (*thinning*) 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. Темным кружком на рис. 1 изображена плотность мюонов с порогом  $E_\mu \approx 1.0 \text{sec}\theta$  ГэВ, найденная аналогично тому, как это делалось в [8]. Горизонтальные линии показывают неопределенность порогов детекторов.

Видно, что с учетом различий пороговой энергии мюонов два независимых измерения дали хорошо согласующиеся между собой результаты. Эти данные позволяют оценить химический состав первичных частиц. Рассмотрим для простоты двухкомпонентный состав из протонов и ядер железа. В таком случае соотношение

$$\langle \ln A \rangle = W_p \ln 1 + W_{\text{Fe}} \ln 56 \quad (7)$$

дает весовые функции  $W_p = 1 - W_{\text{Fe}}$  и  $W_{\text{Fe}} = \langle \ln A \rangle / \ln 56$ . В рамках рассматриваемой гипотезы и модели QGSJET-01 имеем

$$W_{\text{Fe}} = (d_{\text{exp}} - d_p) / (d_{\text{Fe}} - d_p), \quad (8)$$

где  $d = \lg[\rho_\mu(300)]$  – величины, полученные в эксперименте (exp) и расчетным путем. Из (8) следуют оценки доли ядер железа  $\approx 0.71 \pm 0.02$  и  $0.78 \pm 0.02$  соответственно. Они дают  $\langle \ln A \rangle \approx 2.84 \pm 0.08$  и  $3.12 \pm 0.08$  на текущий момент времени. Во временном масштабе эти величины подтверждают наметившуюся в [8] после 2002 г. тенденцию к постепенному изменению химического состава КЛ в сторону более легких ядер.

Кривой на рис. 2 изображена аппроксимация [3]

$$\rho_\mu(R) = f_\mu(1 + R/2000)^{-6.5} \quad (9)$$

с известным соотношением Грейзена [15]

$$F_\mu = N_\mu C_\mu r^{-0.75} (1 + r)^{0.75 - b_\mu} \quad (10)$$

рассчитанная по модели QGSJET-01 ФПП для состава КЛ с  $\langle \ln A \rangle \approx 2.84$ . В (10)  $r = R/R_0$  ( $R_0 = 280$  м),  $C_\mu$  – нормировочная константа,  $N_\mu$  – полное число мюонов на уровне наблюдения (для Якутска  $1020 \text{ г/см}^2$ ),  $b_\mu = 1.76$ .

**4. Заключение.** Анализ работы якутской установки ШАЛ осенью 2012 г. еще раз показал, что результаты [8, 9] не связаны с отклонениями ее технических характеристик от нормы, а обусловлены, вероятно, какими-то астрофизическими причинами. Важная информация о составе КЛ заключена в мюонной компоненте ШАЛ. Новый мюонный детектор с порогом  $E_\mu \approx 0.5 \text{sec}\theta$  ГэВ еще раз подтвердил это. Оба типа мюонных детекторов дают хорошее согласие ФПП с моделью QGSJET-01 [13] во всем наблюдаемом диапазоне расстояний от оси ШАЛ. Это наводит на мысль о том, что мюонная компонента может сыграть важную роль в перекрестной энергетической калибровке мировых установок ШАЛ, где до сих пор нет ясности в правильности того или иного метода оценки энергии первичной частицы. Мы планируем продолжить слежение за событиями, о которых говорилось в [8, 9].

Работа выполнена при финансовой поддержке РАН по программе “Фундаментальные свойства материи и астрофизики”.

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., *Phys. Rev. D* **82**, 041101 (2010).
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, О. С. Диминштейн, Т. А. Егоров и др., *Сб. научных трудов*, Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1974, 43.
11. J. Linsley, L. Scarsi, and B. Rossi, *J. Phys. Soc. Japan* **17**, Suppl. A-III, 91 (1962).
12. А. В. Глушков и др., *Сб. науч. Трудов*, Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976, 45.
13. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* **52**, 17 (1997).
14. D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle et al., *FZKA 6019: Forschungszentrum Karlsruhe*, 1988.
15. K. Greisen, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **10**, 63 (1960).