

Нестационарные явления в космических лучах с $E_0 \leq 10^{18}$ эВ по данным якутской установки ШАЛ

А. В. Глушков¹⁾, М. И. Правдин

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

Поступила в редакцию 31 января 2012 г.

После переработки 11 марта 2012 г.

Исследованы энергетический спектр космических лучей и доля мюонов с порогом $1.0 \text{sec}\theta$ ГэВ в полном числе заряженных частиц в ШАЛ с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ по данным Якутской установки за 35 лет ее непрерывной работы (1978–2012 гг.). Показано, что эти характеристики заметно различаются в разные периоды времени. До 1996 г. интегральная интенсивность спектра при $E_0 = 10^{17}$ эВ варьировалась возле одного устойчивого положения, а затем начала расти. За 7 лет она увеличилась на $45 \pm 5\%$, после чего начала падать. Это явление сопровождалось аналогичным изменением доли мюонов и было вызвано существенным утяжелением химического состава космических лучей после 1996 г. по сравнению с предыдущими годами.

1. Введение. Космические лучи (КЛ) сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{17}$ эВ) все еще остаются загадочными, хотя исследуются во всем мире на установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) более 50 лет. Первичные частицы таких энергий изучены совсем плохо из-за очень низкого потока. До сих пор точно не известен их химический состав, без знания которого трудно понять характер ядерных взаимодействий в этой области энергий. По данным [1–3] при $E_0 \geq (3–5) \cdot 10^{18}$ эВ имеют место некоторые новые процессы развития ШАЛ. Обнаружение источников КЛ сверхвысоких энергий может помочь решению этой проблемы, хотя здесь тоже имеется много трудностей. Широкое развитие получила идея о том, что остатки сверхновых (ОСН) генерируют основную долю наблюдаемых КЛ вплоть до $E_0 = 10^{17}$ эВ [4]. Она находится в некотором количественном согласии с наблюдаемым энергетическим спектром и составом КЛ [4, 5]. Имеются также указания на то, что источниками КЛ могут быть пульсары [6], или даже квазары [7].

В настоящее время Якутская установка является единственной в мире, работающей в штатном режиме непрерывно с 1974 г. За это время на ней зарегистрировано более 2 миллионов ШАЛ. В данной работе представлены новые экспериментальные результаты, связанные с этой уникальной ситуацией. Они дополняют проблему происхождения КЛ сверхвысоких энергий еще одним загадочным явлением.

2. Эксперимент. Якутская установка ШАЛ расположена в долине реки Лены в 50 км южнее Якутска (61.7°N , 129.4°E), на высоте ≈ 100 м над уровнем мо-

ря [8]. В декабре 1970 г. было запущено 13 станций, расположенных в круге радиусом 1 км. В них находятся пластические сцинтилляционные детекторы ($2 \times 2 \text{ м}^2$) и регистрирующая электроника. Одновременное срабатывание двух детекторов заряженных частиц является локальным триггером для обработки информации на станции. Сигналы от детекторов преобразуются в цифровой код и запоминаются в буферной памяти. Вся информация о прохождении ливня передается по линиям связи в центр. Для калориметрирования энергии КЛ на станциях были установлены детекторы, измеряющие поток черенковского излучения ШАЛ в атмосфере. С 1974 г. заработала первая очередь установки из 35 однотипных станций наблюдения на площади более 17 км^2 . В 1978–1979 гг. вступило в строй два мюонных сцинтилляционных детектора с суммарной площадью 72 м^2 и порогом $1.0 \text{sec}\theta$ ГэВ (θ – зенитный угол) на удалении от центра 350–530 м. В 1986 г. было запущено еще 3 мюонных детектора (площадь каждого 20 м^2) с аналогичным порогом в центральном круге установки радиусом 1 км.

При реконструкции в 1990–1992 гг. из-за демонтажа самых удаленных (3 км) станций наблюдения общая площадь их размещения уменьшилась до 11 км^2 . Вместе с тем количество станций возросло почти в 1.5 раза. Сейчас в отборе событий участвует 49 станций, расположенных в круге радиусом 2 км. На большей части площади расстояние между соседними станциями равно 500 м. Они образуют 63 мастерных треугольника (триггер-500). Триггер-1000 включает в себя оставшиеся 19 станций первой очереди. Он независимо отбирает ШАЛ, хотя на большей части установки его дублирует триггер-500. Для определе-

¹⁾ e-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

ния направления прихода первичной частицы в каждой станции с точностью в 100 нс измеряется отрезок времени с момента регистрации первой частицы из всех прошедших через счетчики до очередного синхроимпульса установки. Синхронизирующие сигналы непрерывно подаются установленным в центре радиопередатчиком с периодом 100 мкс. Обычная точность угловых измерений составляет $2^\circ - 3^\circ$.

Сцинтилляционные детекторы на Якутской установке калибруются и контролируются с помощью амплитудных спектров плотностей от фоновых космических частиц [9]. 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 $\sim 300 \text{ с}^{-1}$. Он 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. Делается это 1 раз за двое суток. При этом спектры двойных совпадений снимаются 2 ч, а спектры без управления – 30 мин.

3. Результаты. Ниже рассмотрены ШАЛ с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ и зенитными углами $\theta \leq 45^\circ$, зарегистрированные на Якутской установке за период 1978–2012 гг. 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. Координаты оси и $\rho_{s,600}(\theta)$ находились по функции Линсли [10]:

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

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 $\langle T \rangle \approx -18^\circ \text{С}$ 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 [11]:

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

3.1. Энергетический спектр. На рис. 1а темными кружками показаны изменения интегральной интенсивности КЛ при $E_0 = 10^{17}$ эВ по годам их прихода

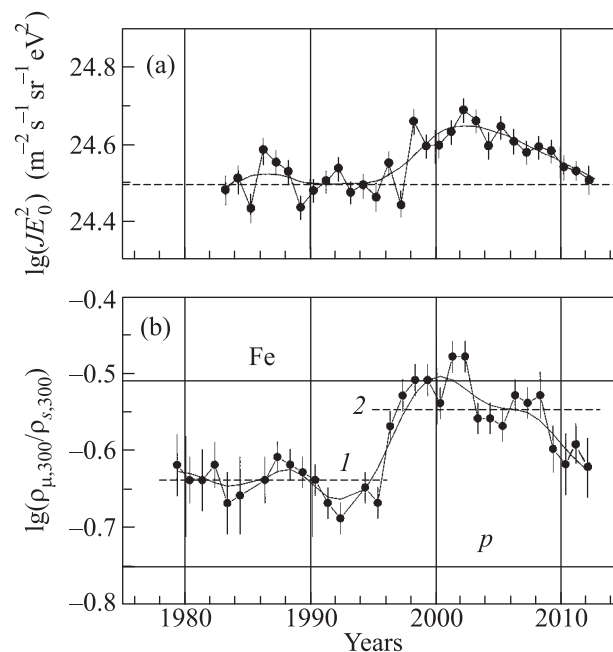


Рис. 1. (а) – Интегральная интенсивность космических лучей при $E_0 = 10^{17}$ эВ по годам их прихода на Якутской установке ШАЛ. Кривые линии – сплайны по 5 соседним точкам. (б) — Доля мюонов с порогом $1.0 \text{ сек} \theta$ ГэВ в полном числе заряженных частиц на расстоянии 300 м от оси ШАЛ с $E_0 = (1.6-10) \cdot 10^{17}$ эВ и $\langle \cos\theta \rangle = 0.9$ в годовых выборках по данным Якутской установки. Сплошные линии – расчеты [3] по модели QGSJET [13] для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe); штриховые линии 1 и 2 – средние величины в соответствующие периоды времени

да. Ошибки включают в себя статистику событий, а также статистическую ошибку измерения энергии ΔE_0 и связанную с ней погрешность определения потока $\Delta J(\geq E_0)$. Мы взяли только те ливни, оси которых попали в центральный круг установки радиусом $R \leq 500$ м. Эта часть установки работала стабильно все годы, логика электронного отбора ШАЛ не менялась. Ливни регистрировались с эффективностью ~ 1 . Это обеспечивалось требованием, чтобы хотя бы один мастерный треугольник включал в

себя 3 станции с суммарными откликами двух детекторов, эквивалентными регистрациям ими ≥ 8 частиц. Всего таких равнобедренных треугольников 6. Оси ливней внутри этих треугольников распределялись по площади неравномерно: в центре плотнее, чем возле станций. Чтобы исключить эту неравномерность, мы брали только те ШАЛ, оси которых оказались внутри вписанных в мастерные треугольники окружностей радиусом 150 м. При $E_0 \geq 2 \cdot 10^{18}$ эВ использовалась вся площадь установки. Точность определения координат оси была не хуже 20 м. Ливни регистрировались с 5–10 сентября по 15–20 июня. Летом установка из-за опасности повреждения во время гроз и для профилактических работ выключалась.

Кривой линией на рис. 1а показано поведение интенсивностей в среднем, полученное сплайном по пяти соседним точкам. Видно, что их поток за рассмотренный период времени не был постоянным. До 1998 г. он оставался приблизительно на одном уровне, который показан штриховой прямой, а затем начал расти. Увеличение интенсивности по сплайну в 2003–2004 гг. достигло максимальной величины $\sim 45 \pm 5\%$. Затем начался устойчивый спад. В настоящее время интенсивность достигла первоначального уровня. Исходя из этого можно говорить о том, что в период 1998–2010 гг. в космических лучах имело место какое-то уникальное явление взрывного характера. Оно развивалось на фоне заметных относительных вариаций интенсивности КЛ в интервалах 1–3 года.

На рис. 2а темными и светлыми кружками показаны интегральные спектры за периоды 1983–1994 и 1996–2010 гг. соответственно, т.е. до и после роста интенсивности на рис. 1а. Видно, что они отличаются друг от друга. В области $E_0 \leq 10^{18}$ эВ имеется своеобразная “вилка”, которая при $E_0 = 10^{17}$ эВ достигает различия $25 \pm 4\%$. Далее спектры в пределах статистических ошибок сходятся между собой. Мы полагаем, что они отражают динамику какого-то события взрывного характера.

3.2. Доля мюонов. В связи с вышеизложенным большой интерес представляет определение доли мюонов в полном числе заряженных частиц на уровне наблюдения, которая содержит в себе информацию о составе КЛ. Непрерывная регистрация мюонной компоненты на Якутской установке ШАЛ в течение длительного времени позволяет определить ее синхронно с полученными выше результатами. На рис. 1б темными кружками показана доля мюонов $\rho_\mu(300)/\rho_s(300)$ в ливнях с $E_0 = (1.6–10) \cdot 10^{17}$ эВ и $\langle \cos \theta \rangle = 0.9$ по годам их прихода. Она определялась на расстоянии $R = 300$ м от оси ШАЛ, где достаточ-

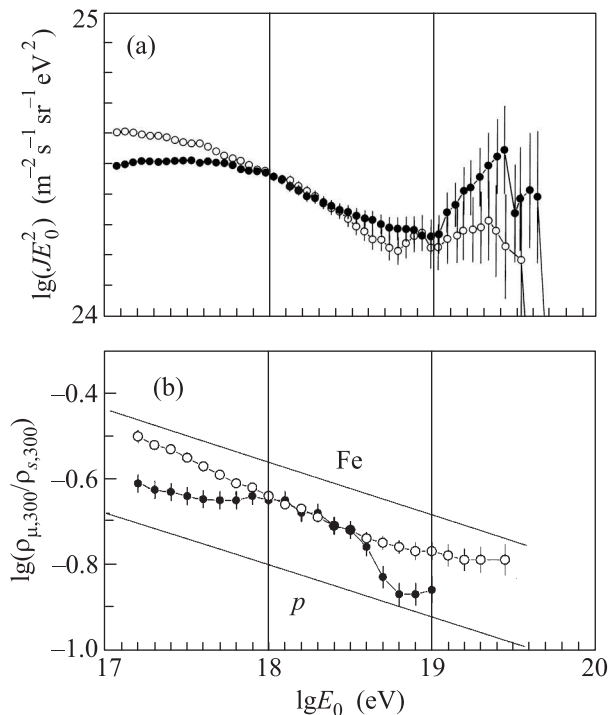


Рис. 2. (а) – Интегральные энергетические спектры, полученные на Якутской установке ШАЛ в 1983–1994 (закрытые кружки) и 1996–2010 (открытые кружки) годы. (б) – Доля мюонов с порогом 1.0 secθ ГэВ в полном числе заряженных частиц на расстоянии 300 м от оси ШАЛ с $E_0 = (1.6–10) \cdot 10^{17}$ эВ и $\langle \cos \theta \rangle = 0.9$ по данным Якутской установки в 1978–1994 (закрытые кружки) и 1996–2010 (открытые кружки) годы регистрации. Сплошные линии – расчеты [3] по модели QGSJET [13] для первичных протонов (p) и ядер железа (Fe)

но статистики и минимально влияние флуктуаций на измеряемые плотности частиц. Значения $\rho_\mu(300)$ были получены из средних функций пространственного распределения (ФПР) мюонов [3]

$$\rho_\mu(R) = f_\mu(1 + R/2000)^{-6.5} \quad (7)$$

с известным соотношением Грейзена [12]:

$$f_\mu = N_\mu C_\mu r^{-0.75} (1 + r)^{0.75 - b_\mu}, \quad (8)$$

где $r = R/R_0$ ($R_0 = 280$ м), C_μ – нормировочная константа, N_μ – полное число мюонов на уровне наблюдения (для Якутска 1020 г/см^2), b_μ – параметр, аналогичный (6). Для определения $\rho_s(300)$ использовалась ФПР заряженных частиц [3]:

$$\rho_s(R) = f_s(1 + R/2000)^{-1.0}, \quad (9)$$

с функцией Линсли (4). Наиболее подходящие параметры b_s и b_m в (4) и (8) находились методом наименьших квадратов, а их значимость определялась χ^2 -тестом.

Прямыми линиями на рис. 1b показаны расчетные величины, найденные в [3] по модели QGSJET [13] для первичного протона (p) и ядра железа (Fe) применительно к Якутской установке ШАЛ. Штриховые линии 1 и 2 соответствуют $\langle \rho_\mu(300)/\rho_s(300) \rangle \approx 0.23$ и 0.28 в 1978–1994 и 1996–2010 гг. наблюдений. Кривой линией изображен сплайном по 5 соседним точкам. Он характеризует изменение доли мюонов в среднем и коррелирует с поведением интенсивностей энергетического спектра. Можно предположить, что быстрое увеличение доли мюонов после 1996 г. связано с утяжелением состава КЛ. Некоторое несовпадение начала роста потока и доли мюонов на рис. 1 может быть связано с кратковременным уменьшением доли легких ядер в фоновом потоке КЛ.

Рассмотрим для простоты двухкомпонентный 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 этой гипотезы и модели QGSJET [13] имеем

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

где $d = \lg[\rho_\mu(300)/\rho_s(300)]$ – доля мюонов, полученная на эксперименте (exp) и расчетным путем. Из (11) для штриховых линий 1 и 2 следуют оценки доли ядер железа ≈ 0.46 и 0.83 соответственно. Они дают $\langle \ln A \rangle \approx 1.85$ и 3.34 до и после изменения состава КЛ в 1996 г.

На рис. 2b темными и светлыми кружками показаны зависимости доли мюонов от энергии КЛ с зенитными углами $\langle \cos \theta \rangle = 0.9$ в выборках 1978–1994 и 1996–2010 гг. соответственно. Условия анализа идентичны тем, при которых получены результаты на рис. 1b. Здесь при $E_0 \leq 10^{18}$ эВ также имеется характерная “вилка”, о которой говорилось выше. Она вызвана относительным изменением доли ядер железа в обеих выборках с ростом энергии КЛ.

4. Обсуждение. Представленные выше результаты не были вызваны ухудшением работы Якутской установки или какими-то ошибками эксперимента. Детекторы все эти годы регулярно калибровались с помощью амплитудных спектров плотностей от фоновых космических частиц. Электроника периодически планомерно проверялась на соответствие всем техническим нормам. Одновременное изменение потока КЛ и доли мюонов, измеренное сцинтилляционными детекторами, подтверждает, что полученный результат не связан с калибровкой сцинтил-

ляторов (так как, по-видимому, изменение в калибровке привело бы к противоположному изменению мюонных плотностей за счет изменения оценки энергии).

Результаты, представленные на рис. 1 и 2, говорят о том, что в КЛ сверхвысоких энергий имело место какое-то неординарное явление. Это привело к существенному утяжелению состава первичных частиц. Первоначально оно было обнаружено на установке KASCADE, где было зафиксировано необычайно быстрое утяжеление состава КЛ в диапазоне энергий $10^{15} - 1.6 \cdot 10^{17}$ эВ от $\langle \ln A \rangle \approx 1.5$ до ≈ 3.4 [14]. Этот результат основан на данных, полученных с мая 1998 по декабрь 1999 г. Ранее состав в этой области энергий согласно многим экспериментальным данным был нормальным (см., например, [15–20]). Здесь “нормальным” мы называем состав, полученный экспериментально в работе [15]: доли ядер с массовыми числами $A = 1, 4, 15, 31, 56$ составляют, соответственно, $0.38, 0.17, 0.16, 0.20, 0.09$ ($\langle \ln A \rangle \approx 1.72$). С помощью рис. 2b и соотношения (11) в рамках модели QGSJET [13] можно проследить за дальнейшим изменением состава. В диапазоне энергий $1.6 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{18}$ эВ он постепенно становился легче: от $\langle \ln A \rangle \approx 3.35$ до ≈ 2.18 . Максимум утяжеления состава приходится на $E_0 \approx 10^{17}$ эВ.

5. Заключение. Длительные и комплексные наблюдения КЛ сверхвысоких энергий на Якутской установке ШАЛ привели к неожиданным и важным результатам. Из приведенных выше данных видно, что астрофизические и ядерно-физические характеристики первичных частиц с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ могут существенно меняться за относительно короткое время. За последние 35 лет произошло событие, которое еще только предстоит осмыслить. В 1996–2012 гг. химический состав КЛ в области энергий $\approx 3 \cdot 10^{15} - 10^{18}$ эВ стал заметно тяжелее по сравнению с предыдущим периодом времени. В последние же 3–4 года наметилась тенденция к его изменению в обратную сторону. Это похоже на проявление какого-то гигантского взрыва, который привнес дополнительно к фоновой заметную долю тяжелых ядер. Пока трудно сказать, какие события в Галактике привели к такому результату. Здесь нужны дальнейшие исследования. Ясно одно: неучет временного фактора получения экспериментальных данных существенно усложняет изучение природы частиц сверхвысоких энергий. Мы планируем исследовать анизотропию КЛ по годам их прихода. Это может дать информацию об источнике упомянутых выше тяжелых ядер, которые сделали картину более динамичной, чем еще недавно представлялась.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (контракт # 16.518.11.7075), по программе Президиума РАН 8.1 “Физика нейтрино и нейтринная астрофизика”, а также поддержана грантом РФФИ # 11-02-1293.

1. А. В. Глушков, В. Б. Косарев, И. Т. Макаров и др., Письма в ЖЭТФ **67**, 361 (1998).
2. А. В. Глушков, И. Т. Макаров, М. И. Правдин и др., Письма в ЖЭТФ **71**, 145 (2000).
3. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов и др., ЯФ **63**, 1557 (2000).
4. E. G. Berezhko and H. J. Volk, ApJ **661**, L175 (2007).
5. E. G. Berezhko, S. P. Knurenko, L. T. Ksenofontov, and V. K. Yelshin, Proc. 24th ICRC (2011).
6. A. A. Mikhailov, Proc. 26th ICRC **3**, 268 (1999).
7. А. В. Глушков, ЯФ **67**, 983 (2004).
8. В. П. Артамонов, Б. Н. Афанасьев, А. В. Глушков и др., Изв. РАН, сер. физ. **58**, 92 (1994).
9. А. В. Глушков, О. С. Диминштейн, Т. А. Егоров и др., Сб. науч. трудов, Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1974, с. 43.
10. J. Linsley et al., J. Phys. Soc. Japan. **17** (Suppl. A-III), 91 (1962).
11. А. В. Глушков, О. С. Диминштейн, Н. Н. Ефимов и др., Сб. науч. трудов, Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976, с. 45.
12. K. Greisen, Ann. Rev. Nucl. Sci. **10**, 63 (1960).
13. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, Nucl. Phys. B **52** (Proc. Suppl.), 17 (1997).
14. H. Ulrich, T. Antoni, W. D. Apel, et al., Proc. 27th ICRC **2**, 97 (2001).
15. M. Simon, H. Spiegelhauer, and W. K. H. Schmidt, Proc. 16th ICRC **1**, 352 (1979).
16. С. И. Никольсий, Й. Н. Стаменов, С. З. Ушев, ЖЭТФ **87**, 18 (1984).
17. G. Battistoni, E. Bellotti, C. Bloise et al., Proc. 19th ICRC **2**, 158 (1985).
18. Y. Muraki, Proc. 19th ICRC **2**, 178 (1985).
19. C. E. Fichtel and J. Linsley, Proc. 19th ICRC **2**, 288 (1985).
20. Н. Н. Калмыков, В. В. Просин, Г. Б. Христиансен, ЯФ **58**, 1657 (1995).